

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG.

Tiago Rodrigo Silva

Itajubá, Dezembro de 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Tiago Rodrigo Silva

Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG.

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

Área de Concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lucio Tiago Filho

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Regina Mambeli Barros

Dezembro de 2012

Itajubá - MG



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO II
FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Título da Dissertação: "Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG"

Autora: Tiago Rodrigo da Silva

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A=Aprovado R=Reprovado I=Insuficiente	
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Observações:

- 1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- 2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- 3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.
- 4) Esse documento terá validade de **60 dias a contar da data da defesa.**

Resultado Final: A Ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 11 de dezembro de 2012.

Prof. Dr. Valdir Schalch
1º Examinador - USP

Prof.ª Dr.ª Heralane Costa Carneiros
2ª Examinadora - UNIFEI

Prof.ª Dr.ª Regina Mambeli Barros
3ª Examinadora (Coorientadora) - UNIFEI

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

DEDICATÓRIA

À minha família, núcleo desencadeador de tudo, célula primordial, amor incondicional.

Em especial ao meu pai, com amor, admiração e gratidão, pelo seu carinho e incentivo, que sem seus ensinamentos nada disto teria sido possível.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus que me propiciou vida, saúde e sabedoria para progredir em meus estudos. Que se fez luz nos momentos onde tudo parecia escuro e impossível.

Ao Prof. Dr. Geraldo Lucio Tiago Filho, meu querido orientador que depositou em mim sua confiança, acreditou no meu trabalho e que muito me ensinou ao longo desses anos.

À Prof^a. Dr^a. Regina Mambeli Barros, minha co-orientadora e amiga pelo o incentivo, dedicação e atenção desprendida incansavelmente.

À Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI que me acolheu de braços abertos.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos meus estimados amigos do Instituto de Recursos Naturais – IRN da UNIFEI, professores, Marcelo Barison, Luciana Botezelli e Vanessa Silveira pelo incentivo e compreensão nos momentos difíceis.

Aos meus colegas de trabalho do Núcleo de Educação a Distância –NEaD da UNIFEI pelo o apoio.

À minha muito amada amiga Thais Seco pela amizade apoio incondicional.

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”.

Antoine Laurent de Lavoisier

RESUMO

SILVA, T. R. **Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG. 2012.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá-MG, 2012. 160p.

A decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários produz o gás de aterro. A emissão descontrolada desse gás pode ser uma ameaça ao meio ambiente, causando danos à vegetação e gerando odores desagradáveis. No entanto, o uso do gás de aterro pode promover vários benefícios, entre eles destacam-se a diminuição de emissão dos gases do Efeito Estufa e a geração de energia a partir de sua combustão para uma comunidade próxima. O objetivo deste estudo é determinar teoricamente a potência elétrica ótima para o aproveitamento do biogás gerado em aterro, levando em consideração os aspectos econômicos, demográficos e regionais do Consórcio Intermunicipal da Microrregião do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário, localizado no sul do estado de Minas Gerais. Para tanto, foi estimado e quantificado a geração de resíduos sólidos domiciliares da região, com base em dados populacionais para o período de 20 anos a fim de estimar a produção do gás de aterro, para mensurar a energia passível de ser gerada. A partir deste ponto, determinar a potência ótima da central térmica, com vistas ao aproveitamento deste insumo energético. Os resultados apontam que o aterro da região, produzirá em vinte anos mais 40.000.000 m³ de metano, e para fazer o aproveitamento energético deste gás, o aterro deverá ter um grupo gerador com uma potência de 564 kW. Além disso, o resultado do estudo de caso demonstrou a aplicabilidade da metodologia de Máximo Benefício Líquido às centrais termelétricas para a determinação da potência ótima.

Palavras-chaves: Aterro Sanitário, Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), Gás de Aterro, Fontes Renováveis; Geração de Energia.

ABSTRACT

SILVA, T. R. **Methodology for determining the theoretical optimum power obtained from the combustion of the biogas generated in landfills: A case study of landfill Itajubá-MG. 2012.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá-MG, 2012. 160p.

The decomposition of organic matter in landfills produces landfill gas. The uncontrolled release of gas can be a threat to the environment, causing damage to vegetation and generating unpleasant odors. However, the use of landfill gas can promote several benefits, among them stand out from the reduction of the emission of Greenhouse gases and power generation from burning them to a nearby community. The objective of this study is to determine theoretically the optimum electrical power for utilization of the landfill gas generated in landfills, taking into account the economic, demographic and regional aspect of Intermunicipal Consortium of High Sapucaí Microregion to Landfill, located in the southern state of Minas Gerais. Therefore, it was estimated and quantified the generation of municipal solid waste in the region, based on population data for the period of 20 years in order to estimate the production of landfill gas, to measure the energy that can be generated. And from this point, determine the optimum electrical power of thermoelectric plant, with a view to harnessing the energy generated. The results indicate that the landfill in the region, in twenty years will produce 40 million cubic meters of methane, and to make energetic use of this gas, the landfill should have a generator with an output of 564 kW. In addition, the result of the case study demonstrated the applicability of the methodology the Maximum Net Benefit to power plants for determining the optimum power.

Keywords: Sanitary Landfill, Municipal Solid Waste (MSW), Landfill Gas, Renewable Sources; Energy Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos resíduos sólidos.	25
Figura 2 – Subdivisão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....	33
Figura 3 – Geração per capita dos RSU em 2010.	33
Figura 4 – Municípios brasileiros com serviço de manejo de RSU e frequência do serviço de coleta em 2008.	35
Figura 5 – Evolução do serviço de coleta dos RSU no Brasil (%).	35
Figura 6 – Quantidade diária total de RSU recebidos por unidades de destinação final (%) no Brasil em 2008.	38
Figura 7 – Municípios, segundo a destinação final dos resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos no Brasil – 2008.....	39
Figura 8 – Destinação final dos RSU coletados no Brasil em 2010 (%).	40
Figura 9 – Variação da composição do biogás em função das fases.	50
Figura 10 – Sequências das rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.....	52
Figura 11 – Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás.....	71
Figura 12 – Esquema de um ciclo Rankine.....	75
Figura 13 – Composição física dos Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD) do município de Itajubá – MG.....	91
Figura 14 – Composição física dos Resíduos Sólidos Comerciais (RSC) do município de Itajubá – MG.....	91
Figura 15 – a) Curva de vazão do metano; b) Curva de duração da vazão do metano.	101
Figura 16 – Curva de energia.....	102
Figura 17 – Demonstração da energia gerada por uma determinada potência do aterro.....	102
Figura 18 – Curva da energia média gerada em função da potência instalada na central.	103
Figura 19 – Exemplificação do fluxo de caixa.	104
Figura 20 – Projeções populacionais dos municípios do CIMASAS.	105
Figura 21 – Gráfico das Projeções populacionais dos municípios do CIMASAS. ...	106
Figura 22 – Participação dos Municípios por número de habitantes no CIMASAS.	108

Figura 23 – Projeção Populacional total do CIMASAS.....	109
Figura 24 – Geração de RSU por município/dia.....	111
Figura 25 – Geração diária de RSU total do CIMASAS.	112
Figura 26 – Emissão de CH ₄ referente a massa de RSU depositada no primeiro ano do aterro.....	113
Figura 27 – Somatório das emissões de CH ₄ ao longo da vida útil do aterro segundo o modelo do Banco Mundial.	114
Figura 28 – Emissões de CH ₄ ao longo da vida útil do aterro segundo o LandGEM.....	114
Figura 29 – Quantidade de RSU depositado no aterro durante o período de atividade, utilizado como base de calculo no software Biogás.....	115
Figura 30 – Emissão de CH ₄ segundo o software Biogás.....	116
Figura 31 – Comparação entre os modelos de emissão de metano.	117
Figura 32 – Energia produzida a partir do CH ₄ gerado pelo aterro ao longo de sua vida útil.....	118
Figura 33 – Potência produzida a partir da energia gerada pelo aterro ao longo de sua vida útil.	118
Figura 34 – Frequência da potência a ser gerada pelo o aterro.....	119
Figura 35 – Capacidade instalada pela energia gerada. Determinação da potência da central termoelétrica.....	120
Figura 36 – Curva que correlaciona o preço do grupo gerador com a potência.....	121
Figura 37 – VPL em função da potência instalada.....	127
Figura 38 – TIR em função da potência instalada.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Destino final dos resíduos sólidos urbanos, por unidades de destino dos resíduos no Brasil, 1989 – 2008.	37
Tabela 2 – Fatores que influenciam nas características dos RSU.	44
Tabela 3 – Composição do Biogás.....	54
Tabela 4 – Distribuição percentual típico do biogás durante os primeiros 48 meses em aterros sanitários.	55
Tabela 5 – Concentrações inibitórias dos metais pesados na digestão anaeróbia. ...	59
Tabela 6 – Valores para k sugeridos correspondentes à precipitação anual.	61
Tabela 7 – Valores L_0 sugeridos para o conteúdo do lixo orgânico.	61
Tabela 8 – Parametros para cálculo de emissão de biogás do LandGEM.	63
Tabela 9 – Classificação dos locais de disposição final e seus respectivos fatores de correção de Metano.	65
Tabela 10 – Valores recomendados para o COD nos principais tipos de resíduos. .	65
Tabela 11 – Comparação das tecnologias de geração de energia.	76
Tabela 12 – PCI de alguns materiais presentes nos RSU.	78
Tabela 13 – Incineradores no Mundo.....	79
Tabela 14 – Alguns Incineradores no mundo com aproveitamento energético.	81
Tabela 15 – Comparação das tecnologias de tratamento térmicos dos RS.....	85
Tabela 16 – População total do CIMASAS em 2010 e sua distribuição por domicílios.	89
Tabela 17 – População total do CIMASAS em 2010 e sua distribuição por sexo.	89
Tabela 18 – Quantidade de RSU gerados no CIMASAS no ano de 2000.....	90
Tabela 19 – Dados do Censo demográfico de 2000, 2010 e Contagem Populacional de 2007 dos municípios do CIMASAS.	96
Tabela 20 – Projeção Populacional. Método com bases em fórmulas matemáticas.	96
Tabela 21 – Geração de RSU per capita do CIMASAS ano de 2000.....	98
Tabela 22 – Taxa de geração de RSU per capita do CIMASAS atual (admitido).....	98
Tabela 23 – Parametros para calculo de geração de energia.....	101
Tabela 24 – Projeção Populacional do CIMASAS.....	107
Tabela 25 – PIB per capita a preços correntes e IDH dos municípios.	109

Tabela 26 – Análise do máximo benefício líquido, da viabilidade e da atratividade do aterro do CIMASAS, considerando a tarifa de venda de energia com sendo R\$ 115,00/MWh.....	125
Tabela 27 – Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL) do empreendimento.	126
Tabela 28 – Cálculo da produção de energia a partir da estimativa da geração de metano segundo o LandGEM.....	156
Tabela 29 – Cálculo da produção de energia a partir da estimativa da geração de metano segundo o LandGEM.....	157
Tabela 30 – Cálculo da produção de energia a partir da estimativa da geração de metano segundo o LandGEM.....	158
Tabela 31 – Cálculo da produção de energia a partir da estimativa da geração de metano segundo o LandGEM.....	159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP42 – Compilation of Air Pollutant Emission Factors
ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AOV – Ácidos Orgânicos Voláteis
ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BA – Benefício Anual
BEM – Biomassa, Energia e Materiais
BEN – Balanço Energético Nacional
BM – Banco Mundial
BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento
BRS – Bactérias Redutoras de Sulfato
CA – Custo Anual
CCA – Clean Air Act
CEMIG – Companhia de Energia de Minas Gerais
CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa
CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CIMASAS – Consórcio Intermunicipal da Microregião do Alto Sapucaí para Aterros Sanitários
CNEN – Conselho Nacional de Energia Nuclear
C/N – Relação Carbono/Nitrogênio
COD – Carbono Orgânico Degradável
COD_F – Fração do Carbono Orgânico Degradável Assimilado
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental
CT – Custo Total
CU – Custo Unitário
DA – Digestão Anaeróbia
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DD – Dificilmente Degradável

DQO – Demanda Química de Oxigênio
EIA – Departamento de energia dos Estados Unidos
 E_m – Energia Média
EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
EUA – Estados Unidos da América
FCM – Fator de Correção de Metano
FC – Fator de Capacidade
FD – Facilmente Degradável
FRC – Fator de Recuperação de Capital
GLP – Gás Liquefeito de Petróleo
GEE – Gases do Efeito Estufa
ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade, Brasil
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA – Agência Internacional de Energia
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LANDGEM – Modelo de Emissões de Gás de Aterro
LMOP – Metano de Aterros Programa de Extensão
MBL – Máximo Benefício Líquido
MCI – Motores de Combustão Interna
MD – Moderadamente Degradável
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME – Ministério de Minas e Energia
NBR – Norma Brasileira
ND – Não Degradável
OX – Fator de Oxidação
PCI – Poder Calorífico Inferior
pH – Potencial hidrogeniônico
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
PEBD – Polietileno de Baixa Densidade
PNE – Plano Nacional de Energia

PNDA – Pesquisa Nacional de Amostragem Domiciliar
PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PNRS – Plano Nacional dos Resíduos Sólidos
ppb – Partes por bilhão
ppmv – Partes por milhão em volume
PU – Por unidade
RCC – Resíduos de Construção Civil
RLU – Resíduos de Limpeza Urbana
RI – Resíduos Industriais
RPSB – Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento Básico
RS – Resíduos Sólidos
RSC – Resíduos Sólidos Comerciais
RSD – Resíduos Sólidos Domésticos
RSM – Resíduos Sólidos Municipais
RSR – Resíduos Sólidos Rurais
RSS – Resíduos de Serviços de Saúde
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
RSU_F – Fração dos Resíduos Sólidos Urbanos que são depositados em aterros
RST – Resíduos de Serviços de Transporte
SMA – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNVS – Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente
SV – Sólidos Voláteis
SVB – Sólidos Voláteis Biodegradáveis
SVR – Sólidos Voláteis Refratários
SUASA – Sistema Único de Atenção à Sanidade Agropecuária
TE – Tarifa de venda da Energia
TIR – Taxa Interna de Retorno
VPL – Valor Presente Líquido
UE – União Européia
UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

SUMÁRIO

RESUMO.....	06
ABSTRACT.....	07
LISTA DE FIGURAS.....	08
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	12
SUMÁRIO.....	15
1 – INTRODUÇÃO.....	17
1.1 – Justificativa.....	19
1.2 – Objetivos.....	19
1.3 – Estrutura do trabalho.....	20
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 – Evolução dos Resíduos Sólidos e conceitos.....	22
2.2 – Classificação, Aspectos Institucionais e Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.....	24
2.2.1 – Classificação Geral dos RS.....	24
2.2.2 – Classificação quanto à natureza ou origem dos RS.....	29
2.2.3 – Classificação quanto à responsabilidade pelo gerenciamento dos RS.....	32
2.2.4 – Classificação quanto ao grau de degradabilidade dos RS.....	32
2.2.5 – Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	33
2.3 – Fatores que influenciam na geração dos RSU e em suas características.....	40
2.3.1 – Fatores que influenciam na geração dos RSU.....	41
2.3.2 – Fatores que influenciam nas características dos RSU.....	44
2.4 – Caracterização dos RS.....	46
2.4.1 – Características físicas.....	46
2.4.2 – Características químicas.....	47
2.4.3 – Características biológicas.....	48
2.5 – Biodegradação dos RSU em aterros sanitários.....	48
2.5.1 – Microbiologia da Digestão Anaeróbia.....	51
2.5.2 – Geração do biogás em Aterros Sanitários.....	54
2.5.3 – Fatores que influenciam na geração do biogás.....	56
2.6 – Modelos de estimativa de geração de biogás.....	59
2.6.1 – Modelo Scholl Canyon (Banco Mundial).....	60
2.6.2 – LandGEM (Versão 3.02).....	62
2.6.3 – IPCC.....	64
2.6.4 – Biogás da CETESB.....	68
2.7 – Aproveitamento energético dos RSU.....	69
2.7.1 – Aproveitamento energético em aterros sanitários.....	70
2.7.2 – Tratamentos térmico para RSU.....	78

2.7.3 – Tecnologia BEM.....	86
3 – ESTUDO DE CASO.....	88
3.1 – CIMASAS.....	88
3.2 – População e geração de RSU nos municípios do CIMASAS.....	88
3.3 – Caracterização do Aterro Sanitário do CIMASAS.....	92
4 – DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO.....	94
4.1 – Tratamento dos dados.....	94
4.2 – Estimativa da população do CIMASAS.....	95
4.3 – Estimativa de geração de RSU no CIMASAS.....	97
4.4 – Modelos de estimativa de geração de biogás.....	99
4.5 – Dimensionamento da energia gerada.....	100
4.6 – Dimensionamento da Potência Ótima.....	101
4.7 – Análise Econômica.....	103
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	105
5.1 – Estimativa da população do CIMASAS.....	105
5.2 – Estimativa de geração de RSU no CIMASAS.....	109
5.3 – Modelos de geração de biogás.....	112
5.3.1 – Banco Mundial.....	112
5.3.2 – LandGEM.....	114
5.3.3 – Biogás da CETESB.....	115
5.4 – Comparação dos resultados dos modelos de emissão de metano....	116
5.5 – Dimensionamento de energia.....	117
5.6 – Determinação do ponto ótimo para a central termoeletrica.....	119
5.7 – Máximo Benefício Líquido.....	121
5.7.1 – Custo unitário.....	121
5.7.2 – Custo total.....	122
5.7.3 – Custo anual.....	122
5.7.4 – Benefício anual.....	122
5.7.5 – Benefício líquido.....	123
5.7.6 – Critério de motorização.....	123
6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	129
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
ANEXO A – <i>Projeção Populacional do Município de Delfim Moreira</i>	141
ANEXO B – <i>Projeção Populacional do Município de Piranguçu</i>	143
ANEXO C – <i>Projeção Populacional do Município de Piranguinho</i>	145
ANEXO D – <i>Projeção Populacional do Município de São José do Alegre</i>	147
ANEXO E – <i>Projeção Populacional do Município de Wenceslau Braz</i>	149
ANEXO F – <i>Projeções populacionais para o município de Itajubá</i>	151
ANEXO G – <i>Tabela 28 – Cálculo da produção de energia a partir da estimativa da geração de metano segundo o LandGEM</i>	153
ANEXO H – <i>Tabela 29 – Análise econômica</i>	158

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da história da humanidade a energia sempre esteve presente na vida dos homens, ora auxiliando ora modificando, enfim, transformando o cotidiano da sociedade. Ela é um dos pilares da sociedade moderna e de caráter essencial para seu desenvolvimento. No entanto, o desenvolvimento econômico e o padrão consumista da sociedade geram a necessidade de um abastecimento adequado e confiável de energia, além de problemas ambientais. Por isso, os países devem procurar incrementar suas matrizes energéticas a fim de suprir suas demandas. Contudo, a geração de energia deve procurar ser sustentável tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

Neste contexto, uma das alternativas de geração de energia é a utilização da Biomassa. Segundo o BNDES (2008), biomassa pode ser entendida como todos os recursos naturais que dispõem de bioenergia¹, ou seja, toda a matéria vegetal gerada por meio de fotossíntese e seus derivados. A energia de biomassa é derivada de matéria viva, como os grãos, as árvores e as plantas aquáticas, além de ser encontrada nos resíduos agrícolas, florestais e sólidos municipais. Entre as possibilidades para a geração de energia com a biomassa, destaca-se a utilização do gás de aterro produzido a partir da degradação da matéria orgânica contida nos resíduos sólidos urbanos (RSU).

Assim como no Mundo, no Brasil, a geração e a disposição final dos Resíduos Sólidos (RS) é um dos graves problemas ambientais enfrentado pelas cidades. Segundo a Pesquisa Nacional do Saneamento Básico (PNSB) de 2008, o Brasil gerou diariamente 259.547 toneladas de resíduos sólidos urbanos e domiciliares. Deste total gerado, 167.636 toneladas foram dispostas em aterros sanitários (IBGE, 2010b), ou seja, mais de 50% dos RSU teve uma destinação ambientalmente adequada.

A geração de energia em aterros sanitários torna-se um empreendimento atrativo, pois ao mesmo tempo em que se dá uma destinação adequada aos resíduos por não terem mais valor para a sociedade, utiliza o produto desta decomposição, o biogás, para geração de energia. Além do mais, a emissão

¹Bioenergia: toda e qualquer forma de energia associada à energia química acumulada mediante processos fotossintéticos recentes.

descontrolada do biogás pode ser uma ameaça ao meio ambiente, causando danos à vegetação, gerando odores desagradáveis e oferecendo risco de explosão em concentrações elevadas. Pois o biogás é composto por basicamente de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e de outros gases em concentrações menores. O metano e o dióxido de carbono são considerados gases de efeito estufa (GEE); no entanto, o metano tem um potencial de aquecimento global 21 vezes superior ao do dióxido de carbono.

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a concentração de metano na atmosfera aumentou em 1060 ppb (partes por bilhão) desde 1750 (primeira revolução industrial). Esse número representa um aumento de 151% do total de emissões de metano no mundo, contudo, estima-se que mais da metade desta emissão é de origem antropogênica. Os aterros podem produzir de 5 a 20% desse total de metano (IPCC, 2001).

A liberação dos GEE aumenta a cada ano, uma vez que é produzida pela queima de combustíveis fósseis e de florestas, pelo mau uso das técnicas agrícolas e por gases emitidos pelo processo industrial. Em decorrência disso, a temperatura média do planeta Terra pode ter um aumento médio entre 1,4 e 5,8°C durante o período de 1990 a 2100 (IPCC, 2001). Por este motivo, intensificou-se no mundo inteiro, a busca por energias que liberem menos gases nocivos à atmosfera, levando em conta que as atuais formas de produção de energia trazem, quase sempre, um impacto negativo para o meio ambiente.

Os aterros sanitários ainda são empreendimentos caros e complexos para serem geridos por pequenos municípios. Eles são direcionados prioritariamente, às empresas especializadas nos serviços de saneamento urbano, as quais possuem toda a estrutura de coleta, manuseio e disposição dos RSU em locais previamente licenciados para esta atividade. No entanto, uma solução para esta questão é a formação de consórcios intermunicipais, nos quais a responsabilidade do empreendimento é distribuída entre os municípios integrantes.

Em função deste contexto, a captação e utilização do gás produzido em aterro é uma opção atrativa para a redução de GEE. Além disso, o metano possui uma grande energia contida nos seus átomos que faz com que o gás possa ser usado para a produção de energia elétrica através de sua combustão.

1.1 Justificativa

O Consórcio Intermunicipal da Microregião do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário (CIMASAS) está localizado no sul do estado de Minas Gerais e tem como objetivo dar um tratamento e destino final adequado aos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados nos municípios de Delfim Moreira, Itajubá, Piranguinho, Piranguçu, São José Alegre e Wenceslau Braz.

No CIMASAS diariamente são gerados 84 toneladas, aproximadamente, de resíduos sólidos domiciliares (RSD) e comerciais (RSC) (PMI, 2011). Resíduos estes que são alocados em um aterro, descartando qualquer possibilidade de aproveitamento energético.

No entanto, conhecendo-se o potencial de geração de metano da parte orgânica da massa de resíduos depositada no aterro, é possível gerar e quantificar energia. A partir deste ponto, cria-se um valor agregado aos RSU e pode-se efetuar o aproveitamento econômico deste recurso.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste estudo são:

Geral

- Determinar a potência ótima da central termoelétrica a ser instalada no aterro do CIMASAS para efetuar o aproveitamento energético do biogás.

Específicos

- Estimar e analisar a geração de RSU dos municípios integrantes do CIMASAS, considerando-se os aspectos econômicos, demográficos e sociais da região;
- Estimar a quantidade de biogás possível de ser gerado a partir da geração de resíduos do consórcio;
- Comparar os resultados dos diversos modelos de geração de biogás, a fim de determinar qual metodologia se apresenta mais eficaz para o cenário estudado;

- Verificar a viabilidade econômica do empreendimento (aterro) considerando a venda da energia gerada.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- 1°. Estudos preliminares (Levantamento bibliográfico);
- 2°. Coleta de dados;
- 3°. Desenvolvimento da metodologia - Estudo dos modelos de projeção populacional e de geração de biogás;
- 4°. Tratamento e análise estatística dos dados;
- 5°. Análise dos resultados.

A revisão bibliográfica foi construída tendo como base as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), artigos publicados em revistas, anais e meios eletrônicos; dissertações e teses de mestrado e doutorado, nacionais e internacionais; sobre a caracterização e geração dos RSU, alternativas de destinação final e seus problemas, e possibilidades de aproveitamento energético dos mesmos.

A seguir, foram coletados dados da situação atual dos RSU no Brasil e nos municípios que compõem o CIMASAS, no que tange a quantidade diária gerada, e nos aspectos econômicos e sociais da região. Além disso, foram levantados dados demográficos dos municípios para criar projeções populacionais. Foram realizadas análises estatísticas dos dados demográficos e da geração de RS per capita no Microsoft® Excel, bem como foram elaborados gráficos e tabelas para a apresentação dos resultados.

Em uma etapa posterior, foram estudados os diversos modelos de emissão de biogás, e dentre os quais, selecionaram-se aqueles que poderiam ser alimentados com os dados da região estudada. Os resultados dos diversos modelos serviram como base para a construção um cenário de emissão.

Após o processo de análise e comparação dos resultados entre os modelos, que resultou na exclusão daqueles que apresentaram valores extremos, selecionou-

se aquele que apresentou valores de emissão intermediário, a fim de ser utilizado como parâmetro para os estudos de aproveitamento energético.

A partir do dimensionamento da potência elétrica da central térmica, foi possível realizar uma análise econômica com custo e receitas da venda da energia gerada, a fim de verificar a viabilidade econômica do empreendimento do aterro do CIMASAS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Evolução dos Resíduos Sólidos e conceitos

Inicialmente este estudo pretende mostrar a evolução dos RS no tempo, apresentar e discutir as nomenclaturas relacionadas aos mesmos no Brasil. Esta abordagem se faz necessária para o entendimento da dinâmica de geração, transporte, acondicionamento e aproveitamento dos RS.

A transformação da matéria e a produção de resíduos sempre fizeram e fazem parte do cotidiano da humanidade. Historicamente o homem foi inserido na natureza e submetido às suas leis, as quais posteriormente, tentou entendê-las. Neste processo, inconscientemente o homem entendeu uma das leis mais importante da natureza, a lei da conservação das massas ou 1^o primeira lei da termodinâmica. Esta lei postula que em qualquer sistema, físico ou químico, não se pode criar e nem destruir a matéria, apenas é possível modificá-la, transformá-la de uma forma em outra. (BURNS, 2007; BRAGA et al., 2005).

A lei da conservação das massas explica um dos grandes problemas com o qual a humanidade se depara atualmente: a geração de RS, e por consequência a poluição ambiental, compreendendo água, solo e ar. O fato de não ser possível consumir a matéria até sua aniquilação implica a geração de resíduos em todas as atividades dos seres vivos, resíduos estes indesejáveis pela sociedade, mas que em alguns casos podem ser reincorporados ao meio, para posteriormente, serem reutilizados (BRAGA et al., 2005).

No princípio, os resíduos produzidos eram basicamente excrementos. No entanto, a partir do momento em que o homem passou de coletor² para agricultor e produtor de suas ferramentas de trabalho, surgiram os restos da produção e os próprios objetos, após sua utilização. Como os materiais utilizados eram em grande parte de origem natural, seu descarte na natureza não causava grandes impactos ambientais. Além disso, o crescimento demográfico e a densidade populacional eram praticamente inexpressivas comparadas com a atual (BIDONE & POVINELLI, 1999).

² Atividade em que o homem somente se alimentava dos alimentos disponíveis na natureza, desconhecendo a agricultura.

A evolução da população e a forte industrialização ocorrida no século passado e neste, determinam o crescimento vertiginoso de resíduos das mais diversas naturezas, biodegradáveis, não-biodegradáveis, recalcitrantes ou xenobióticos, que determinaram um processo contínuo de deterioração ambiental, com sérias implicações na qualidade de vida do homem. Enquanto em um passado não muito distante, a produção de resíduos era de algumas dezenas de kg/hab.ano, países altamente industrializados, como os Estados Unidos da América (EUA), produzem atualmente mais de 700 kg/hab.ano. No Brasil, o valor médio verificado nas cidades mais populosas é da ordem de 180 kg/hab.ano (BIDONE & POVINELLI, 1999).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas por meio da NBR 10.004 (Resíduos Sólidos – Classificação), de 2004 (ABNT, 2004a), e o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por meio de sua resolução nº 005 de 1993 (CONAMA, 1993) definem resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido³ que resultam de atividades da comunidade 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 seu lançamento na rede pública ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível" (ABNT, 2004a; CONAMA, 1993).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), recentemente instituída pela Lei nº 12.305/2010 em seu Capítulo III, artigo 3º e inciso XVI complementou a definição anterior de resíduos sólidos da seguinte forma (BRASIL, 2010a):

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

³Todos aqueles com teor de umidade inferior a 85%;

Para Cassini (2003), os RS por serem originados das mais variadas atividades humanas, apresentam grande diversidade. São constituídos basicamente por matéria orgânica degradável, papel/papelão, podas de árvores e gramados, plástico, vidro, material metálico ferroso e não-ferroso, ossos e demais tipos de resíduos, muitas vezes denominados de material inerte. Pode-se afirmar que a origem e características dos resíduos estão condicionados a uma série de fatores, desde as condições climáticas da região, que influenciam diretamente na qualidade e quantidade dos RS, até a densidade populacional e suas condições socioeconômicas. Por exemplo, o poder aquisitivo da população pode ser um dos fatores que determinam a composição gravimétrica dos RSU, bem como sua produção *per capita*.

Sintetizando os conceitos, definições e explicações apresentados, pode-se entender que os RS são todos os resíduos, restos de materiais provenientes das mais diversas atividades humanas, considerados pelos seus geradores, como desnecessários, indesejáveis, e por esta razão, descartáveis. Neste sentido, torna-se fácil compreender a dinâmica dos resíduos sólidos, e a partir deste ponto, pode-se classificá-los a fim de estudar soluções de tratamento e disposição adequadas, tanto do aspecto ambiental quanto econômico para suas fontes geradoras.

2.2 Classificação, Aspectos Institucionais e Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.

Atualmente, a regulamentação dos RS é exercida em nível nacional, pelo o Ministério do Meio Ambiente por meio do CONAMA e da ABNT, que estabelecem algumas normas e procedimentos a fim de organizar o gerenciamento dos RS no país. É facultado ainda, aos Estados e municípios da união, criar decretos e regulamentos sobre o tema, com o intuito de alcançar os objetivos estabelecidos em nível nacional, ou mesmo ajustá-las as especificações locais (BARTHOLOMEU & CAIXETA-FILHO, 2011).

2.2.1 CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS RS

Dentre as normas da ABNT que versam sobre o tema, destaca-se à NBR 10.004 (ABNT, 2004a) que além de definir, também classifica os RS em categorias (Figura 1) conforme os possíveis riscos ao meio ambiente e a saúde pública. Esta classificação ainda envolve a identificação do processo ou atividade que deu origem ao resíduo, de seus constituintes e características.

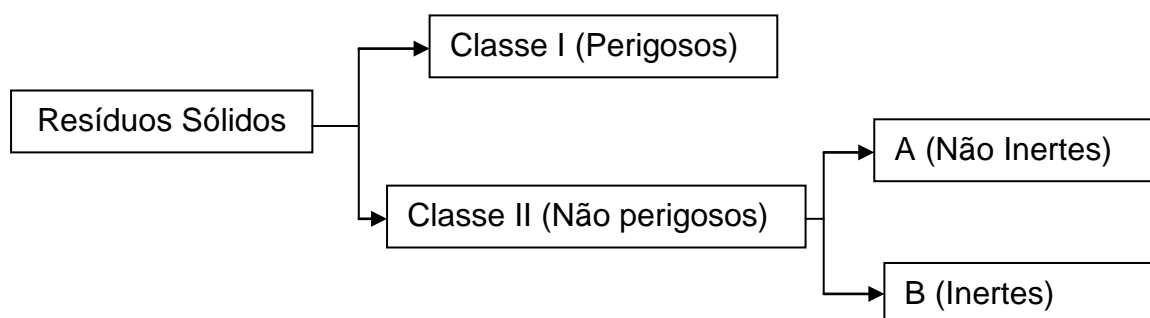


Figura 1 – Classificação dos resíduos sólidos.

Fonte: Baseado na NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

Em relação à classificação dos RS, pode-se encontrar uma pequena divergência na literatura em relação à nomenclatura das classes. Alguns autores como Bidone & Povinelli (1999); Zveibil et al., (2001), nomeiam as classes dos resíduos conforme a ABNT de 1987 (Resíduos Classe I – perigosos; Classe II – não inerte; e Classe III – inertes) (ABNT, 1987). Já outros autores como Bartholomeu & Caixeta-Filho (2011) e no presente trabalho, nomeiam as mesma conforme a ABNT de 2004 (ABNT, 2004a), como apresentado na Figura 1.

Sabe-se que resíduos sólidos não perigosos estão subdivididos em duas classes distintas: Classe II A (Não perigosos e Não inertes) e Classe II B (Não perigosos e inertes).

✓ Resíduos Perigosos

Os resíduos perigosos são aqueles que em suas propriedades físicas, químicas e biológicas e infectocontagiosas apresentam risco à saúde pública (caracterizado pelo o aumento de mortalidade ou morbidade) e risco ao meio

ambiente (quando manuseados de forma inadequada). Caso uma amostra do resíduo seja enquadrada em pelo menos um dos critérios de periculosidade definidas pela NBR 10.004 (inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade) o mesmo será considerado com RS perigosos ou Classe I (ABNT, 2004a).

No entanto, não categorizados em pelo menos um dos critérios de periculosidade citados anteriormente, deverá ser submetido a amostra a ensaios tecnológicos, a fim de analisar as concentrações (em extratos líquidos) de elementos que sejam passíveis de conferir periculosidade, de acordo com os anexos da NBR 10.004 (Ibid.). Para solucionar o esse problema, a ABNT criou e vinculou a NBR 10.004 as normas:

- NBR 10.005 – Lixiviação de resíduos - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de RS realizado a partir do ensaio de Lixiviação (segregação de determinadas substâncias contidas nos RS industriais através de lavagem ou percolação) (ABNT, 2004b);
- NBR 10.006 – Solubilização de resíduos – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de RS, efetivação do Ensaio de Solubilização, visando a tornar uma amostra de um RS solúvel em água e analisar a concentração dos elementos ou materiais contidos no extrato (ABNT, 2004c);
- NBR 10.007 – Estabelece os critérios de coleta e seleção de uma amostra que será considerada como representativa de um todo (ABNT, 2004d).

Dado o exposto, são considerados Classe I – perigosos, aqueles resíduos que como citado anteriormente foram categorizados em um dos critérios de periculosidade; ou cujas amostras submetidas ao teste de lixiviação como descrito na NBR 10.005 apresentaram nos extratos lixiviados concentrações superiores às previstas no Anexo F, da NBR 10.004. No entanto, se as concentrações forem inferiores às especificadas na listagem sete, deverá ser realizado o ensaio de solubilização, conforme estabelecido na NBR 10.006, a fim de determinar se o resíduo é classe II B.

No entanto, não basta saber quem são os resíduos perigosos, é preciso também conhecer quem são os seus geradores a fim de fiscalizá-los e estabelecer

políticas adequadas para eles. Por isto, o Decreto nº 7.404 que regulamenta a PNRS, em seus artigos 64, 65, 66, 68 e 69 define quem são os geradores de resíduos Classe I e quais são suas responsabilidades perante a sociedade brasileira, conforme apresentado a seguir (BRASIL, 2010b):

- São geradores e operadores (tanto empreendimentos como atividades): todos aqueles que em sua atividade ou processo produtivo gere, transporte, armazene, trate, ou comercialize produtos que possam gerar resíduos perigosos e cujo risco seja significativo a critério do órgão ambiental; ou ainda aqueles que exercerem atividades classificadas em normas emitidas pelo Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS) ou Sistema Único de Atenção à Sanidade Agropecuária (SUASA) como geradoras ou operadoras de resíduos perigosos;
- São de responsabilidades desses geradores e operadores: elaborar plano de gerenciamento de resíduos perigosos e submetê-lo aos órgãos competentes (SISNAMA e quando couber, ao SNVS e SUASA) observadas as exigências previstas neste decreto ou em normas técnicas específicas;
- Estes geradores e operadores somente podem operar mediante a autorização e devido licenciamento pelas autoridades competentes, e se, o responsável comprovar, no mínimo, capacidade técnica e econômica, além de condições para prover os cuidados necessários ao gerenciamento desses resíduos;
- As pessoas jurídicas que operam com resíduos perigosos, são obrigadas a se cadastrar no Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos que é de responsabilidade do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Além das responsabilidades estabelecidas pelo o Decreto nº 7.404, a PNRS em seus artigos 30 a 33, estabelece outras como responsabilidade compartilhada e o sistema de logística reversa para os geradores de resíduos perigosos, conforme explicado a seguir. (BRASIL, 2010a).

A responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vidas dos produtos gerados, abrange todos os agentes envolvidos sejam eles: pessoas físicas ou jurídicas; de direito público ou privado; responsáveis de forma direta e indireta (fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços de limpeza pública e de manejo de resíduos sólidos) pela geração ou que desenvolvam atividades relacionadas a gestão dos resíduos perigosos. Dentre os objetivos da responsabilidade compartilhada, no que tange aos resíduos Classe I, destacam-se: reduzir a geração de resíduos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais; incentivar a utilização de insumos de menor agressividade ao meio ambiente e de maior sustentabilidade; e de propiciar que as atividades produtivas alcancem maiores eficiência e sustentabilidade (Ibid.).

São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos RS, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de: agrotóxicos, seus resíduos e embalagens, assim como outros produtos cuja embalagem, após o uso, constitua resíduo perigoso, observadas as regras de gerenciamento de resíduos perigosos previstas em lei ou regulamento, em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa, ou em normas técnicas; pilhas e baterias; pneus; óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; e produtos eletroeletrônicos e seus componentes (Ibid.).

Os geradores e operadores de resíduos perigosos ainda devem: divulgar informações relativas sobre: as formas de evitar, reciclar e eliminar os RS associados a seus respectivos produtos e executar o recolhimento dos produtos e dos resíduos remanescentes após o uso, assim como sua subsequente destinação final ambientalmente adequada.

✓ **Resíduos Classe II A (Não perigosos e Não inertes)**

São aqueles resíduos que não podem ser enquadrados nas classificações de resíduos Classe I - perigosos ou de resíduos Classe II B – inertes. Estes resíduos apresentam propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade, ou solubilidade em água, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente. Estão

incluídos nesta categoria os papéis, papelão, matéria orgânica em geral e outros (ABNT, 2004a). Este resíduos são destinados inadequadamente em lixões, aterros controlados e de modo adequado nos aterros sanitários.

✓ **Resíduos Classe II B (Não perigosos e inertes)**

São aqueles que, por suas características não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, conforme a norma NBR 10.007 (ABNT, 2004d), e submetidos ao teste de solubilização, conforme a norma NBR 10.006 (ABNT, 2004c), não tiveram nenhum dos seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, segundo o Anexo G, da NBR 10.004 (ABNT, 2004a), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor. Caso as concentrações forem superiores às do Anexo G, os resíduos serão considerados classe II A – não inertes. Como exemplo desta classe pode-se citar: as rochas, tijolos, vidro e certos plásticos, pneus e borrachas que não se decompõe facilmente. (ABNT, 2004b; ABNT, 2004d).

✓ **Rejeitos Radioativos**

Os rejeitos radioativos ficam fora desta classificação, pois seu gerenciamento é de competência do Conselho Nacional de Energia Nuclear (CNEN), conforme estabelecido pela Resolução CNEN nº 19 de 1985 (CNEN, 1985).

2.2.2 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À NATUREZA OU ORIGEM DOS RS

A origem é um importante aspecto para a caracterização dos RS. Segundo diversos autores (BRASIL, 2010a; D' ALMEIDA & VILHENA, 2000; BARTHOLOMEU & CAIXETA-FILHO, 2011; BIDONE & POVINELLI, 1999; ZVEIBIL et al., 2001), com relação à origem ou natureza de geração, os resíduos podem ser classificados em:

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) – Estes ainda podem ser subdivididos em: a) resíduos sólidos domésticos (RSD): são aqueles gerados nas atividades diárias dos domicílios, constituídos basicamente por: restos de alimentos, produtos

deteriorados, jornais e revistas, garrafas, papel higiênico, fraldas descartáveis, embalagens em geral e uma grande diversidade de outros itens. Estes resíduos podem conter ainda, alguns materiais considerados tóxicos, tais como pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes, restos de medicamentos etc. No entanto, a fim de resolver esta questão, o estado de São Paulo implementou um programa de responsabilidade pós-consumo para os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes desses tipos de resíduos tóxicos presente no RSD por meio da resolução nº 38 de 2011 da Secretária do Meio Ambiente (SMA) (SMA, 2011); b) resíduos sólidos comerciais (RSC): aqueles gerados em estabelecimentos comerciais, cujas características dependem da atividade ali desenvolvida; e c) resíduos de limpeza urbana (RLU): são aqueles resíduos presentes nos logradouros públicos, em geral resultantes da natureza, tais como folhas, restos de poda, poeira, terra, areia e também aqueles descartados de forma irregular e indevidamente pela população em ocasiões pontuais (eventos culturais, shows, comemorações cívicas e etc.) ou do cotidiano, como entulhos, papéis, embalagens, bens considerados inservíveis entre outros.

Resíduos Industriais (RI) – São os resíduos gerados pelas atividades industriais, muito diversificados, que apresentam características variadas, pois estas dependem do tipo de produto manufaturado. Devem-se, portanto, ser estudados caso a caso. Adota-se a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), para classificar tais resíduos, pois a mesma fornece procedimentos que permitam sua identificação quanto aos possíveis riscos que oferecem ao meio ambiente e à saúde pública.

Resíduos da Construção Civil (RCC) – São aqueles gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis. Em termos quantitativos, esse material corresponde a algo em torno de 50% da quantidade em peso de resíduos sólidos RSU coletados em cidades com mais de 500 mil habitantes de diferentes países, inclusive o Brasil (ZVEIBIL et al., 2001). Em termos de composição, os resíduos da construção civil são uma mistura de materiais inertes, tais como concreto, argamassa, madeira, plásticos, papelão, vidros, metais, cerâmica e terra.

Resíduos de Serviço de Transporte (RST) – Resíduos gerados tanto nos terminais de embarque e desembarque, como dentro dos navios, aviões e veículos de transporte. Os resíduos dos portos e aeroportos são decorrentes do consumo de passageiros em veículos e aeronaves e sua periculosidade está no risco de transmissão de doenças já erradicadas no país. A transmissão também pode se dar por meio de cargas eventualmente contaminadas, tais como animais, carnes e plantas.

Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) – São os RS de hospitais, de clínicas médicas e veterinárias, de centros de saúde, de consultórios odontológicos, farmácias, ou seja, todos os resíduos gerados nas instituições destinadas a preservação da saúde pública.

Resíduos Radioativos – São os resíduos de origem atômica, cujo controle/gerenciamento é de responsabilidade do CNEN, conforme abordado anteriormente.

Resíduos Agrossilvopastoris – São todos os resíduos gerados nas atividades relacionados à agropecuária e a silvicultura, incluídos os insumos utilizados nas mesmas (defensivos agrícolas e suas embalagens). Portanto, o manuseio destes resíduos segue as mesmas rotinas e se utiliza dos mesmos processos empregados para os resíduos Classe I.

Ainda no que se refere à origem dos resíduos, a PNRS além das categorias acima descritas, estabelece outras duas categorias (BRASIL, 2010a). São elas:

Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento Básico (RPSB) – São os gerados nessas atividades, excluídos os RSU.

Resíduos de Mineração – São os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

2.2.3 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À RESPONSABILIDADE PELO GERENCIAMENTO DOS RS

Segundo PNRS (BRASIL, 2010a), os RS podem ser agrupados em duas categorias em relação à responsabilidade pelo gerenciamento. São eles: os RSU, já explicado anteriormente e os Resíduos Especiais, que compreendem basicamente, os resíduos industriais, resíduos da construção civil, radioativos, de portos, aeroportos e terminais rodoferroviários, agrícolas e os RSS.

2.2.4 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO GRAU DE DEGRADABILIDADE DOS RS

Para Bidone & Povinelli (1999), os resíduos ainda podem ser classificados em relação ao seu grau de degradabilidade:

Facilmente degradáveis (FD) – É toda matéria orgânica encontrada nos RSU, como é o caso dos restos de alimentos e podas de plantas.

Moderadamente degradáveis (MD) – São os papeis, papelão e material celulósico.

Difícilmente degradáveis (DD) – São pedaços de tecidos, retalhos, aparas e serragens de couro, borrachas e madeira.

Não-degradáveis (ND) – Incluem-se aqui os vidros, metais, plásticos, pedras, terra entre outros.

Apresentada a classificação quanto à responsabilidade, origem de geração e degradabilidade dos resíduos, a Figura 2, ilustra a classe de resíduos, um dos objetos de estudo do presente trabalho.

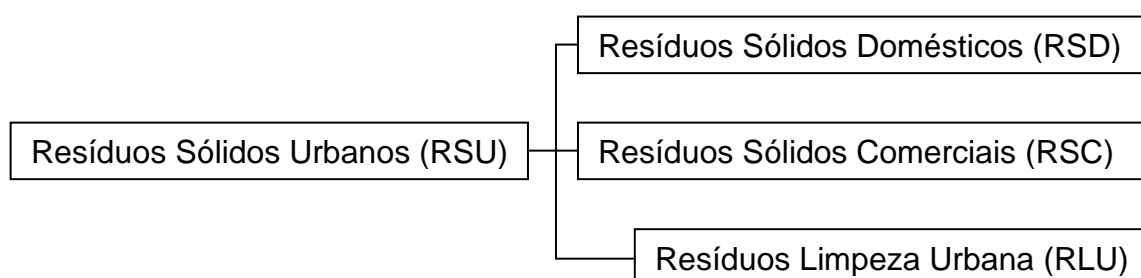


Figura 2 – Subdivisão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

Fica explícito a importância das classificações dos RS na medida em que elas permitem o estabelecimento de rotinas e procedimentos adequados para o correto gerenciamento dos mesmos. É importante salientar que as definições e as classificações variam conforme a literatura e a necessidade de cada região.

2.2.5 PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) geração de RSU no Brasil registrou um crescimento expressivo no ano de 2010, superando a taxa de crescimento populacional urbano que foi de cerca de 1% no período (ABRELPE, 2010). A geração per capita de lixo em nível Nacional, Regional e Estadual (considerando somente o estado de Minas Gerais) aumentou em relação ao ano anterior, conforme apresentado na Figura 3.

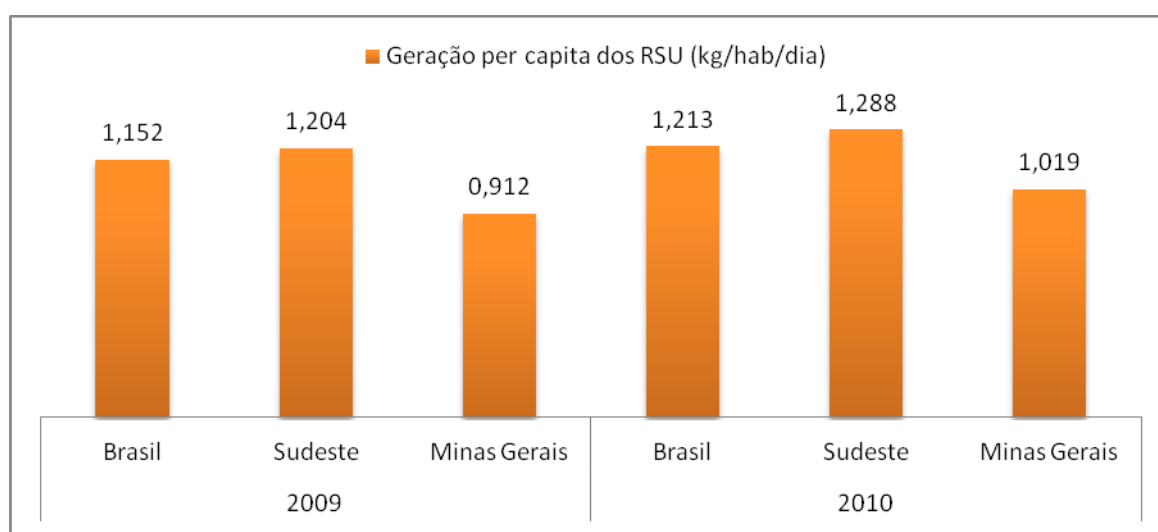


Figura 3 – Geração per capita dos RSU em 2010.

Fonte: ABRELPE (2010; 2011).

No Brasil, constitucionalmente, é de competência do poder público municipal o serviço de manejo dos RSU. O serviço de manejo é composto pelos serviços de coleta, tratamento e disposição final do RSU, além dos serviços de varrição e capina das ruas, poda de árvores, lavagem de ruas após feiras livres e demais atividades necessárias à manutenção da cidade, sob o aspecto de limpeza e organização (ANVISA, 2006; IBGE, 2010b).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) de 2008, dos 5.564 municípios brasileiros, apenas dois não possuem serviço de manejo dos RSU. A grande maioria dos municípios com serviço de manejo possui serviço de coleta do RSU, e na maioria dos casos, a coleta acontece diariamente ou três vezes por semana, independente da região do país (IBGE, 2010b). Para Bartholomeu & Caixeta-Filho (2011), as coletas dos resíduos podem ser:

Regular – É o sistema mais comum e ocorre de porta em porta junto aos domicílios. Os trajetos da coleta, os setores atendidos, e sua frequência são previamente estabelecidos pela administração municipal.

Extraordinária – É o sistema de coleta de caráter esporádico que ocorre apenas quando solicitado pelo poder público.

Especial – É o sistema direcionado aos resíduos especiais, tais como resíduos de serviço de saúde.

Seletiva – É o sistema destinado a coletar os resíduos passíveis de serem reciclados, tais como papel, vidro, plástico e metais.

A coleta regular foi realizada nos bairros e no núcleo urbano em 87% dos municípios brasileiros no ano de 2008 (IBGE, 2010b), conforme apresentado na Figura 4. De 2008 para 2009, houve crescimento de 0,7 ponto percentual na proporção de domicílios atendidos por serviço de coleta dos RSU, alcançando 88% dos domicílios. Todas as regiões do País contribuíram para tal avanço, sendo que as regiões Sudeste e Nordeste apresentaram as maiores contribuições em valores absolutos (IBGE, 2009).

Seguindo esta tendência, a ABRELPE, informou que houve um aumento de 7,7% na quantidade de RSU coletados em 2010, se comparados ao ano anterior (ABRELPE, 2010; 2011). Este fato está relacionado com um discreto aumento verificado na cobertura dos serviços de coleta no mesmo ano. No geral, o serviço de coleta no Brasil tem crescido gradativamente, conforme evidenciado na Figura 5.

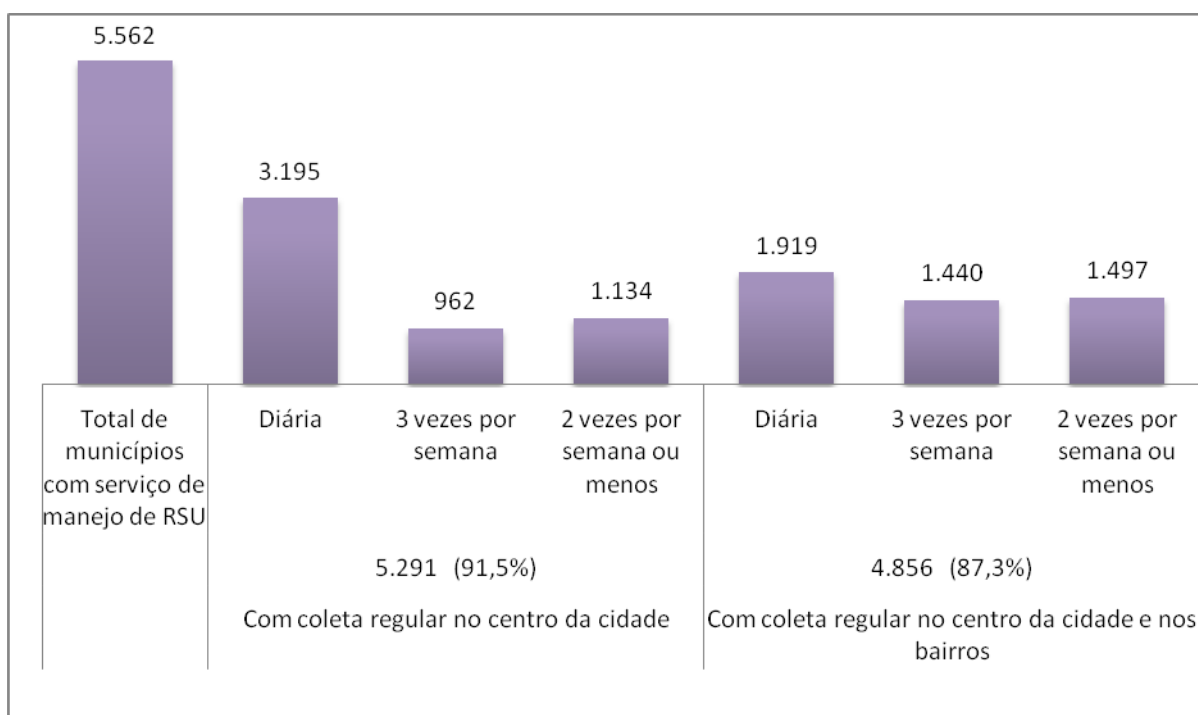


Figura 4 – Municípios brasileiros com serviço de manejo de RSU e frequência do serviço de coleta em 2008.

Fonte: Baseado na PNSB (IBGE, 2010b).

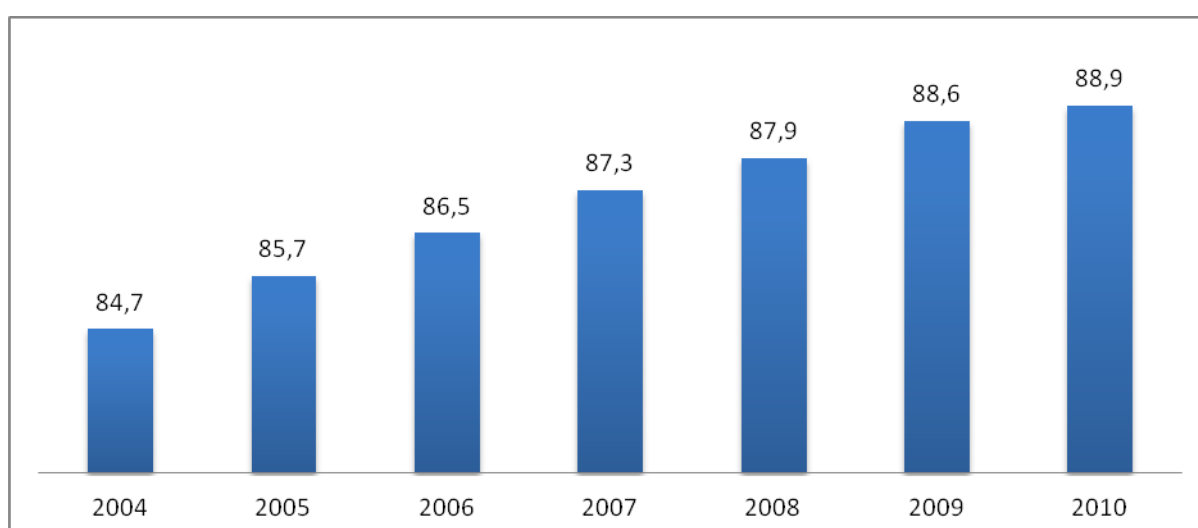


Figura 5 – Evolução do serviço de coleta dos RSU no Brasil (%).

Fonte: Baseado em IBGE (2009) e ABRELPE (2011).

No entanto, mesmo verificado um aumento na oferta de serviço de coleta no país, para a ANVISA (2006), o serviço no país ainda é ineficiente, pois, parte do volume gerado, muito das vezes, permanece junto às habitações, principalmente as de baixa renda, em terrenos baldios, encostas de morros e logradouros públicos.

Em relação à destinação final dos RSU no Brasil, atualmente, existem três formas: lixão ou vazadouro a céu aberto, aterro controlado e aterro sanitário.

Lixão ou vazadouro a céu aberto – Local onde os RSU são descartados diretamente no solo, de forma descontrolada e irregular, podendo ocasionar contaminação do solo, das águas subterrâneas e superficiais através do líquido percolado e dos próprios resíduos. Não existem critérios técnicos para a escolha e operação dessas áreas. Esta forma de disposição favorece a ocorrência de moscas, ratos e baratas, que são vetores de inúmeras doenças, além da atração de abutres (urubus, carcarás etc.). A ausência de controle e a falta de fechamento permitem o livre acesso, sendo comum a presença de animais (porcos, galinhas, cabras, vacas, cavalos etc.), crianças e adultos, que utilizam restos de alimentos para consumo (ANVISA, 2006).

Aterro controlado – É a técnica de disposição dos RSU no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza técnica de recobrimento dos resíduos com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho (ABNT, 1985). No entanto, o recobrimento dos resíduos nem sempre ocorre com a mesma frequência. Apresenta assim, praticamente os mesmos problemas ambientais que os lixões (ANVISA, 2006).

Aterro Sanitário – Um aterro sanitário pode ser definido como local ambientalmente adequado para o tratamento/disposição final de RSU. Utiliza-se de princípios e critérios de engenharia para confinar, de forma segura, os resíduos em um menor volume possível, recobrando o mesmo com uma camada de argila compactada, ao final de cada jornada de trabalho ou, a intervalos menores se necessário, a fim de

evitar a proliferação de vetores de doença e impactos ao meio ambiente (ABNT, 1992; 1997).

Entre os possíveis impactos ambientais relacionados a instalação e operação dos aterros sanitários destacam-se: emissão de gases com odores desagradáveis e poluentes da atmosfera e a poluição das águas de superfície e subterrâneas pelo lixiviado. A fim de evitar ou minimizar esses problemas alguns cuidados devem ser tomados, como: o estudo prévio da caracterização do local destinado ao aterro sanitário; segregação e análise de RS recebidos; monitoramento e inspeção das instalações; e treinamento de pessoal. Além desses cuidados o aterro ainda deve possuir condições específicas de proteção das águas subterrâneas e superficiais; sistemas de drenagem das águas de chuva; impermeabilização do solo e drenagem e tratamento do líquido percolado, bem como dos gases emitidos (ABNT, 1997). O monitoramento dos recursos hídricos deve ser realizado de forma sistemática e periódica, por meio de análises de amostras das águas (superficiais ou subterrâneas), realizadas por agências ambientais, a fim de comprovar sua qualidade ambiental (AZEVEDO & LANDIM, 2008).

Em relação à realidade de disposição final dos RSU, os Lixões constituíram solução de destinação final, em 50% dos municípios brasileiros no ano de 2008, sendo preponderante sobre as demais formas de disposição conforme apresentado na Tabela 1. Tal situação se configura como um cenário de destinação inadequado, que exige soluções urgentes e estruturais para o setor. Contudo, estas soluções certamente irão requerer mudanças de ordem social, econômica e cultural da sociedade (IBGE, 2010b). Ao contrário da situação brasileira, nos EUA no ano de 2000, estima-se que 75% dos RSM foram depositados em 500 grandes aterros sanitários (EPA, 2000).

Tabela 1 – Destino final dos resíduos sólidos urbanos, por unidades de destino dos resíduos no Brasil, 1989 – 2008.

Ano	Vazadouro a céu aberto (lixão)	Aterro controlado	Aterro Sanitário
1989	88,2%	9,6%	1,1%
2000	72,3%	22,3%	17,3%

2008	50,8%	22,5%	27,7%
-------------	-------	-------	-------

Fonte: PNSB (IBGE, 2010b).

No entanto, analisando quantidade diária de RSU recebidos (t/dia) pelas unidades de destinação final do País, é possível avaliar este cenário sobre outro aspecto. Segundo a PNSB de 2008, das 259.000 (t/dia) de RSU coletados, 167.000 foram destinados a aterros sanitários (IBGE, 2010b). Embora os aterros sanitários não sejam realidade na maioria dos municípios brasileiros, eles são responsáveis pelo recebimento de mais de 60% dos RSU coletados no País, conforme evidenciado na Figura 6. Em contra partida, os lixões que estão presentes em 50% dos municípios, recebem apenas 17% do volume total dos resíduos coletados.

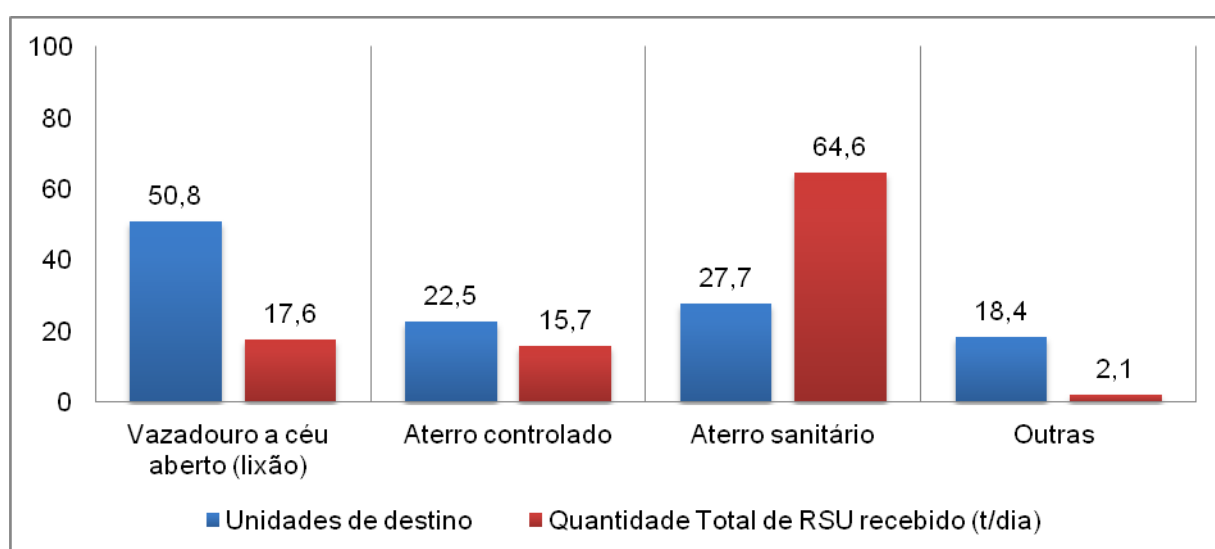
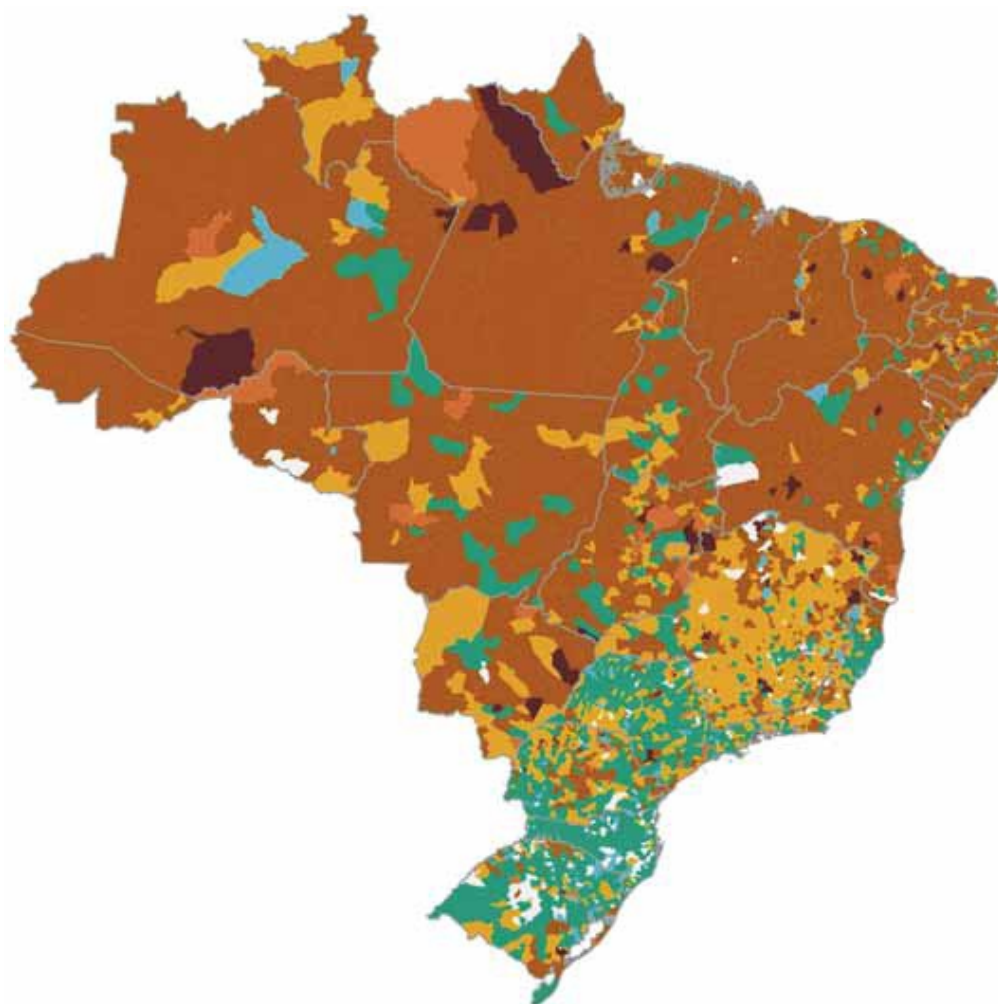


Figura 6 – Quantidade diária total de RSU recebidos por unidades de destinação final (%) no Brasil em 2008.

Fonte: PNSB (IBGE, 2010b).

Nos últimos 20 anos, observou-se uma alteração, no cenário de destinação final dos RSU (Tabela 1), sobretudo nas Regiões Sudeste e Sul do País. A Figura 7, ilustra a distribuição geográfica dos locais de destinação final utilizado no país. A partir dela é possível verificar que uma grande parte dos lixões está localizada nas Regiões Norte e Nordeste do País. Os municípios desses estados registraram as maiores proporções de destinação em lixões – 89,3% e 85,5%, respectivamente –

enquanto os localizados nas Regiões Sul e Sudeste apresentaram, no outro extremo, as menores proporções – 15,8% e 18,7%, respectivamente (Ibid.).



Destinação final dos resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos

- Aterro controlado e aterro sanitário
- Aterro sanitário
- Aterro controlado
- Vazadouro a céu aberto (lixão) e aterro sanitário
- Vazadouro a céu aberto (lixão) e aterro controlado
- Vazadouro a céu aberto (lixão), aterro controlado e aterro sanitário
- Vazadouro a céu aberto (lixão)

Figura 7 – Municípios, segundo a destinação final dos resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos no Brasil – 2008.

Fonte: PNSB (IBGE, 2010b).

A ABRELPE confirmou a realidade de destinação final dos resíduos apresenta pela PNSB de 2008, mostrando que a região Sudeste permanece como a região com o maior índice de disposição final dos RSU em aterros sanitários em relação às demais no ano de 2010 (Figura 8). No geral, a destinação final dos RSU coletados, foi classificada, como adequada. Contudo, a quantidade de RS destinado inadequadamente atingiu quase a casa dos 23 milhões de toneladas, ou seja, quase 23 milhões de RSU foram alocados para lixões ou aterros controlados, trazendo consideráveis danos ao meio ambiente (ABRELPE, 2010; 2011).

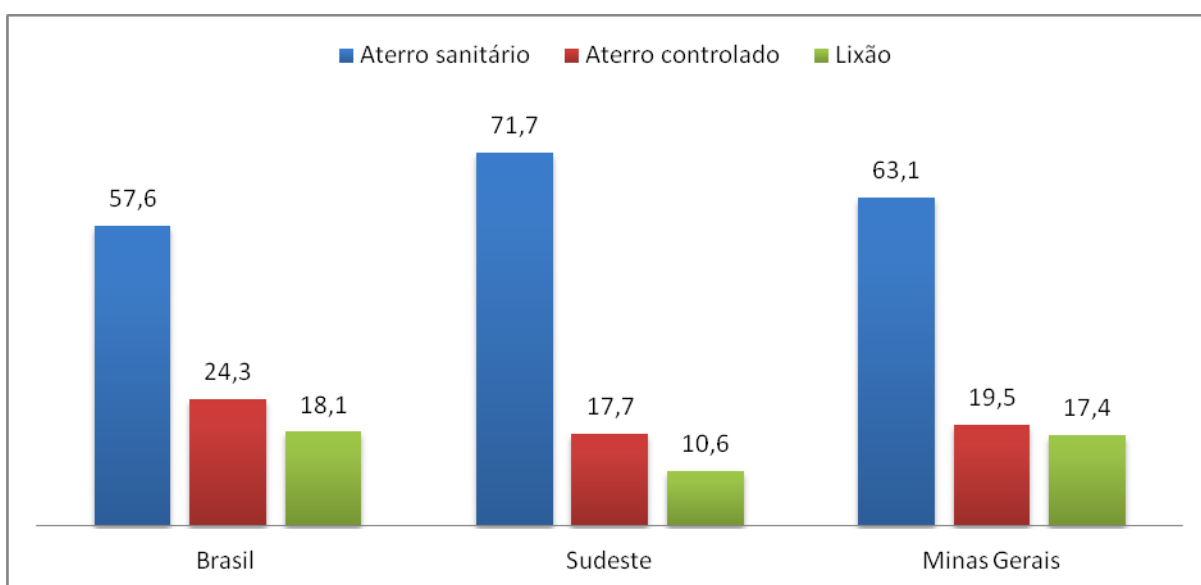


Figura 8 – Destinação final dos RSU coletados no Brasil em 2010 (%).

Fonte: ABRELPE, 2010.

Neste contexto, a realidade brasileira de manejo dos RSU aparenta estar progredindo, pois se verifica que em média, 60% dos RSU coletados têm uma destinação final adequada e que os serviços de coleta estão aumentando tanto em número de municípios, quanto na área de abrangência do serviço dentro dos municípios que já os possuem.

2.3 Fatores que influenciam na geração dos RSU e em suas características

Entre os diversos fatores que influenciam na geração e nas características dos RSU, destacam-se o aspecto econômico, demográfico e cultural da região.

O desenvolvimento econômico de uma região é fator determinante na geração, pois em períodos de recessão econômica, a quantidade de resíduos coletados tende a diminuir em função do aumento da reutilização e decréscimo na geração. Além disso, a composição dos RSU também é influenciada pelo nível econômico, bem como pelos aspectos sociais e culturais da população. No Brasil a composição gravimétrica típica dos resíduos (base úmida) varia de 45% a 60% de matéria orgânica; de 12% à 23% de papel/papelão; de 6,5% à 20% de plásticos e de 1,1% à 3,9% de vidros (MACIEL & JUCÁ, 2011).

A geração de resíduos também depende de outros fatores como: tecnológicos, climáticos, sazonais e de hábitos de consumo. Todos esses fatores estão relacionados com a manutenção da vida da população (BRAGA et al., 2005). No entanto, o hábito de consumo de uma população, é o único que pode ser alterado mediante a conscientização, que é realizada por meio da Educação Ambiental.

É interessante notar que nos países desenvolvidos, a geração de resíduos passíveis de reciclagem é maior que nos países em desenvolvimento, e o desperdício é menor possível. Isso se evidencia, por exemplo, quando se compara o percentual de matéria orgânica disposta nos RSU no Brasil, com a do Japão. No primeiro caso, o índice chega a 50%, enquanto no segundo é de apenas 20% (BIDONE & POVINELLI, 1999).

A geração per capita de RSU nos EUA é de 1,19 t/ano. Esse valor é duas vezes maior que a geração total (ou seja, antes de qualquer reciclagem) de RSU per capita nos países ricos da União Européia (UE) e no Japão, e quase três vezes maior que a geração de resíduos brasileira. Isto é esperado porque o consumo de materiais e combustíveis fósseis dos EUA, com 5% da população mundial, representa 20-25% do consumo total global (ABRELPE, 2011; THEMELIS & ULLOA, 2006).

2.3.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA GERAÇÃO DOS RSU

Segundo Franklin (2002), nos EUA a geração dos RSU tem aumentado, tanto em peso quanto na geração per capita. No entanto, isto não significa que a geração

de cada material e produto dos RSU têm crescido no mesmo ritmo. De fato, a geração de alguns materiais e produtos tem crescido rapidamente, enquanto outros tiveram crescimento lento ou uma diminuição. A compreensão deste fenômeno é de importância para a construção de projeções de geração dos RSU e no planejamento de instalações de gestão dos mesmos. Para a autora (Ibid.) os fatores que tendem a aumentar a geração de resíduos sólidos urbanos são:

Crescimento populacional – Obviamente, quanto maior a população de um local, mais resíduos serão produzidos e descartados. Uma análise preliminar indica que cerca de metade do crescimento da geração de RSU nos EUA, ao longo de um período de um quinze anos (1980-1995), deve-se ao crescimento da população (FRANKLIN ASSOCIATES, 1992 apud FRANKLIN, 2002).

Aumento do nível de riqueza – Existe uma correlação bastante forte entre a atividade econômica e a geração de RSU, que pode ser medida pelo produto interno bruto (PIB) ou gastos com consumo pessoal do país. Nos EUA, a geração de papel, papelão é extremamente sensível à atividade econômica. Por exemplo, nos anos em que a atividade econômica apresentou quedas (recessão), houve a diminuição na produção de papeis, caixas de papelão e de embalagens em geral. As razões são óbvias: quando as encomendas diminuem, menos caixas e outras embalagens são utilizadas (FRANKLIN, 2002).

Mudanças no estilo de vida – Mudanças no estilo de vida são ligeiramente relacionados com a riqueza. Os Estados Unidos tem um número crescente de indivíduos que vivem sozinhos e de famílias com dois assalariados. Pessoas nestas condições tendem a comprar mais alimentos pré-embalados e comer mais, muitas vezes em *fast-food*, estabelecimentos estes que utilizam embalagens descartáveis. Eles também podem fazer mais compras através de catálogos, o que aumenta a quantidade de correspondência recebida e descartada em casa. Além disso, cada nova família, ainda que pequena, deve possuir eletrodomésticos e mobiliários. A explosão de informações e de oportunidades de compras através de comunicações on-line está causando mudanças na geração de resíduos que ainda não são totalmente compreendidos. Por exemplo, leitores de jornais estão em declínio, em contrapartida, pessoas com computadores em casa podem gerar mais papeis de

escritório com impressão de informação e comunicações por correio eletrônico (FRANKLIN, 2002).

Mudanças nos padrões de trabalho – Nos EUA, o número de trabalhadores em escritório aumentou 72% nos últimos quinze anos, enquanto trabalhadores na indústria diminuíram. Ao mesmo tempo, os escritórios adquiriram mais computadores de alta velocidade, copiadoras e aparelhos de fax, resultando em um aumento na geração de resíduos de escritório (FRANKLIN, 2002).

Novos produtos – Novos produtos podem aumentar as quantidades de RSU gerados. Um exemplo desse fenômeno são as fraldas descartáveis (Ibid.).

Para a autora (FRANKLIN, 2002) embora o aumento na geração dos RSU venha sendo o padrão global existe alguns fatores tendem a diminuir a geração. Entre eles, incluem-se:

Redesenho dos produtos – Atualmente, alguns produtos encontrados nos RSU vêm se tornando mais leves em virtude do surgimento de projetos mais sofisticados, eficientes e por mudanças na forma de sua construção. Por exemplo, as geladeiras tornaram-se mais leves devido às mudanças no isolamento e no uso de mais plásticos mais leves. Outro exemplo são os pneus de borracha, que não só diminuíram de tamanho como também passaram a durar mais. Os papéis utilizados para publicação de jornais também se tornaram mais leve, em alguns casos, o tamanho da página foi diminuído. Além disso, muitos tipos de embalagem foram se tornando mais leves ao longo dos anos, no intuito de economizar com os custos de transporte (Ibid.).

Substituição de Materiais – Especialmente nas embalagens, houve uma tendência de substituição por materiais mais leves. Nas embalagens de bebidas, por exemplo, as latas de aço, foram substituídas por latas de alumínio, as garrafas de vidro foram substituídas por garrafas de plásticos. Isto reflete na diminuição da produção de embalagens de aço e de vidro, enquanto a geração de embalagens de alumínio e plástico aumenta. Os sacos de papéis, também foram substituídos por plásticos em muitas aplicações. Por exemplo, apesar de geração de embalagens de papel ter

crescido no geral, a geração de sacos de papel diminuiu. A queda se deve principalmente pelo aumento do uso de sacolas plásticas, que são muito mais leves.

Devido ao agravamento das questões ambientais atualmente, observa-se novamente a substituição embalagens de bebidas. As empresas estão substituindo as garrafas plásticas por garrafas de vidro, embora as últimas sejam mais pesadas, o impacto delas no meio ambiente é menor (FRANKLIN, 2002).

Tendências na geração de RSU são, portanto, bastante difíceis e complexas de se estimar. Gestores precisam olhar para o que está acontecendo em suas comunidades e em todo o país ao fazer projeções acerca da geração (Ibid.).

2.3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS CARACTERÍSTICAS DOS RSU

Para Zveibil et al. (2001) alguns fatores além de influenciar na geração, também influenciam diretamente nas características físicas, químicas e biológicas dos RSU. Entre estes fatores, destacam-se: os climáticos, sazonais, demográficos e socioeconômicos.

Por isto, é preciso tomar cuidado com valores que traduzem as características dos RSU, principalmente aquelas que informam a cerca das características físicas, pois as mesmas são muito sensíveis a fatores sazonais, que podem conduzir a conclusões equivocadas sobre mesmos.

Tabela 2 – Fatores que influenciam nas características dos RSU.

Fatores	Influência
1. Climáticos	
Chuva	• aumento do teor de umidade;
Outono	• aumento do teor de folhas;
Verão	• aumento do teor de embalagens de bebidas (latas, vidros e plásticos rígidos).
2. Sazonais (feriados)	
Carnaval	• aumento do teor de embalagens de bebidas (latas, vidros e plásticos rígidos);
Natal/Ano Novo/Páscoa	• aumento do teor de embalagens

	(papel/papelão, plásticos maleáveis e metais);
	<ul style="list-style-type: none"> • aumento de matéria orgânica;
Dia dos Pais/Mães	<ul style="list-style-type: none"> • aumento do teor de embalagens (papel/papelão, plásticos maleáveis e metais);
Férias escolares	<ul style="list-style-type: none"> • esvaziamento de áreas da cidade em locais não turísticos; • aumento populacional em locais turísticos.
3. Demográficos	
População urbana	<ul style="list-style-type: none"> • quanto maior a população urbana, maior a geração <i>per capita</i>.
4. Socioenômicos	
Nível cultural	<ul style="list-style-type: none"> • quanto maior o nível cultural, maior a incidência de materiais recicláveis e menor a incidência de matéria orgânica;
Nível educacional	<ul style="list-style-type: none"> • quanto maior o nível educacional, menor a incidência de matéria orgânica;
Poder aquisitivo	<ul style="list-style-type: none"> • quanto maior o poder aquisitivo, maior a incidência de materiais recicláveis e menor a incidência de matéria orgânica;
Poder aquisitivo (no mês)	<ul style="list-style-type: none"> • maior consumo supérfluos perto do recebimento do salário;
Poder aquisitivo (na semana)	<ul style="list-style-type: none"> • maior consumo supérfluos no fim da semana;
Desenvolvimento tecnológico	<ul style="list-style-type: none"> • introdução de materiais cada vez mais leves, reduzindo o valor do peso específico aparente dos resíduos;
Lançamento de novos produtos	<ul style="list-style-type: none"> • aumento de embalagens;
Promoções de lojas comerciais	<ul style="list-style-type: none"> • aumento de embalagens;
Campanhas ambientais	<ul style="list-style-type: none"> • redução de materiais não-biodegradáveis (plásticos) e aumento de materiais recicláveis e/ou biodegradáveis (papeis, metais e vidros).

Fonte: Zveibil et al. (2001).

Observa-se que os fatores apresentados por Zveibil et al. (2001) como fatores que influenciam nas características dos RS, também influenciam na geração dos mesmos. Alguns fatores são os mesmos apresentados por Franklin (2002) no tópico anterior.

2.4 Caracterização dos RS

Para realizar o gerenciamento RS de forma adequada, visando ao aproveitamento energético, faz-se necessário conhecer algumas características dos resíduos, pois a estrutura a ser criada para gerir os RS, muitas das vezes dependerá de algumas características dos resíduos.

2.4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

De acordo com diversos autores (D' ALMEIDA & VILHENA, 2000; BARTHOLOMEU & CAIXETA-FILHO, 2011; BIDONE & POVINELLI, 1999; ZVEIBIL et al., 2001), os RS podem ser caracterizados fisicamente por:

Geração *per capita* – A geração *per capita* relaciona a quantidade de RSU gerada em um determinado período (normalmente dia) com o número de habitante de determinada região. Este indicador é expresso em kg/hab./dia, embora também pode-se encontrar a expressão *per capita* em litros (L/hab./dia). A geração *per capita* é essencial para o planejamento de todo o sistema de tratamento e aproveitamento dos RS, sobretudo para dimensionamento das instalações e equipamentos.

Composição gravimétrica – A composição gravimétrica expressa o percentual de cada componente com relação ao peso total da amostra de RS avaliados. Entre os componentes mais utilizados encontram-se os: metais, vidros, plásticos, matéria orgânica, papel e papelão e outros. A partir dela, é possível verificar o aproveitamento das frações recicláveis para comercialização e da matéria orgânica, para a produção de composto orgânico ou geração de biogás.

Peso específico aparente – Este indicador apresenta o peso do resíduo solto em função de seu volume ocupado livremente, sem qualquer compactação. Sua

determinação é fundamental para o dimensionamento de equipamentos e instalações necessários para a coleta. Ele é expresso em kg/m^3 .

Teor de umidade – Expressa a quantidade de água presente nos RS calculada em percentual do seu peso. Este parâmetro se modifica em função das estações do ano como também da incidência de chuvas, sendo possível estimar um teor de umidade variando entre 40 a 60% (ZVEILBIL et al., 2001). Este indicador tem influência direta sobre a velocidade de decomposição da fração orgânica dos RSU, além de influenciar diretamente no poder calorífico e no peso específico aparente. Também Influência no cálculo da produção de chorume e no dimensionamento do sistema de coleta de percolados em aterros sanitários.

Compressividade – Este indicador mostra o quanto uma massa resíduo pode suportar quando submetido a uma compactação. Submetendo a massa de RSU a uma pressão de 4kg/cm^2 , seu volume pode ser reduzido de um terço ($1/3$) a um quarto ($1/4$) do original. No entanto, a massa de resíduo tende a se expandir quando a força que a compactava se extinguiu, porém, uma vez compactada, seu volume não retornará ao original (Ibid.).

2.4.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

A composição química dos RS está relacionada principalmente, a componentes orgânicos destes, e engloba principalmente a quantificação de parâmetros como carbono, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, zinco, ferro, manganês, sódio, e enxofre, que compõem o elenco básico de macro e micronutrientes, a relação C/N, o pH e as concentrações de sólidos totais, fixos e voláteis. Dentre as características químicas as mais importantes para o aproveitamento energético dos resíduos são: o poder calorífico; potencial hidrogeniônico (pH); composição química e a relação Carbono/Nitrogênio (C:N) (D'ALMEIDA & VILHENA, 2000; BIDONE & POVINELLI, 1999; ZVEIBIL et al.,2001).

Poder calorífico – O poder calorífico apresenta a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor quando submetido à queima. O poder calorífico médio dos resíduos sólidos domiciliares se situa na faixa de 5.000

kcal/kg. (ZVEILBIL et al.,2001). Este indicador é muito útil para o dimensionamento das instalações de todos os processos de tratamento térmico (incineração, pirólise e outros).

Potencial hidrogeniônico (pH) – Indica o teor de acidez ou alcalinidade dos RS. Normalmente, situa-se na entre 5 a 7 (Ibid.). Este fator indica o grau de corrosividade dos resíduos coletados, servindo para estabelecer o tipo de proteção contra a corrosão a ser usado em veículos, equipamentos, contêineres e caçambas metálicas.

Relação Carbono/Nitrogênio (C/N) – Expressa o grau de decomposição da matéria orgânica dos RS nos processos de tratamento e disposição final. Em geral, essa relação situa-se entre 35/1 a 20/1 (Ibid.). Avaliado conjuntamente com a relação Carbono / Nitrogênio e o pH, é significativo para a escolha da forma mais apropriada de tratamento e disposição final.

2.4.3 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS

As características biológicas dos RS são determinadas pela população microbiana e pelos agentes patogênicos presentes nos resíduos. Juntamente com suas características químicas, permitem selecionar os métodos de tratamento e disposição finais mais adequados. Os aspectos microbiológicos dos RS estão, principalmente, relacionados à fração orgânica que os compõem, na medida que a sua reciclagem pode ser realizada através da decomposição biológica, realizada por meio de microrganismos saprófitos ou decompositores naturalmente existentes no meio (ZVEILBIL et al., 2001; O'LEARY& TCHOBANGLIOUS, 2002).

2.5 Biodegradação dos RSU em Aterros Sanitários

Após o descarte dos RSU em aterros sanitários, a fração orgânica começa a sofrer o processo de decomposição ou biodegradação, que compreende em reações químicas e biológicas, resultando na formação de gases, entre eles o metano (CH₄) e líquidos percolados. A biodegradação da matéria orgânica pode acontecer via digestão aeróbia ou anaeróbia. Na primeira hipótese, a decomposição é mais rápida,

já na segunda, o processo é mais demorado e complexo, pois envolve vários microrganismos e gera subprodutos (BARLAZ; SCHAEFER; HAM, 1989).

No ambiente aeróbio a matéria orgânica é mineralizada pelo oxidante em produtos inorgânicos, principalmente a dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). Já em condições anaeróbias os materiais orgânicos sofrem transformações sem, contudo, serem mineralizados. Estas transformações ocorrem por processos alternativos chamados fermentações. Neste caso, formam-se também e, principalmente, CO_2 , H_2 , CH_4 e H_2O (MELO, 2003).

O processo de biodegradação em aterros pode ser explicado em quatro ou cinco fases dependendo da literatura consultada. No entanto, neste estudo adotaram-se cinco fases para explicar tal processo. Segundo os autores (O'LEARY & TCHOBANGLIOUS, 2002 e POHLAND et al., 1993) as cinco fases da degradação são:

Fase I – Ajustamento Inicial – Após a disposição dos RSU no aterro, ocorre aumento da umidade e os componentes orgânicos biodegradáveis começam a sofrer a decomposição bacteriana. Nesta etapa, a decomposição acontece em condições aeróbias, pois ainda existe uma certa quantidade de oxigênio entre a massa residual. Os microrganismos aeróbios degradam a matéria orgânica à dióxido de carbono e água, e as reações químicas produzem calor. No entanto, esta decomposição é responsável apenas por uma pequena parcela da biodegradação. O chorume (líquido percolado) produzido durante esta fase inicial é provavelmente resultado da umidade aterrada com os RS, durante o processo de compactação e construção das células. Essa fase pode durar dias ou meses, dependendo da quantidade de oxigênio presente no resíduo quando depositado no aterro.

Fase II – Fase de transição do meio aeróbio para anaeróbio – Na Fase II, o oxigênio é esgotado e começa a se desenvolver condições anaeróbias. (Figura 9). Nestas condições surgem microrganismos anaeróbios degradadores de macromoléculas. A glicose da primeira fase começa ser metabolizada por esse microrganismos. O aceptor de elétrons muda de oxigênio para nitrato (NO_2) e sulfato (SO_4), com formação de dióxido de carbono. No fim desta fase, concentrações de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Ácidos Orgânicos Voláteis (AOV) podem ser detectadas no chorume.

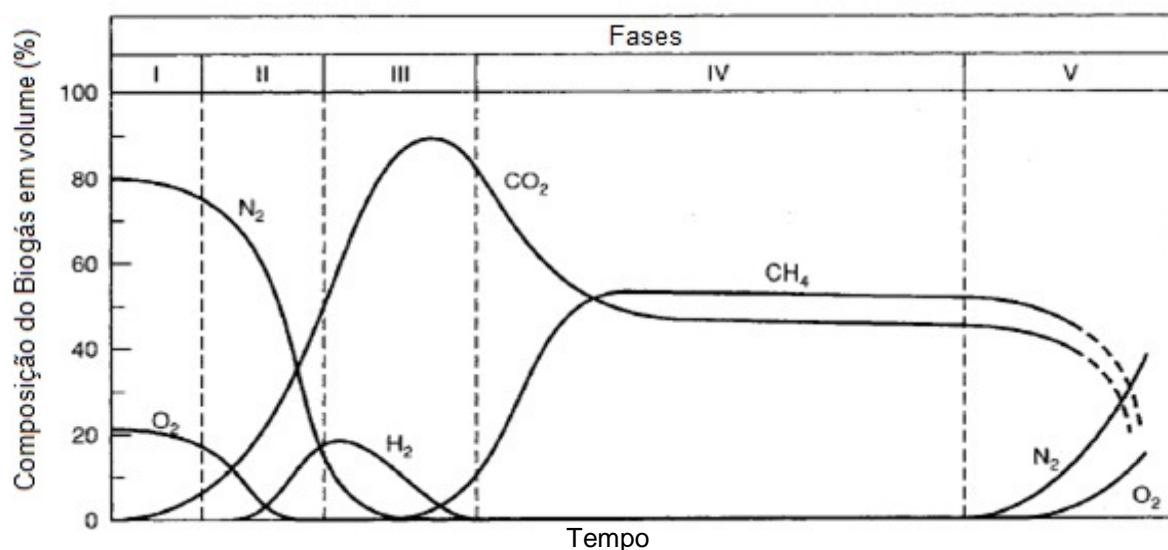


Figura 9 – Variação da composição do biogás em função das fases.

Fonte: Farquhar & Rovers (1973).

Fase III – Fase Ácida – Nesta fase, a atividade bacteriana iniciada na Fase II é acelerada com a produção significativa de ácidos orgânicos voláteis através da hidrólise e fermentação contínua dos constituintes do resíduo e do percolado. O processo de biodegradação desta fase é realizado por uma população mista de bactérias anaeróbias estritas e facultativas. As bactérias anaeróbias facultativas ajudam na quebra de materiais e na redução do potencial *redox* para que as *archaeas* metanogênicas (responsáveis pela geração do metano) possam crescer. Ocorre diminuição de pH com concomitante mobilização e possível complexação dos metais presentes, o que resulta em um chorume agressivo quimicamente. Há a liberação de nutrientes como Nitrogênio (N) e Fósforo (P), que serão usados como suporte para o crescimento da biomassa. As mais altas concentrações de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) ocorrem durante esta fase. As características principais desta fase são o crescimento da biomassa associada a formação de ácidos e o rápido consumo de substratos e nutrientes.

Fase IV – Fermentação Metanogênica – Os produtos intermediários que apareceram na fase de formação dos ácidos são convertidos a CH₄ e CO₂. O pH, que diminuiu em função do aparecimento dos ácidos, retorna à neutralidade e o potencial de oxi-redução apresenta valores muito negativos. Os nutrientes, por sua

vez, continuam a ser consumidos e a ocorrência de complexação e precipitação de metais é contínua. O conteúdo orgânico do percolado diminui com correspondente aumento na produção de gás. Uma pequena porção do lixo contendo compostos orgânicos recalcitrantes não é degradada e permanece no aterro por mais tempo. O pH se torna alcalino, sendo controlado pelo sistema tampão do bicarbonato que consequentemente suporta o crescimento de arqueias metanogênicas.

Fase V – Maturação final – Esta fase ocorre após o material orgânico biodegradável disponível na Fase IV ter sido convertido em CH₄ e CO₂. A taxa de geração de gás de aterro diminui significativamente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foram removidos com o lixiviado durante as fases anteriores e os substratos que restam no aterro são lentamente biodegradados. O chorume permanece com concentrações mais baixas. O oxigênio e espécies oxidativas podem reaparecer vagarosamente. Contudo, a lenta degradação de frações orgânicas resistentes pode continuar com a produção de substâncias húmicas.

2.5.1 MICROBIOLOGIA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia (DA), iniciada na Fase II da biodegradação dos RSU é uma atividade complexa e pode ser considerada um ecossistema no qual diversos grupos de microorganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas (CHERNICHARO, 1997).

O processo de digestão anaeróbia envolve diferentes estágios de interação entre os substratos e os diversos grupos de bactérias. Todos os microorganismos envolvidos na digestão anaeróbia são muito especializados, no entanto, cada grupo atua em reações específicas (CHERNICHARO, 1997; FAO, 1997; BARLAZ; SCHAEFER; HAM, 1989; POHLAND et al.,1993). A DA pode ser dividida em quatro fases principais: hidólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Estas etapas estão exemplificadas na Figura 10 e são discutidas a seguir.

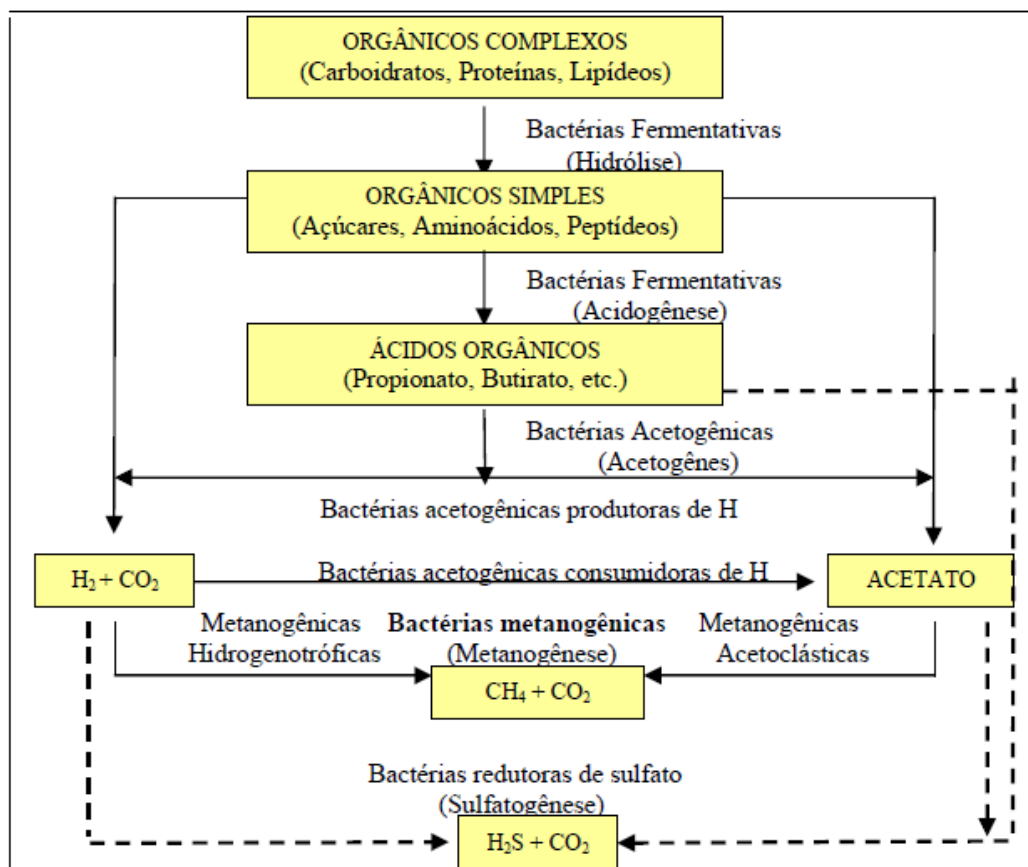


Figura 10 – Sequências das rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.

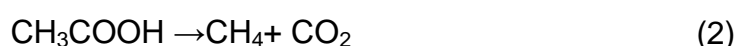
Fonte: Chernicharo (1993).

Hidrólise – Nessa primeira etapa, um primeiro grupo de microrganismos secreta exoenzimas que hidrolisam os materiais orgânicos mais complexos como carboidratos, proteínas e lipídeos, em materiais mais simples (açúcares, aminoácidos e peptídeos). Estes por sua vez, serão consumidos por outro grupo de microrganismos.

Acidogênese – As bactérias **acidogênicas** metabolizam os compostos dissolvidos gerados no processo de hidrólise, convertendo-os em compostos mais simples, como os ácidos graxos voláteis, alcoóis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. Como os principais produtos desta fase são os ácidos graxos voláteis, esta etapa denominada de acidogênese.

Acetogênese – As bactérias acetogênicas fermentam os ácidos voláteis em substrato apropriado para as *arqueas* (bactérias) metanogênicas. Os produtos gerados são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato (CH_3COO^-). Durante a formação dos ácidos acético e propiônico, uma grande quantidade de hidrogênio é formada, fazendo com que o valor do pH caia para valores entre 4 e 6. De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas metanogênicas.

Metanogênese – A etapa final do processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica é realizada pelas *archaeas* metanogênicas, que podem ser divididas em dois grupos principais, conforme sua afinidade com os diferentes substratos. São elas: as *hidrogenotróficas*, que utilizam hidrogênio e dióxido de carbono para a formação de metano, e as *acetoclásticas*, que utilizam ácido acético ou metanol na produção de metano. Segundo Sperling (1996), o primeiro caminho dessa etapa, é o processo oxidativo da metanogênese hidrogenotrófica, no qual o dióxido de carbono atua como acceptor de elétrons, sendo reduzido a metano (equação 1). E o segundo é a da metanogênese acetoclástica, em que o carbono orgânico, na forma de acetato (ácido acético) é convertido a metano (eq. 2).



No entanto, além das fases descritas anteriormente, o processo de digestão anaeróbia pode ainda, incluir outra fase, quando há presença de compostos sulfurosos nos resíduos.

Sulfetogênese – A produção de sulfetos é um processo no qual o sulfato e outros compostos à base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Durante esse processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias redutoras de sulfato (BRS). As BRS são capazes de utilizar ampla variedade de substratos, incluindo toda a cadeia de ácidos graxos voláteis, diversos ácidos aromáticos, hidrogênio, metanol, etanol,

glicerol, açúcares, aminoácidos e vários compostos fenólicos. Dessa forma, as BRS passam a competir com as bactérias fermentativas e acetogênicas e com as arqueas metanogênicas pelos substratos disponíveis (CASSINI, 2003).

Cada uma dessas etapas deve ser mantida em equilíbrio, a fim de que a geração de metano ocorra à taxa máxima. A manutenção deste equilíbrio esta relacionada a natureza do afluyente e à intensidade e disponibilidade do H₂, pois este deve ser continuamente removido para assegurar que a produção de ácido acético não seja diminuída ou interrompida. Esta condição é essencial para que a fermentação metanogênica prevaleça, sendo o H₂ e o ácido acético, os mais importantes, sendo responsáveis por cerca de 70% do gás metano gerado (Ibid.).

2.5.2 GERAÇÃO DO BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS

O Biogás é o nome dado à mistura de gases gerada através dos processos de biodegradação dos RSU nos locais de disposição final, ele é um gás incolor, geralmente inodoro (se não contiver demasiadas impurezas), insolúvel, leve e de fraca densidade. Os principais constituintes do biogás são o gás metano e o dióxido de carbono, além de outros gases em concentrações menores (Tabela 3). Esta composição, no entanto, depende principalmente das características dos RSU e das etapas da decomposição (EIA, 1996; WORLD BANK, 2004).

Tabela 3 – Composição do Biogás.

Componentes	Concentração média (%)
Metano (CH₄)	50
Dióxido de Carbono (CO₂)	45
Nitrogênio (N₂)	5
Sulfeto de Hidrogênio (H₂S)	<1
Outros compostos orgânicos (NMOC)	2.700 ppvm

Fonte: EIA (1996).

A duração das etapas da DA e o tempo de produção de biogás nos aterros variam conforme as condições da região, como por exemplo, a disponibilidade de

nutrientes, a distribuição dos componentes orgânicos no aterro, o conteúdo de umidade dos resíduos e grau inicial de compactação. Conforme apresentado na Tabela 4, geração do biogás cresce rapidamente nos primeiros quatro anos de disposição dos resíduos, atingindo os valores máximos. Após este período, a produção de biogás decresce lentamente até cessar por completo (O'LEARY & TCHOBANGLIOUS, 2002).

Tabela 4 – Distribuição percentual típico do biogás durante os primeiros 48 meses em aterros sanitários.

Intervalo de tempo (meses)	Média em volume (%)		
	Nitrogênio N ₂	Dióxido de Carbono CO ₂	Metano CH ₄
0–3	5,2	88	5
3–6	3,8	76	21
6–12	0,4	65	29
12–18	1,1	52	40
18–24	0,4	53	47
24–30	0,2	52	48
30–36	1,3	46	51
36–42	0,9	50	47
42–48	0,4	51	48

Fonte: Merz & Stone (1970, apud O'LEARY & TCHOBANGLIOUS, 2002).⁴

Como combustível, o principal componente do biogás é o metano. No entanto, a presença de substâncias não combustíveis no biogás, como a água e o gás carbônico, prejudicam o processo de queima, tornando-o menos eficiente, pois absorvem parte da energia gerada. Portanto, quanto maior for seu teor de metano no biogás maior será seu poder calorífico. O poder calorífico inferior (PCI) do biogás

⁴MERZ, R. C.; STONE, R. **Special Studies of a Sanitary Landfill, U.S.** Department of Health Education and Welfare, Washington, DC. 1970.

é de 14,9 a 20,5 MJ/m³ ou aproximadamente, 5.800 kcal/m³, quando a proporção de metano for, aproximadamente de 60% (MULYLAERT et al., 2001).

Além disso, o metano, ao ser objeto de combustão completa, minimiza a poluição atmosférica e conseqüentemente, contribui, para a diminuição do efeito estufa.

Estudos teóricos e experimentais relataram que a biodegradação completa dos RSU pode gerar cerca de 200 m³ de CH₄/t. de biomassa. Teoricamente, assumindo que a quantidade de matéria orgânica seca presente nos RSU seja de 60%, a mesma poderá gerar 208 m³ de CH₄/t. (THEMELIS & ULLOA, 2006). Estudos experimentais realizados em células pilotos de pequeno porte com temperatura e condições ideais para a biodegradação estimaram que a taxa de geração de metano foi de 213 m³/t. seca de biomassa (BARLAZ; SCHAEFER; HAM, 1989; BARLAZ, 2006).

Em aterros sanitários brasileiros foram encontrados valores de potencial de geração de metano na ordem de 125 e 157 m³ de CH₄/t. de RSU, para os aterros dos Bandeirantes, em São Paulo e do Delta, em Campinas respectivamente (ENSINAS, 2003).

Já uma análise da biodegradação realizada em reatores anaeróbios mostrou que a taxa de geração de biogás pode variar de 80 a 250 Nm³ de biogás/t. de resíduo degradado (considerando um teor de biomassa de 60%). Estes números correspondem a uma taxa de geração de 70 a 140 Nm³ de CH₄/t. de resíduo (VERMA, 2002; LEVIS et al. 2010).

2.5.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA GERAÇÃO DO BIOGÁS

Uma vez que a produção de biogás é resultado da atividade de um conjunto de microrganismos e de processos, logo fatores que afetam os mesmos também afetarão a produção do biogás. Entres esses fatores, destacam-se:

Umidade – A umidade é essencial a atividade bacteriana, pois ela possibilita a mobilização de nutrientes e substratos requeridos pelos microrganismos, além de transportar enzimas e outros produtos microbianos do processo de biodegradação. O teor de umidade varia de acordo com a condição climática; precipitação; composição gravimétrica dos RS; práticas de coleta, disposição e cobertura dos

RSU no aterro; sistema de drenagem dos líquidos percolados; entre outros (WORLD BANK, 2004).

pH – A acidez ou alcalinidade do meio é fornecida pelo pH. A alcalinidade indica a quantidade de carbonato (proveniente do CO₂ produzido durante a DA) na solução. Conforme as bactérias acidogênicas produzem os ácidos, implicando na diminuição do pH, o carbonato reage com esses ácidos, o que leva ao controle da acidez do meio (chamado de efeito tampão) (CASSINI, 2003).

As bactérias que produzem o metano são sensíveis ao pH, elas sobrevivem em uma estreita faixa de pH (6,5 a 8,0). Assim, enquanto as bactérias acidogênicas produzem os ácidos, as *archaeas* metanogênicas consomem os mesmos, mantendo o meio neutro. Entretanto, as reações acidogênicas são mais rápidas do que as reações de produção do metano, por isso, ao iniciar a produção do biogás, é necessário que uma população de *archaeas* metanogênicas já esteja presente para que o processo seja bem sucedido (Ibid.).

Temperatura – A faixa ideal para a produção de biogás é de 30 °C a 35 °C (mesofílica), no entanto, também pode-se obter biogás em biodigestores operando em uma faixa de 50 °C a 60 °C (termofílica). As bactérias produtoras de biogás, em especial as metanogênicas, são sensíveis às alterações de temperatura. Então, para que a produção de biogás não diminua consideravelmente, deve-se evitar grandes variações de temperatura (BIDONE & POVINELLI, 1999; CASSINI, 2003).

Idade dos Resíduos – O potencial de geração de metano vai diminuindo com o passar do tempo. Os resíduos recém-dispostos tem um maior potencial de geração do que os resíduos mais antigos (MACHADO et al., 2009).

Composição química – A análise da composição química dos componentes dos RSU identifica a composição dos substratos, possibilitando, por exemplo, a avaliação do grau de resistência à atividade enzimática e a disponibilidade de nutrientes (BIDONE & POVINELLI, 1999).

Os principais nutrientes das bactérias envolvidas na DA são o carbono, nitrogênio e sais orgânicos. Uma relação específica de carbono para nitrogênio deve ser mantida entre 20/1 e 30/1. A principal fonte de nitrogênio é o dejetos humano e de

animais, enquanto os polímeros presentes nos restantes das outras culturas representam o principal fornecedor de carbono. A produção de biogás não é bem-sucedida se apenas uma fonte do material for utilizada (CASSINI, 2003). Objetivando corrigir esta relação, alguns autores propõem a suplementação de nitrogênio, e, com isso, acelera-se a degradação da matéria orgânica (BIDONE & POVINELLI, 1999).

O papel dos compostos de enxofre no metabolismo do aterro é complexo. Na forma de SO_4^{-2} e S^{-2} , é utilizado pelos microrganismos para formação de biomassa, sendo o SO_4^{-2} também utilizado como acceptor de elétrons. O SO_4^{-2} tem se mostrado inibidor da metanogênese, tendo sido postulado que isso se deve pela redução de SO_4^{-2} a S^{-2} , que é tóxico, e pela competição por substratos comuns a outros microrganismos (Ibid.).

Potencial Redox (Eh) – O potencial redox, chamado de energia primária, é a energia suprida por compostos orgânicos ou inorgânicos durante as reações químicas, sendo que sua utilização como fonte de energia está relacionada às reações de oxi-redução, envolvendo transferência de elétrons. O pH e a temperatura influenciam na medição do potencial de oxi-redução nos resíduos dos aterros. A Eh ótima para produção de CH_4 , deve ser menor que -200mV (Ibid.).

Metais Pesados – Os metais pesados ainda são encontrados nos RSU por estarem presentes nos componentes de pilhas, baterias, jornais, tintas, tecidos, enlatados, entre outros. As pilhas e baterias têm como princípio básico converter energia química em energia elétrica utilizando um metal como combustível. Apresentando-se sob várias formas (cilíndricas, retangulares, botões), podem conter um ou mais dos seguintes metais: chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), níquel (Ni), prata (Ag), lítio (Li), zinco (Zn), manganês (Mn) e seus compostos. Os metais pesados estão entre os principais agentes tóxicos verificados em processos anaeróbios, (ZVEILBIL et al., 2001). A Tabela 5 apresenta as concentrações dos metais pesados capazes de inibir o processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica.

Tabela 5 – Concentrações inibitórias dos metais pesados na digestão anaeróbia.

Cátions	Concentração Inibitória (mg/L)
Fe⁺⁺	1 – 10
Zn⁺⁺	4 – 10
Cd⁺⁺	7 – 10
Cu⁺	10 – 12
Cu⁺⁺	10 – 16

Fonte: Lima & Nunes (1994).

2.6 Modelos de estimativa de geração de Biogás

Atualmente, existem vários modelos disponíveis para estimar a produção de biogás ao longo da vida útil dos aterros. Alguns modelos utilizam de equações matemáticas de primeira ordem para mensurar a quantidade de metano produzido através do processo de biodegradação dos RSU. Os resultados desses podem ser usados para avaliar o potencial de emissões de GEE, bem como para avaliar a viabilidade de projetos de aproveitamento do biogás.

Neste tópico são apresentados os modelos do Banco Mundial (BM), da Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), bem como suas variáveis. As equações utilizadas nesses modelos têm em comum o fato de serem equações cinéticas de primeira ordem.

Esses modelos podem ser utilizados para construir uma curva de geração de biogás, que prediz a geração de gás por algum tempo. A produção total de gás e a taxa em que os gases são gerados podem variar um pouco conforme o modelo adotado, no entanto, esses modelos possuem praticamente os mesmos parâmetros de entrada, entre os quais se destacam: a quantidade de RSU aterrada; tempo de atividade do aterro; taxa de geração do metano (k) e potencial de geração do metano (L_0).

O parâmetro (k) representa a taxa de decomposição biológica, ela indica a velocidade em que o biogás é gerado após a disposição final dos RSU. Esta constante é influenciada pela umidade dos resíduos, disponibilidade de nutrientes, pH e temperatura da região. O teor de umidade dentro de um aterro é influenciado principalmente pela infiltração da precipitação através da cobertura do aterro (WORD BANK, 2004).

Segundo Borba (2006), as taxas mais rápidas ($k=0,2$ ou uma meia vida de aproximadamente 3 anos) estão relacionadas à condições de elevada umidade e materiais facilmente degradáveis, como os restos de alimentos. As taxas de decomposição mais lentas ($k=0,03$ ou uma meia vida de aproximadamente 23 anos) se associam a aterros de resíduos secos e a resíduos de degradação lenta, como a madeira ou o papel.

O potencial de geração de metano (L_0) representa a produção total de metano em m^3 de CH_4 por tonelada de resíduo. O valor de L_0 está diretamente relacionado com composição dos RSU, em particular, a fração de matéria orgânica presente no lixo. O valor de L_0 é estimado com base no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e num fator de conversão estequiométrico. Valores típicos para este parâmetro variam de $125 m^3$ a $300 m^3$ de CH_4/t de resíduo (WORD BANK, 2004).

2.6.1 MODELO SCHOLL CANYON (BANCO MUNDIAL)

O *Scholl Canyon* é o modelo recomendado pelo Banco Mundial em seu manual sobre o aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários. Este modelo é o mais frequentemente utilizado e aceito nas Américas do Sul e do Norte, devido sua forma simples de compreensão e aplicação, ele parte do pressuposto que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo (Ibid.). O modelo é representado pela equação descrita abaixo:

$$Q_{(CH_4 i)} = k \cdot L_0 \cdot m_i \cdot e^{-k \cdot t} \quad (3)$$

Onde:

$Q_{(CH_4 i)}$ = Metano produzido no ano i a partir da seção i do resíduo, (m^3 /ano);

k = Taxa da geração de metano, (anos⁻¹);

L_0 = Potencial da geração de metano, (m³ CH₄/t de resíduo);

m_i = Massa de resíduo despejada no ano i , (t/ano);

t_i = Anos após o fechamento.

O Banco Mundial sugere valores para os parâmetros da taxa de geração de metano (k) e do potencial de geração de metano (L_0) conforme as características do local do aterro e dos RSU. Esses valores estão apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 6 – Valores para k sugeridos correspondentes à precipitação anual.

Precipitação Anual	Valores de k		
	Relativamente Inerte	Moderadamente Degradável	Altamente Degradável
<250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 à <500 mm	0,01	0,03	0,05
>500 à <1000 mm	0,02	0,05	0,08
>1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: Word Bank, (2004).

Tabela 7 – Valores L_0 sugeridos para o conteúdo do lixo orgânico.

Categorização do Lixo	Valor Mínimo para L_0 (m ³ CH ₄ /t. de resíduo)	Valor Máximo para L_0 (m ³ CH ₄ /t. de resíduo)
Lixo Relativamente Inerte	5	25
Lixo Moderadamente Degradável	140	200
Lixo Altamente Degradável	225	300

Fonte: Word Bank, (2004).

O Manual do Banco Mundial propõe a utilização de um valor pré-estabelecido de L_0 de 170 m³ de CH₄ /t. de resíduos aterrado.

Para Borba (2006), a equação (3) não fornece uma representação adequada de aterros de RSU ativos, já que neste caso a exponencial da equação assume o valor um, o que fornece para aterros sem grandes flutuações no ingresso anual de resíduos uma geração constante de metano, independente do tempo de atividade do aterro.

No entanto, se na mesma equação levar-se em consideração, o tempo dos resíduos já aterrados e seu respectivo estágio de geração de biogás, ou seja, substituindo o valor do tempo que anteriormente era igual a um, pelo o valor correspondente do ano de cada massa de RSU foi depositada e efetuar-se o somatório dos resultados, é possível corrigir o problema apresentado por Borba (2006).

2.6.2 LandGEM (Versão 3.02)

O LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model* – Modelo de Emissão de Gases em Aterros Sanitários), é um programa criado pela EPA para estimar a quantidade de biogás gerado em aterros e suas variações ao longo de um determinado período de tempo. O modelo calcula além do gás metano a emissão de outros 49 componentes. Este modelo também utiliza de uma equação de primeira ordem (eq. 4) para estimar as emissões do biogás (EPA, 2005).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (4)$$

Onde:

Q_{CH_4} = geração anual de metano para o ano calculado (m³/ano);

$i = 1$ - acréscimo por ano;

n = ano do cálculo (ano inicial de abertura do aterro);

$j = 0,1$ - acréscimo por ano;

k = taxa de geração de metano (ano⁻¹);

L_0 = potencial de geração de metano (m³/t.);

M_i = massa de resíduos recebidos no ano em cada seção (t.);

t_{ij} = ano, em cada seção, de recebimento da massa de resíduos (tempo, com precisão de decimais, por exemplo, 3,2 anos).

O *software* permite utilizar dados específicos de um determinado aterro para estimar as emissões ou parâmetros padrão, na ausência de dados específicos. O LandGEM possui dois conjuntos de parâmetros padrão para o cálculo da geração de metano, esse conjuntos são o AP42 (*Compilation of Air Pollutant Emission Factors*) e o CCA (*Clean Air Act*) (EPA, 2005, 2008).

Tabela 8 – Parâmetros para cálculo de emissão de biogás do LandGEM.

Parâmetros	Tipo de Aterro	L_0 (m ³ CH ₄ / t RSU)	k (ano ⁻¹)
CCA	Convencional (Padrão)	170	0,05
	Local árido	170	0,02
AP42	Convencional	100	0,04
	Local árido	100	0,02

Fonte: EPA, (2005).

Os parâmetros L_0 e k são os mais importantes da eq. 4, pois refletem variações de acordo com local, clima, tipo de resíduos etc. Teoricamente, o fator k varia de 0,003 a 0,21 (ano⁻¹); porém, nas condições brasileiras, o fator pode ser aplicado com magnitudes de 0,05 até 0,15. Já o fator L_0 é proporcional à porcentagem de matéria orgânica presente nos resíduos, e pode variar de 0 (ausência de material degradável) até 300 m³/t. Como no Brasil a matéria orgânica constitui cerca de metade dos RSU, o valor para L_0 varia de 140 até 190 m³/t (CEPEA, 2004).

Segundo Maciel & Jucá (2011) os RSU se decompõem quatro a cinco vezes mais rápido em climas tropicais úmidos do que o previsto pelos tradicionais modelos de primeira ordem, quando adotados os parâmetros padrão.

Para Scharff & Jacobs (2006), a desvantagem do LandGEM é que não há diferença no teor da matéria orgânica. Nesse modelo, todos os resíduos são considerados RSM.

Diferentemente do modelo do BM, o LandGEM leva em consideração que a degradação dos RSU depositado ao longo do tempo não se esgota de uma única vez. O LandGEM considera que a fração orgânica dos RSU depositada no primeiro ano do aterro ainda está em decomposição, somando o valor desta emissão (que diminui gradativamente) as emissões de biogás dos resíduos recém depositados.

2.6.3 IPCC

O IPCC (1996) descreve dois métodos para estimar as emissões de metano geradas em aterros. O primeiro método, o mais simples, tem como premissa a suposição de que o potencial total de metano se libera durante o ano em que ocorre a disposição dos RSU (eq. 5).

$$\text{CH}_4(\text{t/ano}) = (\text{RSU}_T \cdot \text{RSU}_F \cdot \text{FCM}(x) \cdot \text{COD}(x) \cdot \text{COD}_F \cdot F \cdot 16/12) \cdot (1 - \text{OX}) \quad (5)$$

Onde:

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

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

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

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

COD_F = fração do carbono orgânico degradável assimilado;

F = fração de metano no gás do aterro, na ausência de dados 0,5;

16/12 = conversão de carbono a metano;

OX = fator de oxidação.

A fração dos RSU que é depositada em aterros (RSU_F) e Fator de Correção de Metano (FCM) refletem o modo como é gerido os resíduos e o metano gerado. A metodologia exige que os países forneçam dados ou estimativas da quantidade de RSU que são eliminados a cada uma das três categorias de locais de disposição dos RSU indicadas pela metodologia (Tabela 9).

Tabela 9 – Classificação dos locais de disposição final e seus respectivos fatores de correção de Metano.

Tipos dos locais de disposição final	FCM
Gerenciado	1,0
Não gerenciado – Profundo (> 5 m de RSU)	0,8
Não gerenciado – Raso (< 5 m de RSU)	0,4
Padrão - Não categorizado	0,6

Fonte: IPCC, (1996).

Gerenciado – Estes locais possuem um gerenciamento e controle adequado dos RSU. Incluindo alocação dos RSU dentro do local, ou seja, áreas específicas para depositar os resíduos; Material para cobertura dos RSU após sua disposição; Compactação mecânica ou nivelamento dos resíduos (IPCC, 1996).

Não gerenciado Profundo – Locais de disposição que a profundidade dos RSU depositados ultrapassa ou são igual a 5 metros de altura (IPCC, 1996).

Não gerenciado Raso – Locais de disposição que a profundidade dos RSU depositados são menor do que 5 metros de altura (IPCC, 1996).

2.6.3.1 Carbono Orgânico Degradável (COD)

O Carbono Orgânico Degradável (COD) é baseado na composição dos RSU, ele pode ser calculado a partir de uma média ponderada do teor de carbono dos vários componentes dos RSU.

Tabela 10 – Valores recomendados para o COD nos principais tipos de resíduos.

Componetes	Porcentagem em massa
A – Papel, Paleão e Tecidos	40
B – Resíduos de parques e jardins	17

C – Restos de alimentos	15
D – Madeira	30

Fonte: IPCC, (1996).

Para o cálculo do COD o IPCC fornece a seguinte equação:

$$\text{COD (\%)} = 0,4 (A) + 0,17 (B) + 0,15 (C) + 0,30 (D) \quad (6)$$

Em que:

A = Fração dos RSU que corresponde ao papel e aos têxteis;

B = Fração dos RSU que corresponde aos resíduos de jardins e parques e outros resíduos orgânicos putrescíveis (excluídos os alimentos);

C = Fração dos resíduos que correspondem a restos de alimentos;

D = Fração dos resíduos que correspondem aos resíduos de madeira e palha.

Caso não sejam conhecidas as frações dos resíduos, o IPCC (IPCC, 1996) recomenda um valor de 12% para o COD.

2.6.3.2 Fração do Carbono Orgânico Degradável Assimilado (COD_F)

O COD_F corresponde à fração do carbono orgânico degradável que realmente se degrada. O carbono orgânico degradável não se decompõe totalmente, parte dele permanece no aterro durante anos. Na ausência de dados o IPCC propõe um valor de 77% para o COD_F.

2.6.3.3 Fator de Oxidação (OX)

O fator de oxidação reflete a quantidade de metano procedente dos aterros que se oxida no solo ou em outros materiais que cobrem os resíduos. Estudos realizados demonstram que os aterros sanitários tendem a expressar resultados de oxidação mais altos que os lixões. Segundo o IPCC (1996) não existem valores aceitos internacionalmente e, na ausência de dados, se assume um valor igual a 0.

O segundo método indicado pelo IPCC é mais complexo, pois considera que as emissões de CH₄ dos locais de disposição final são emitidas por um longo período de tempo, em vez de instantaneamente, como apresentado anteriormente. Este modelo assume que o componente orgânico degradável (COD) dos RSU decai lentamente ao longo de algumas décadas, durante a qual são formados os CH₄ e CO₂. Se as condições forem constantes, a taxa de produção de CH₄ depende unicamente da quantidade de carbono remanescente nos resíduos (ibid.).

As emissões de CH₄ são maiores nos primeiros anos após a disposição dos resíduos nos aterros, e após isto, elas diminuem gradualmente conforme o carbono orgânico degradável presente nos RSU é consumido pelas bactérias responsáveis pela decomposição (IPCC, 1996, 2006). Este método também utiliza uma equação de primeira ordem para representar o processo de decomposição. (equações 7 e 8).

$$\text{CH}_4 \text{ gerado (t/ano)} = \sum[(A \cdot k \cdot \text{RSU}_T(x) \cdot \text{RSU}_F(x) \cdot L_0) \cdot e^{-k(t-x)}] \quad (7)$$

$$\text{CH}_4 \text{ emitido (t/ano)} = [\text{CH}_4 \text{ gerado} - R(t)] \cdot (1 - \text{OX}) \quad (8)$$

Onde:

t = ano de realização do inventário;

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

A = (1-e^{-k})/k; fator de normalização para corrigir a soma;

k = constante de geração (ano⁻¹);

R(t) = quantidade de metano recuperada no ano t;

OX = fator de oxidação (fração);

L₀ = potencial de geração de CH₄ (eq. 9).

$$L_0 = \text{FCM}(x) \cdot \text{COD}(x) \cdot \text{COD}_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (9)$$

Onde:

FCM(x) = fator de correção do metano no ano x;

COD(x) = fração de carbono orgânico degradável no ano x (t C / t RSU);

COD_F = fração do carbono orgânico degradável assimilado;

F = fração de metano no gás do aterro, na ausência de dados 0,5;

16/12 = conversão de carbono a metano.

A equação 7 não fornece uma representação adequada de aterros de RSU fechados, já que a fração exponencial é sempre crescente, o que gera um aumento constante na geração de biogás. Se por outro lado for considerado o ingresso de resíduos ao aterro como zero, a equação é zerada.

2.6.4 BIOGÁS DA CETESB

O *software* Biogás, geração e uso energético – aterros, versão 1.0 foi desenvolvido através dos convênios firmados entre o Governo Federal do Brasil, por intermédio do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e o Governo do Estado de São Paulo, por intermédio da Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA) e da CETESB.

O programa tem o objetivo de auxiliar a avaliação de viabilidade do uso energético do biogás gerado pela disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros. O *software* Biogás emprega a mesma equação matemática usada pela EPA, para estimativa da geração de metano nos aterros dos Estados Unidos.

A equação 10 é equação diferencial de primeira ordem, cuja integral é igual a equação 11. A estimativa de soma das vazões do gás metano gerado pela deposição dos resíduos no aterro ao longo dos anos é fornecida pela equação 12.

$$\int \frac{dQ}{dt} = kR_xL_0 \quad (10)$$

$$Q_x = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(x-t)} \quad (11)$$

$$\sum Q_x = F \cdot k \cdot L_0 \cdot \sum R_x \cdot e^{-k(x-t)} \quad (12)$$

Onde:

Q_x = vazão de metano gerado no ano x pelo RSU depositado no ano T (m^3 CH_4 /ano);

k = constante de decaimento (1/ano);

R_x = fluxo de resíduos no ano x (kg RSU);

L_0 = potencial de geração de metano (m^3 biogás / kg RSU);

t = ano de deposição do resíduo no aterro (ano);

x = ano atual (ano); e : soma das n estimativas de vazões de metano (m^3 CH_4)

Conforme este modelo, quanto maior a idade do resíduo aterrado ($x - t$), menor será o valor da vazão (Q_x). As emissões serão maiores quanto maiores forem os valores de k , R_x e L_0 e do mesmo modo, o decaimento será mais proeminente quanto maiores forem k e t . Essa estimativa é feita ano a ano, obtendo-se assim a emissão de metano do aterro durante toda a sua vida útil e pelos anos seguintes após o seu fechamento.

Ressalta-se que a taxa de decaimento (k) varia entre 0,001 em climas mais secos e 0,15 ao ano em climas mais úmidos e o valor da estimativa do potencial de geração de biogás (L_0) varia entre 0,001, para resíduos pouco orgânicos, e 0,312 m^3 CH_4 /kg RSU para resíduos muito orgânicos (CETESB, 2006).

Além da estimativa de geração do metano, o programa elabora estimativas de geração dos RSU pelos municípios e a potência elétrica disponível a partir do metano gerado.

2.7 Aproveitamento Energético dos RSU

O aproveitamento energético dos RSU constitui-se em uma alternativa promissora, representando um elemento importante de uma estratégia de ampliação da geração de energia, diversificação da matriz energética e utilização de fontes alternativas de energia.

No Brasil, em uma perspectiva de longo prazo, o Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 considera a possibilidade de instalação de até 1.300 MW nos próximos anos em termoeletricas utilizando RSU. Isto indica que são esperados avanços importantes no aproveitamento energético do lixo urbano (EPE, 2007).

Para viabilizar economicamente os empreendimentos destinados a realizar o aproveitamento energético dos RSU no Brasil, dois fatores foram de grande importância. Primeiro, foi a garantia de venda da energia, através da negociação direta com um consumidor final de grande porte (OLIVEIRA, 2006). E segundo, a obtenção de créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

2.7.1 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM ATERROS SANITÁRIOS

Em um aterro sanitário, geralmente, o biogás produzido é conduzido para um queimador (*flare*) ou para o sistema de geração de energia. No queimador o metano é destruído, não aproveitando assim, a energia térmica gerada pela sua combustão. O aproveitamento do biogás pode ser feito de várias formas. Usualmente, nos países desenvolvidos, onde essa prática é muito utilizada, gera-se energia elétrica com motores de combustão interna (ciclo Otto) ou turbinas a vapor (ICLEI, 2008). Existem várias alternativas para explorar o aproveitamento do biogás em aterros sanitários. A Figura 11 apresenta uma síntese destas opções.

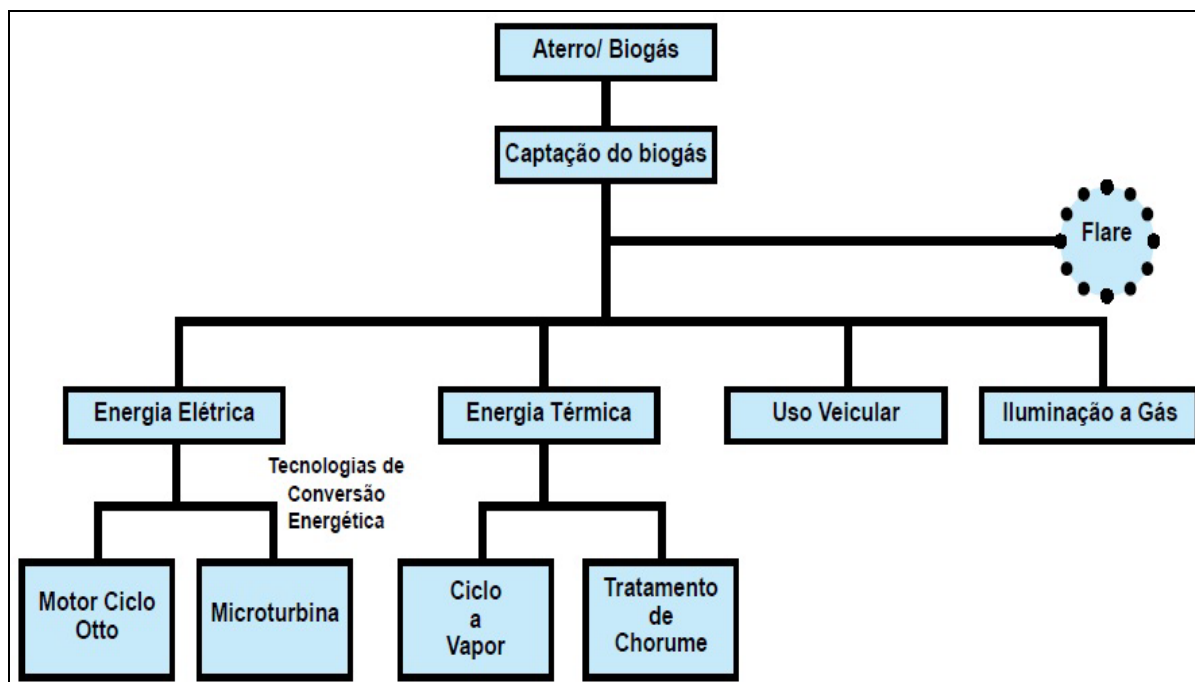


Figura 11 – Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás.

Fonte: ICLEI (2009).

No entanto, para efetuar o aproveitamento do biogás, o aterro precisa ter uma infraestrutura adequada, com um sistema de extração (poços de coleta e tubos condutores), tratamento e de recuperação energética dos gases. A seguir será descrito um sistema padrão de extração e aproveitamento de biogás de aterros.

2.7.1.1 Sistema de extração e tratamento do biogás do aterro

O sistema de extração e tratamento é formado por tubos coletores, compressores, desumidificadores e filtros.

Tubos de coleta – A coleta de gás começa após o fechamento da célula sanitária que irá formar um poço de gás. No entanto, existem duas configurações de sistemas de coleta: poços verticais (são os mais comumente empregados) e trincheiras horizontais. Mas, independentemente do tipo usado, o sistema de coleta será conectado a uma tubulação lateral, que transportará o gás para um coletor principal. O sistema de coleta deve ser planejado para que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás necessário (TOLMASQUIM, 2003).

De acordo com Willumsen (2001), a forma mais utilizada para conectar um poço de gás à bomba e ao sistema de utilização é a ligação dos poços a um tubo principal que percorre todo o aterro. Esse sistema, entretanto, tem por característica as dificuldades com o controle da quantidade e da qualidade do gás e com o procedimento de identificação de vazamentos, uma vez que todos os tubos estão ligados a um grande sistema. A opção mais segura e econômica seria ter um tubo para cada poço ligado a uma bomba e a uma casa de regulação.

Ressalta-se que mesmo com todos os cuidados para a construção das células sanitárias, sistema de drenagem e coleta do biogás, é comum observar a perda de gases pela superfície.

Compressor – Um compressor é necessário para puxar o gás dos poços de coleta e também pode ser necessário para comprimir o gás antes que este entre no sistema de recuperação energética. O tamanho, o tipo e o número de compressores necessários dependerá da taxa, do fluxo de gás e do nível desejado de compressão que, tipicamente, é determinado pelo equipamento de conversão energética (MUYLAERT et al., 2001).

Tratamento do Condensado – Quando o biogás viaja através do sistema de coleta, este se resfria, formando um condensado que pode bloquear o sistema de coleta e interromper o processo de recuperação de energia, devendo, portanto, ser controlado, removido e então adequadamente descartado (TOLMASQUIM, 2003). Segundo ICLEI (2009), no ponto de saída dos drenos a temperatura do gás estará entre 40°C e 50°C. Pelo resfriamento ao longo da tubulação instalada sobre o aterro, será gerado condensado em grande quantidade (por exemplo, a redução da temperatura de 50° para 25°C gera cerca de 60 g de condensado por m³).

Tratamento do Biogás – Depois de ser coletado e antes de ser usado no processo de conversão de energia, o biogás deve ser tratado a fim de remover algum condensado que não foi coletado nos tanques de captura, assim como particulados e outras impurezas. As necessidades de tratamento dependem da aplicação de uso final. As aplicações de gerações de energia incluem uma série de filtros para remover impurezas, as quais podem danificar os componentes do motor ou turbina e, com isso, reduzir a eficiência do sistema (AZEVEDO & LANDIM, 2008).

Desumificador – O sistema de desumidificação tem a finalidade de segregar eventuais gotículas de líquidos contidos no biogás, evitando seu aporte para os compressores do sistema de extração de gases (ICLEI, 2009).

2.7.1.2 Sistema de queima em *flares*

O flare é um dispositivo simples para ignição e queima do biogás. Eles são alternativas interessantes, pois possibilitam a queima dos gases a uma altura segura, facilitam a tomada de amostras para análise. Os projetos podem incluir flares abertos (ou velas) e enclausurados. Estes são mais caros, mas podem ser preferíveis porque proporcionam testes de concentração e podem obter eficiência de combustão ligeiramente alta. Os flares enclausurados são construídos em aço carbono e isolados internamente com fibra cerâmica, possuem queimadores internos fixados em um coletor inferior, interligados com o duto do biogás. Este duto principal de biogás, por sua vez, apresenta uma bifurcação, destinada ao envio do gás para os sistemas de geração de energia ou outras finalidades de reaproveitamento antes da queima. A ignição e manutenção da chama são feitas através de um queimador piloto, o qual normalmente utiliza Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) como combustível inicial. (MUYLAERT et al., 2001; ICLEI, 2009).

2.7.1.3 Sistema de geração de energia

A principal utilização do biogás é como combustível para a geração de energia, com a venda da eletricidade para um consumidor próximo. A geração elétrica é vantajosa porque produz valor agregado para o biogás. A co-geração de eletricidade e energia térmica (vapor) com base no biogás pode ser uma alternativa mais interessante. A eficiência da geração elétrica isolada varia de 20% a 50% e com o uso da co-geração, obtêm-se eficiências mais alta pela disponibilização do vapor resultante do processo de geração, que pode ser usado localmente para aquecimento e refrigeração, ou para outras necessidades de processo, ou ainda transportado por tubo para uma indústria ou comércio próximos, obtendo um segundo rendimento para o projeto (TOLMASQUIM, 2003).

Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás, entre elas, destacam-se os motores de combustão interna (MCI), turbinas de combustão e turbinas com utilização de vapor (ciclo combinado). A energia química contida nas moléculas do biogás é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica (AZEVEDO, 2008).

A conversão em energia elétrica pode começar assim que a rede coletora estiver conectada ao sistema de aproveitamento energético (motor ou turbina), que deve ser adequado para o uso com gás de qualidade pobre de metano (biogás). Com cuidado de manutenção é possível assegurar que se produza eletricidade a uma confiabilidade de 95%. Um programa detalhado de manutenção do aparelho de geração, em conjunto com um plano de manutenção extensivo no sistema de coleta, assegurará uma produção de eletricidade otimizada (HENRIQUES, 2004).

✓ **Motores de combustão Interna**

Segundo ICLEI (2009), o motor ciclo Otto é o equipamento mais utilizado para queima do biogás, devido ao maior rendimento elétrico e menor custo quando comparado às outras tecnologias. Para promover a queima de biogás em motores combustão interna são necessárias pequenas modificações nos sistemas de alimentação, ignição e taxa de compressão. Eles utilizam o biogás diretamente, sem um tratamento sofisticado do combustível, pois secagem e filtragem são suficientes. A geração de energia elétrica se dá pelo acoplamento do gerador diretamente ao motor.

Uma outra vantagem desse equipamento é a flexibilidade na implantação do sistema de geração, que poder ser pequeno porte e ser ampliado com o aumento da quantidade de gás produzido ao longo da vida útil do aterro, instalando-se para isso novos motores (ENSINAS, 2003).

✓ **Turbinas a Vapor**

Os sistemas de ciclo a vapor funcionam de acordo com o ciclo Rankine, que consiste basicamente em caldeira, turbina, condensador e bomba, conforme apresentado na Figura 12.

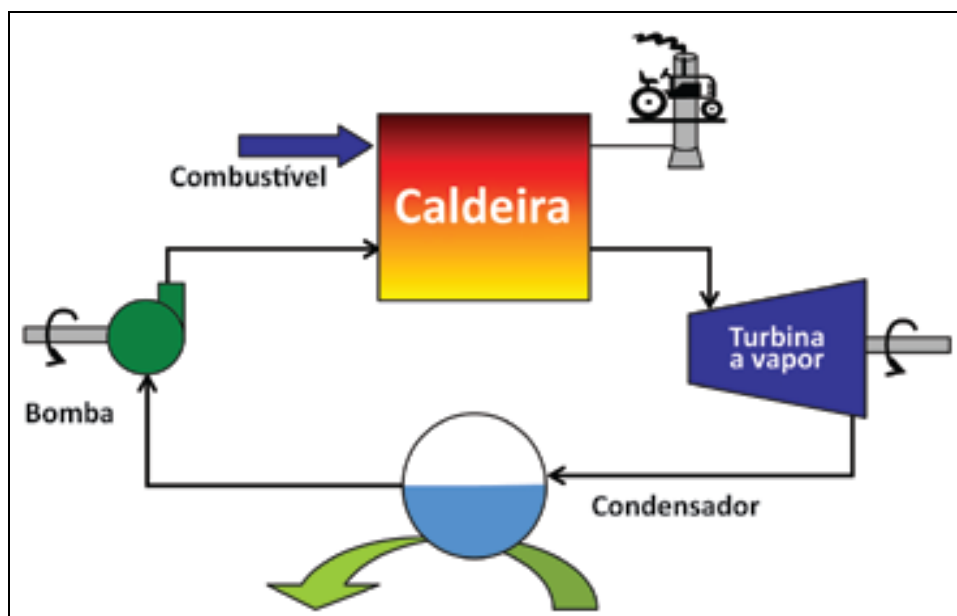


Figura 12 – Esquema de um ciclo Rankine.

No ciclo Rankine o calor proveniente da combustão do biogás em uma caldeira, é utilizado para geração de vapor, que poderá ser utilizado para processos industriais, aquecimento direto ou geração de energia elétrica, por meio do acionamento de uma turbina a vapor acoplada a um gerador (ICLEI, 2009).

O calor na forma de vapor ou água quente, diferentemente da energia elétrica, não é facilmente transportado por grandes distâncias. Por isso, as unidades cogeneradoras devem estar próximas das instalações que utilizam energia térmica (Ibid.).

✓ Turbinas a Gás

As turbinas a gás são usadas em grandes aterros, com projetos de 3 a 4 MW no mínimo. A economia na geração de energia e a eficiência do sistema aumentam de acordo com a escala do projeto, podendo ser uma alternativa mais adequada para grandes plantas de geração.

As eficiências podem ser aumentadas chegando a 40% quando são utilizadas plantas de ciclo-combinado, com recuperação do calor perdido. No entanto esses equipamentos tem eficiências bem reduzidas quando trabalham em carga parcial. Uma vantagem dessas turbinas é a maior resistência quando comparadas aos motores de combustão interna, além dos custos mais baixos de operação e de manutenção (EPA, 1996).

A Tabela 11 apresenta uma comparação entre as três tecnologias (motor de combustão interna, turbinas a vapor e turbinas a gás) de geração de energia.

Tabela 11 – Comparação das tecnologias de geração de energia.

	Motor de Combustão Interna	Turbinas de Combustão	Turbinas com Utilização de Vapor
Tamanho típico do projeto (MW)	> 1	> 3	> 8
Necessidade de Biogás (m³/dia)	> 18.000	>57.000	> 142.000
Custos de capital típicos (US\$/kW)	1.000 – 1.300	1.200 – 1.700	2.000 – 2.500
Custos de Operação e Manutenção (O&M) típicos (US\$/kWh)	1,8	1,3 – 1,6	1,0 – 2,0
Eficiência (%)	25 – 35	20 – 28 (aberto) 26 – 40 (combinado)	20 - 31
Potencial de Cogeração	Baixo	Médio	Alto
Necessidade de compressão (pressão de entrada de kPa)	Baixo (14-240)	Alto (>1140)	Baixo (14-34)
Vantagens	Baixo custo; Alta eficiência; Tecnologia mais comum.	Resistência à corrosão; Baixo custo O&M; Pequeno espaço	Resistência à corrosão; Possibilidade de controle da

		físico; Baixa emissão NO _x	composição e do fluxo de gás.
Desvantagens	Problemas devido ao acúmulo de partículas; Corrosão de peças do motor e catalisadores; Altas emissões de NO _x .	Ineficientes em carga parcial; Altas cargas parasitárias, devido às exigências de alta compressão de gás.	Ineficientes em tamanhos menores; Requer grandes quantidades de água limpa; Alto custo de capital.

Fonte: Adaptado de EPA (1996).

2.7.1.4 Produção de Energia

Segundo Henriques (2004), o aproveitamento energético em aterros pode ser calculado pela equação 13:

$$EP = RSU \cdot FP \cdot d \cdot FC \cdot FCP \cdot E \quad (13)$$

Onde:

EP – Energia potencial calculada (TWh/ano);

RSU – quantidade de resíduos sólidos urbanos (t./ano);

FP – Fator de produção de metano (t. CH₄/t RSU);

d – densidade (m³/kg);

FC – Fator de conversão (kWh/m³);

FC – Fator de capacidade da planta (%);

E – Eficiência da planta utilizada (%).

De acordo com Muylaert et al. (2001), os fatores de capacidades (FC) típicos para projetos de aproveitamento energéticos em aterros variam entre 80 a 95% e são baseados na disponibilidade do biogás no projeto da planta e nas taxas de parada do gerador (4% a 10% das horas anuais).

2.7.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS PARA RSU

Neste item serão apresentadas as tecnologias de tratamento térmico dos RSU que podem ser aproveitadas também para a geração de energia.

A recuperação energética dos RS depende do poder calorífico que estes possuem. Quanto maior o poder calorífico, mais interessante será seu uso para geração de energia. A Tabela 12 apresenta o PCI de alguns materiais constituintes dos RSU.

Tabela 12 – PCI de alguns materiais presentes nos RSU.

Materiais	Kcal/kg
Plásticos	6.300
Borracha	6.780
Couro	3.630
Têxteis	3.480
Madeira	2.520
Restos de alimentos	1.310
Papel	4.030
Pneu	7.667

Fonte: Adaptado de EPE (2008) e LAGARINHOS & TENÓRIO (2008).

Note que os resíduos orgânicos apresentam o menor poder calorífico, ou seja, os RSU com alto teor de matéria orgânica, não são interessantes para os processos térmicos de aproveitamento energético. Em contrapartida, o pneu apresenta um maior poder calorífico, sendo excelente fonte alternativa de combustível.

2.7.2.1 Incineração

A incineração é o processo que diminui o volume dos RS por meio da combustão, eliminando os agentes patogênicos presentes nos resíduos, e ainda

permite a recuperação de energia desde que os resíduos não sejam excessivamente úmidos.

Segundo a EPE (2008), os resíduos sólidos com PCI inferior a 1.675 kcal/kg a incineração não é tecnicamente viável, pois além de dificuldades técnicas, exige ainda a adição de combustível auxiliar. Entre 1.675 kcal/kg e 2.000 kcal/kg a viabilidade técnica da incineração depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico. Acima de 2.000 kcal/kg a queima bruta é tecnicamente viável.

O tamanho das usinas de incineração varia conforme a quantidade de RS processada. Essas usinas operam de uma faixa de 50 t/dia, podendo chegar até a 1.000 toneladas de resíduo processado por dia. As usinas de grande escala apresentam vantagem da economia de escala na utilização dos resíduos e também na geração de energia, à medida que as turbinas a vapor utilizadas podem ser maiores e com isso, de maior eficiência. As usinas de escala reduzida são úteis em comunidades com população em torno de 30 a 200 mil habitantes, produzindo entre 50 e 200 t/dia de RSU (BURANI et al., 2006).

Os principais benefícios desta tecnologia são a esterilização e a redução de cerca de 90% do volume dos resíduos. Consequentemente há uma diminuição dos riscos de contaminação envolvidos no processo de destinação final e ainda contribui para o aumento da vida útil dos aterros sanitários. A incineração é recomendada para o tratamento de resíduos industriais perigosos e para RSS que são de alta periculosidade (PAGLIUSO, 2009).

Com a tecnologia de incineração com recuperação energética, os resíduos passam por um tratamento térmico numa temperatura média de 950 °C. Os gases quentes a cerca de 1.000 °C são direcionados para uma caldeira onde são utilizados para geração de vapores que por sua vez, acionam um grupo gerador capaz de gerar eletricidade.

O número de incineradores no mundo cresceu significativamente nas últimas décadas. A Tabela 13 mostra que grande parte dos RSU dos países desenvolvidos tem sido processado em incineradores. Países como a Suíça e Japão projetam atingir mais de 90% de seus resíduos processados em plantas de tratamento térmico (HENRIQUES, 2004).

Tabela 13 – Incineradores no Mundo.

País	População (Milhões)	Produção de Lixo (milh. t/ano)	Números de incineradores	% Incinerado	Recuperação de energia
Suíça	7	2,9	29	80	80% das usinas
Japão	123	44,5	1893	72	Principais
Dinamarca	5	2,6	32	65	100% das usinas
Suécia	9	3,7	21	59	100% das usinas
França	56	18,5	100	41	68% da capac.
Holanda	15	7,1	9	39	50% das usinas
Alemanha	61	40,5	51	30	
Itália	58	15,6	51	17	30% da capac.
USA	248	180,0	168	19	75% das usinas
Espanha	38	11,8	21	15	24% das usinas
Reino Unido	57	35,0	7	5	25% da capac.

Fonte: Menezes; Menezes; Real (2000).

Atualmente, a tecnologia de incineradores disponível no mundo possibilita a geração de até 0,95 kWh/t RS processado, sendo que a grande maioria dos sistemas instalados gera de 0,4 a 0,95 kWh/t. (Ibid.). A Tabela 14 apresenta algumas plantas de incineração com aproveitamento energético e suas respectivas capacidades instaladas de geração de energia.

Tabela 14 – Alguns Incineradores no mundo com aproveitamento energético.

Localização	Capacidade de tratamento t/dia	MW
Tsurumi, Japão	600	12
Tomida, Nagoya, Japão	450	6
Dickerson, Maryland, USA	1.800	63
Alexandria, Virginia, USA	975	22
Isvag, Antuérpia, Bélgica	440	14
Savannah, USA	690	12
Izmit, Turquia	96	4
UIOM Emmenspitz, Suíça	720	10
Wells, Áustria	190	7

Fonte: Menezes; Menezes; Real (2000).

No Brasil, atualmente, não se tem incineradores para RSD. A incineração é utilizada somente para resolver a questão do tratamento dos resíduos perigosos e parte dos RSS. A tecnologia utilizada atualmente no país, não faz o aproveitamento energético. Para que isso ocorra, seria necessário alguns aprimoramentos tecnológicos para permitir que esse aproveitamento fosse economicamente viável (HENRIQUES, 2004).

2.7.2.2 Gaseificação

A gaseificação é o processo no qual a oxidação parcial de um combustível (carvão, petróleo, biomassa, resíduos ou outros materiais que contenham carbono) é capaz de gerar um gás que pode ser usado para a produção de energia e produtos químicos. Pela necessidade de um pré-tratamento dos resíduos, onde são retirados os componentes ferrosos, alumínio e vidros, o gás gerado nesse processo é considerado limpo, sem ser necessária a limpeza externa.

Após passarem pela triagem prévia (pré-tratamento) os RS são triturados e passam pelo reator térmico na câmara de gaseificação, onde a biomassa é convertida em gás a alta temperatura (900 – 1.200 °C). Só depois de resfriado e limpo, por métodos convencionais, é que esse gás entra em processo de combustão conectado a um gerador elétrico (HENRIQUES, 2004).

A eficiência das plantas de incineração é limitada por restrições técnicas, como a temperatura no super aquecedor (e também a temperatura do vapor) no sentido de prevenir a corrosão causada por certos componentes em temperaturas muito elevadas. Assim ocorre uma limitação na temperatura do vapor direcionado para a turbina que como consequência limita também a eficiência geral da planta. Como o gás proveniente da gaseificação é limpo antes de ser queimado, ele pode atingir temperaturas mais elevadas sem comprometer os materiais envolvidos sem que se tenha também o risco de corrosão, e sua eficiência pode aumentar em até 30% em relação a incineração (Ibid.). Os principais tipos de gaseificadores segundo Pagliuso (2009) são:

Slagging – Operam em alta temperatura (1.500 °C) e produzem cinzas líquidas;

Leito fixo (ou móvel) – A temperatura é variável por zona, e são produzidas cinzas sólidas, que podem ser *updraft*, *downdraft* e fluxo cruzado;

Leito de arraste – normalmente usado na configuração slagging e;

Leito fluidizado borbulhante ou circulante – temperatura relativamente baixa (850 °C) produz cinzas sólidas.

Nos EUA e no Canadá, existem plantas de gaseificação operando com uma capacidade de 100 a 400 t./dia de RSU.

2.7.2.3 Plasma Térmico

A tecnologia de plasma pode ser entendida como um gás a temperatura ambiente que é aquecido por um arco elétrico (tochas de plasmas) onde se alcançam elevadas temperaturas (a cerca de 50.000 °C) na geração de plasma.

O plasma é uma forma especial de matéria, cujo comportamento físico é diferente dos estados sólido, líquido e gasoso. Isto porque, quando um material na forma sólida é aquecido, ocorre uma transição para o estado líquido a uma dada temperatura. Se este líquido continuar a ser aquecido, ocorrerá formação da fase gasosa. Se o gás for ainda mais aquecido, ter-se-á então o estado plasma. O material transformado através do plasma é constituído de gases e sólido vítreo, não agressivo ao meio ambiente, semelhante à obsidiana, um mineral de origem vulcânica, cor negra e de altíssima dureza encontrado na natureza (VIMIEIRO, 2007).

A planta de plasma para o tratamento de resíduos é composta por tochas de plasma, reator e sistemas de alimentação, remoção de subprodutos, limpeza de gases, purificação de águas e controle. Durante o processo, ocorre gaseificação da matéria orgânica dos resíduos. Para que essa reação ocorra de maneira eficaz é necessário adicionar energia, fornecida pelo sistema de plasma. O gás produzido pode ser utilizado posteriormente para geração de energia.

O material transformado através do plasma é constituído de gases e sólido vítreo, não agressivo ao meio ambiente. Na tecnologia plasma, ao invés de ocorrer combustão convencional (tal como na incineração), ocorre uma dissociação molecular em componentes atômicos elementares, não gerando compostos perigosos provenientes da combustão como dioxina, furanos e outros (Ibid.).

O volume de gases gerado é significativamente menor que nos incineradores, por se tratar de um processo semelhante a uma pirólise. A diferença do processo a plasma em comparação com a pirólise de processos de incineração refere-se às maiores temperaturas do primeiro e à possibilidade de adicionar grandes quantidades de energia ao processo rapidamente, aumentando a flexibilidade do processo a plasma. A tecnologia evita a manipulação do resíduo por pessoas, gera energia térmica e libera apenas vapor de água e gás carbônico.

Além disso, pode ser considerado uma fonte de energia mais eficaz na destruição e /ou reutilização de poluentes e é a única capaz de destruir quase completamente os furanos e dioxinas presentes no lixo, devido às altas temperaturas, as quais separam completamente os elementos presentes. É uma fonte de energia limpa de grande eficiência energética e com poder de redução do volume dos materiais tratados (Ibid.).

Conforme as condições de geração, o plasma atinge temperaturas extremamente elevadas que podem variar de 5.000 a 50.000 °C. Qualquer corpo inserido num meio como este sofrerá as mais diversas interações, motivo da grande versatilidade de técnicas que fazem uso do plasma como fonte energética. A parte inorgânica, que nos incineradores tradicionalmente formam as cinzas, será liquefeita pelas altas temperaturas do processo e quando retirado do reator formará um subproduto inerte e vitrificado, que pode ser reutilizado para diversas finalidades, tais como: calçamentos de ruas, impermeabilização de telhas, matéria-prima para concreto. A cada 1.000 kg de lixo obtém-se 150 kg de pedras (Ibid.).

No Brasil, o Hospital Universitário da USP (HU), em conjunto com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e Instituto de Física da USP iniciou o desenvolvimento de um projeto para a construção de uma usina para tratamento de resíduos de serviço de saúde via plasma. A usina teria capacidade para receber até 100t de lixo por dia e funcionaria durante 24 horas. Seria necessário 6.000 L/dia de água para operar a usina, este volume de água seria obtido através de poços perfurados ao redor do terreno. A usina de plasma iria processar o lixo de todas as unidades da USP, inclusive do HU, que produz 10 t/dia, que corresponde a 10% de sua capacidade. O restante iria ser usado para processar o lixo dos demais hospitais públicos e particulares do município (MAGALHÃES, 2009). No entanto, este projeto encontra-se desativado.

O plasma *Arc Technology* apresenta temperaturas entre 4.000 °C e mais de 7.000 °C, densidade energética acima de 100 MW/m³. O maçarico opera com maioria dos gases sendo o ar mais comum, o processo de pirólise e / ou gaseificação não é um processo de incineração, sendo ideal e conveniente para tratamento de resíduos.

Os materiais residuais (inorgânicos, metais pesados etc.) são imobilizados num tipo de rocha vitrificada, altamente resistente à água e nenhuma outra tecnologia consegue atingir a temperatura ou densidade energética do Plasma ARC.

Ao se comparar a utilização dos RSU em plantas de plasma para a geração de energia com a disposição final ambientalmente adequada nos aterros, verifica-se o potencial custo-eficiente da incineração. Além disso, reduz-se significativamente o problema com a disposição dos RSU. A tecnologia plasma, além de utilizar totalmente os resíduos, constitui-se em uma forma de energia renovável alternativa, com elevado potencial de oferta e possibilita a refusão da necessidade de aterros,

pois não há emissões diretas para a atmosfera. Todos os contaminantes conhecidos podem ser efetivamente tratados na tecnologia plasma e aceitam todo tipo de resíduo sólido e líquido, inclusive materiais tóxicos e perigosos, sem necessidade de pré-processamento (VIMIEIRO, 2007).

2.7.2.3 Comparação das tecnologias disponíveis para tratamento térmico dos RS com aproveitamento energético.

A partir da Tabela 15 é possível comparar as tecnologias existentes para o tratamento térmico segundo os critérios de: potência, eficiência energética, restrições, tipo de resíduos e tratamento final.

Tabela 15 – Comparação das tecnologias de tratamento térmicos dos RS.

Parâmetros	Incineração	Gaseificação	Plasma ARC
Temperatura (°C)	750 – 1.250	900 – 1.200	4.000 – 7.000
Energia térmica (kWh/t de RSU)	544	685	816
Energia elétrica (kWh/t de RSU)	1.600 – 3.800	1.600- 3.800	3.006 – 3.264,2
Energia elétrica líquida (kWh/t de RSU)	400 – 950	520 – 1.235	223 – 294,5
Eficiência energética	25%	32,5%	7-10%
Restrição de tratamento	_____	Ferrosos, alumínio e vidro	_____
Resíduos do processo	Cinzas e escória	Cinzas	Rocha vitrificada
Tratamento final	Aterro I e II	Aterro	Reaproveitamento

Fonte: Bartholomeu & Caixeta-Filho (2011).

2.7.3 TECNOLOGIA BEM

A tecnologia BEM (Biomassa – Energia – Materiais) processa qualquer tipo de biomassa (madeira e seus resíduos, bagaço de cana, resíduos agrícolas, grama, matéria orgânica dos RSD, lodo orgânico e alguns resíduos petroquímicos como pneus e plásticos) para transformá-las em dois subprodutos: a celulignina utilizada como combustível, ração animal e madeira sintética, entre outros produtos e o pré-hidrolisado (solução de açúcares) usado em produtos químicos tais como furfural, álcool e xilitol (PINATTI et al., 2003).

A primeira etapa a ser considerado é a diluição do pré-hidrolisado da biomassa por um ácido em um reator de aço de carbono revestido com metais refratários. Neste processo, a hemicelulose da biomassa é hidrolisada a uma solução de açúcar (principalmente xilose), que será a matéria-prima para a produção do furfural. O produto sólido desta etapa é a celulignina, um combustível livre de potássio e sódio. A segunda etapa é a produção furfural, que consiste na desidratação da solução de açúcar (pré-hidrolizado). Nesta segunda etapa, gera-se água destilada que é usado para lavar celulignina com o objetivo de diminuir o conteúdo de sódio e potássio para o nível de partes por milhão (Ibid.).

Segundo Tolmasquim (2003), o processo de fabricação da celulignina consiste nos seguintes passos:

I - O enchimento do reator é realizado por um alimentador helicoidal que compacta a biomassa até a densidade de 300 kg/m³. Adiciona-se ácido sulfúrico residual industrial diluído.

II - Depois de adicionado o ácido, é feito um aquecimento direto e o reator fica girando para que a mistura aqueça de forma homogênea e melhore o processo. A reação dura cerca de 30 minutos, mas caso o reator seja estático poderá durar entre 2,5 a 3 horas.

III - O consumo de energia para a produção de celulignina equivale a 6,3% da energia contida na celulignina produzida, indicando um valor cinco vezes menor do que os valores obtidos pelos reatores clássicos utilizados em processos de hidrólise ácida de biomassa.

2.7.3.1 A celulignina

A produção de celulignina, a partir dessa tecnologia, aumenta o teor de carbono em cerca de 30%, se comparado ao material orgânico original. A celulignina produzida possui níveis menores de potássio e sódio, comparado ao material original, passando a ser um combustível possível de ser queimado em turbinas a gás de ciclo combinado. Com relação ao teor de açúcar, este aumenta muito depois do aquecimento da mistura e logo depois se estabiliza. Esse aumento repentino pode ser explicado pelo início das erupções nas paredes celulares. A celulignina sai úmida do reator, passa por secador e é moída. Sua queima ocorre como se fosse gás, pois ela é pulverizada no combustor (HENRIQUES, 2004).

2.7.3.2 O pré-hidrolisado

A solução segue para um segundo reator no qual é aquecida a 220°C e torna-se furfural. O furfural possui inúmeras aplicações, dentre elas o PHF, uma mistura de combustível já utilizada na Califórnia, por se tratar de combustível limpo, composto por 20% de furfural, 50% de álcool e o restante de gasolina. O furfural segue para uma tancagem e, depois de aquecido, passa por uma destilação. O vinhoto da planta é transferido para a unidade de tratamento de água onde é retirado o lodo. Esse lodo, depois de seco, é tratado por um processo de conversão à baixa temperatura, que gera carvão e óleo, que podem ser queimados. O processo leva de 2 a 2,5 horas (Ibid.).

3. ESTUDO DE CASO

3.1 CIMASAS

Durante muitas décadas, os resíduos produzidos pelas residências e comércios dos municípios de Delfim Moreira, Itajubá, Piranguinho, Piranguçu, São José Alegre e Wenceslau Braz do estado de Minas Gerais foram destinados a lixões. Sem critérios de separação dos RS, esses lixões causavam grande impacto ambiental, já que o chorume gerado penetrava na terra, causando a contaminação do lençol freático e do solo da região. Além disso, os lixões traziam riscos para a saúde pública e problemas sociais, como por exemplo, a presença de catadores de materiais recicláveis nos vazadouros.

O Consórcio Intermunicipal da Microregião do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário (CIMASAS) é o primeiro consórcio municipal formado no estado de Minas Gerais, com a finalidade de implantar um aterro sanitário. O CIMASAS tem como objetivo fornecer um tratamento e destino final adequado aos RSD, comerciais (com características domiciliares) e públicos (derivados da limpeza urbana), produzidos pelos municípios que compõem o consórcio. O consórcio é formado pelos municípios de Delfim Moreira, Itajubá, Piranguinho, Piranguçu, São José Alegre e Wenceslau Braz (PMI, 2011).

O CIMASAS atende o artigo 3º da deliberação normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM):

Art. 3º - Para fins de otimização do uso de áreas e redução dos custos de implantação e operação dos sistemas de disposição final de resíduos sólidos, as Prefeituras Municipais deverão dar prioridade à implementação de tais sistemas por meio da constituição de consórcios intermunicipais. (MINAS GERAIS, 2001).

3.2 População e geração de RSU nos municípios do CIMASAS

Segundo o Censo de 2010 (IBGE, 2010) a população total do CIMASAS no ano do referido censo era de 118.424 habitantes, sendo que o município com o maior número de habitantes é o município de Itajubá. A população do CIMASAS

está distribuída em domicílios localizados na região urbana e rural em relação e sexo conforme apresentado nas tabelas 16 e 17.

Tabela 16 – População total do CIMASAS em 2010 e sua distribuição por domicílios.

Municípios do CIMASAS	Total de habitantes	População Urbana		População Rural	
		(total)	(%)	(total)	(%)
Wenceslau Braz	2.553	1.270	49,7	1.283	50,3
São José do Alegre	3.996	2.901	72,6	1.095	27,4
Piranguinho	8.016	4.953	61,8	3.063	38,2
Piranguçu	5.219	1.772	34	3.447	66
Itajubá	90.679	82.785	91,3	7.894	8,7
Delfim Moreira	7.971	3.025	38	4.946	62
Total	118.424	96.706	81,7	21.728	18,3

Fonte: IBGE (2010a).

Tabela 17 – População total do CIMASAS em 2010 e sua distribuição por sexo.

Municípios do CIMASAS	Total de habitantes	Total de Homens		Total de Mulheres	
		(total)	(%)	(total)	(%)
Wenceslau Braz	2.553	1.288	50,5	1.265	49,5
São José do Alegre	3.996	1.976	49,4	2.020	50,6
Piranguinho	8.016	4.066	50,7	3.950	49,3
Piranguçu	5.219	2.703	51,8	2.516	48,2
Itajubá	90.679	44.495	49,1	46.184	50,9
Delfim	7.971	4.187	52,5	3.784	47,5

Moreira					
Total	118.424	58.715	49,6	59.719	50,4

Fonte: IBGE (2010a).

Conforme observado nas tabelas acima, a população do CIMASAS é uma população predominantemente urbana (81,7%) que possui um equilíbrio na relação de homens e mulheres.

A PNSB de 2000 (IBGE, 2002) informou a quantidade de RSU gerado por cada um dos municípios do CIMASAS conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Quantidade de RSU gerados no CIMASAS no ano de 2000.

Municípios do CIMASAS	RSU gerado
	(kg/dia)
Wenceslau Braz	1.000
São José do Alegre	600
Piranguinho	5.000
Piranguçu	1.600
Itajubá	65.000
Delfim Moreira	5.000

Fonte: IBGE (2002).

A partir das tabelas acima, percebe-se que o município de Itajubá é o maior município em números de habitantes e em geração de resíduos. Gonçalves (2007) levantou a composição gravimétrica dos RSD e RSC deste município no ano de 2007. Segundo a autora, a composição dos RSD e RSC é dada conforme das Figuras 13 e 14.

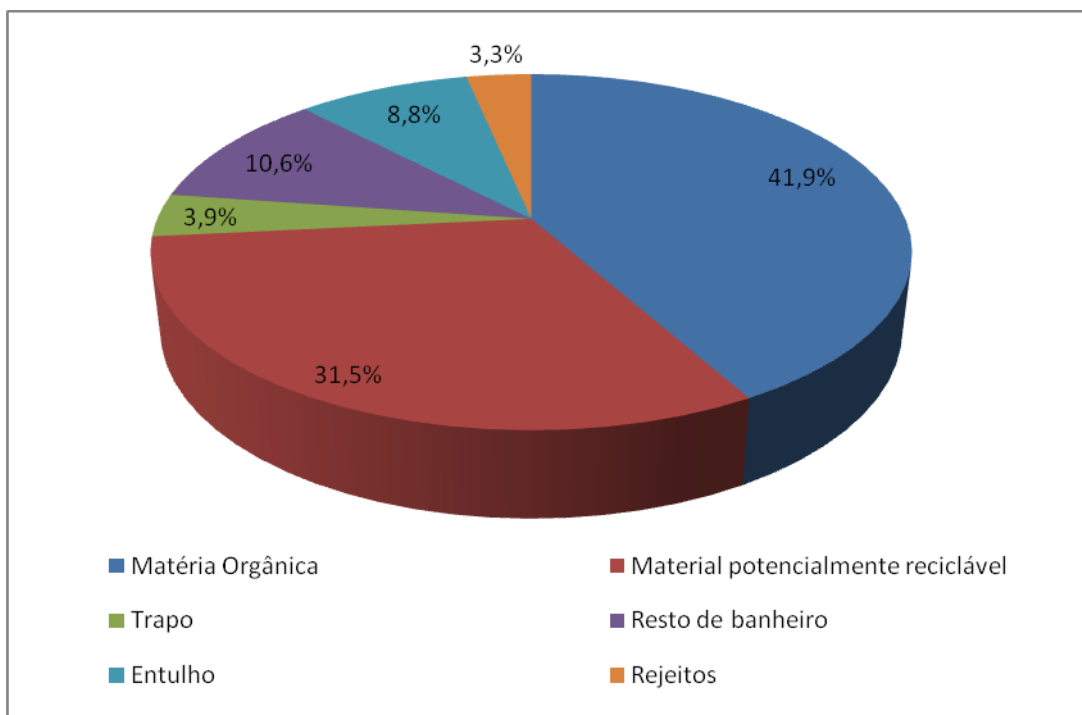


Figura 13 – Composição física dos Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD) do município de Itajubá – MG.

Fonte: Gonçalves (2007).

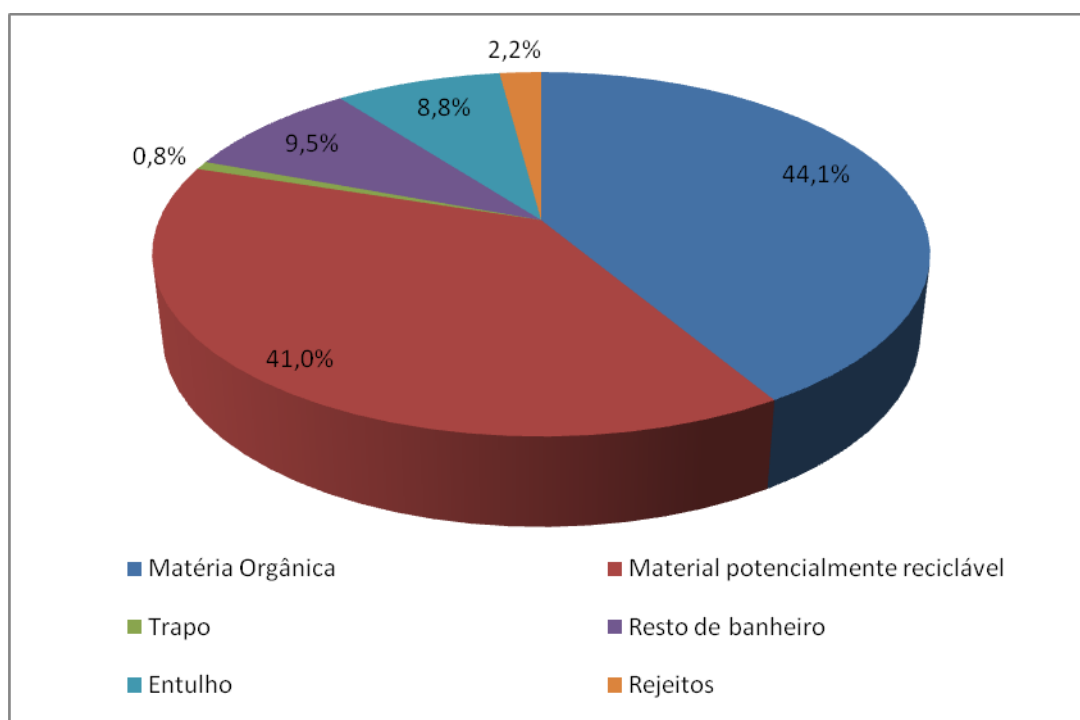


Figura 14 – Composição física dos Resíduos Sólidos Comerciais (RSC) do município de Itajubá – MG.

Fonte: Gonçalves (2007).

3.3 Caracterização do Aterro Sanitário do CIMASAS

O aterro do CIMASAS está localizado no município de Itajubá no bairro Rancho Grande, aproximadamente a 12 km do centro da cidade. O empreendimento foi construído com apoio do governo do Estado e atualmente encontra-se em operação, atendendo cerca de 200 mil pessoas (PMI, 2011).

O aterro conta com quatro edificações localizadas entre a área de várzea e o local de instalação das unidades do aterro sanitário. A área total do terreno é de 56,93 hectares. Dessa área total foi delimitada uma área de 29,95 hectares a ser efetivamente utilizada para a implantação do projeto. O terreno restante, com área de 26,97 hectares, foi definido com área de reserva técnica ou de expansão futura do aterro sanitário. Outra finalidade da área de reserva técnica será a de estocagem de material terroso excedente dos serviços de terraplenagem e a de empréstimo de material terroso, caso seja necessário, para a implantação de etapas posteriores ou para operação do empreendimento (GONÇALVES, 2007).

O local do aterro possui uma cobertura vegetal típica de pastagens em praticamente todo o seu terreno, com exceção da existência de duas matas de eucalipto e de uma mata nativa na porção mais alta do terreno. Foi executado o levantamento planialtimétrico do local a fim de delimitar as áreas de maior interesse para o empreendimento, aproveitando-se, por exemplo, as duas matas de eucaliptos para composição da proteção visual do empreendimento e as áreas com declividades inferiores a 20%, que são as mais indicadas para a implantação de aterros sanitários. Está incluída, também, dentro dos limites da área do empreendimento, toda a área de várzea existente, a fim de se preservar a área de nascentes e de várzea do córrego receptor do efluente tratado, uma vez que essa área se apresenta como área de influência direta do projeto (GONÇALVES, 2007).

O aterro sanitário do município de Itajubá-MG é constituído pelas seguintes unidades:

- ✓ Unidade de aterragem para disposição final dos resíduos sólidos de origem domiciliar e comercial, do lixo séptico gerado nos estabelecimento de saúde do município (exceto aqueles que devem ter tratamento e disposição final específicos, em conformidade com a Resolução CONAMA 358/2005) e das carcaças de animais mortos coletados pela Prefeitura;

- ✓ Edificação de apoio operacional (escritório, varanda, refeitório, vestiário e estacionamento para visitantes);
- ✓ Galpão para guarda e manutenção de veículos e equipamentos;
- ✓ Guarita e balança rodoviária para controle do acesso ao empreendimento;
- ✓ ETE – Estação de Tratamento de Efluentes.

Para operar o aterro sanitário, é necessário, no mínimo, dez funcionários efetivos e seis temporários. Essas unidades foram projetadas para comportar uma vida útil de aproximadamente 20 anos, considerando-se que 100% dos resíduos gerados na sede do município de Itajubá serão encaminhados ao aterro sanitário no decorrer da vida útil projetada. No caso de ampliação das campanhas de coleta seletiva de forma efetiva e abrangente haverá, conseqüentemente, um aumento na vida útil projetada (MONTEIRO & COSTA, 2006).

4. DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

4.1 Tratamento dos dados

Os dados relativos aos RSU dos municípios que compõem o CIMASAS foram retirados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do ano de 2000 e 2008, e comparados com os dados apresentados no Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil do ano de 2008, 2009 e 2010 publicado pela ABRELPE. Já os dados relativos à população dos municípios foram obtidos a partir de consulta à base de dados do IBGE. Entre eles destacam os seguintes:

- Censo demográfico de 2000;
- Contagem Populacional de 2007;
- Censo demográfico de 2010;
- Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2009.

As informações coletadas foram tabuladas em planilhas eletrônicas do software Microsoft® Excel para serem submetidas a um processo de análise, com intuito de selecionar as informações mais coerentes e relevantes para alimentar os modelos e projeções da pesquisa.

As projeções populacionais foram construídas a partir dos dados do IBGE (2002, 2007 e 2010a) e da metodologia de Qasin⁵ (1985, apud SPERLING, 2005). Os valores resultantes desta etapa foram utilizados para dimensionar a geração de RSU do CIMASAS.

As informações relativas aos RSU foram relacionadas com a população do CIMASAS de um determinado período, para serem transformadas em indicadores per capita.

Os dados quantitativos dos RSU estão diretamente relacionados ao desenvolvimento econômico, social e cultural de cada município gerador, por isto não se adotou um mesmo indicador de geração per capita para todos os municípios. Neste sentido, optou-se por analisar a geração RSU dos municípios do CIMASAS

⁵QASIM, S. R. Wastewater treatment plants: planning, design and operation. Holt, Rinehart and Wiston, New York. 1985.

isoladamente, e a partir delas, criar projeções de geração de RSU para cada um dos municípios do consórcio.

A partir do dimensionamento da geração de RSU do CIMASAS, do estudo da caracterização física dos RSU apresentado por Gonçalves (2007) e dos modelos de estimativa de geração de biogás do BM (2003), EPA (2005) e CETESB (2006), construiu-se uma planilha com os possíveis cenários de emissão de biogás.

Após o processo de análise e comparação dos resultados entre os modelos de emissão de biogás, que resultou na exclusão daqueles que apresentaram valores extremos, adotou-se o modelo da EPA, LandGEM - Versão 3.02, para analisar os dados e criar cenários de emissões do metano. E a partir dele, dimensionar a potência elétrica a ser gerada durante a vida útil do aterro.

Em seguida, verificou-se a frequência que ocorreria cada potência durante o período de atividade o aterro. O resultado desta etapa foi um gráfico de permanência de potência por tempo, no qual forneceu informações para gerar um novo gráfico que relaciona o valor da energia gerada pela potência a ser instalada. Ou seja, gerou-se um gráfico de incremento de potência a fim de encontrar o ponto de máximo aproveitamento.

Além da geração de energia, neste estudo também avaliou a viabilidade econômica do projeto, simulando fluxos de caixas considerando a receita da venda de energia para a rede. Esta análise permitiu uma maior sensibilidade da situação do empreendimento.

4.2 Estimativa da população do CIMASAS

A quantidade de habitantes de um município é informação fundamental para o gerenciamento dos RSU. Ela é utilizada para dimensionar o crescimento populacional, e a partir deste ponto, a geração de resíduo.

Utilizando-se os dados dos censos demográficos (IBGE, 2000 e 2010a), a contagem populacional do IBGE (IBGE, 2007) (Tabela 19), e a metodologia de Qasim (1985 apud SPERLING, 2005) (Tabela 20) criou-se a projeção populacional para os municípios do CIMASAS para o período de 20 anos.

Tabela 19 – Dados do Censo demográfico de 2000, 2010 e Contagem Populacional de 2007 dos municípios do CIMASAS.

Municípios do CIMASAS	Habitantes		
	2000	2007	2010
Wenceslau Braz	2.596	2.509	2.553
São José do	3.802	3.908	3.996
Piranguinho	7.399	7.849	8.016
Piranguçu	4.974	5.113	5.209
Itajubá	84.135	86.673	90.679
Delfim Moreira	8.032	7.834	7.971
Total	110.938	113.886	118.424

Fonte: IBGE (2000, 2007 e 2010a).

Tabela 20 – Projeção Populacional. Método com bases em fórmulas matemáticas.

Método	Taxa de crescimento	Fórmula da projeção	Coefficientes (caso não seja realizada análise de regressão)
Projeção aritmética	$\frac{dP}{dt} = k_a$	$P_t = P_0 + K_a \cdot (t - t_0)$	$K_a = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0}$
Projeção geométrica	$\frac{dP}{dt} = K_g \cdot P$	$P_t = P_0 \cdot e^{K_g \cdot (t - t_0)}$ ou $P_t = P_0 \cdot (1 + i)^{(t - t_0)}$	$K_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_0}{t_2 - t_0}$ ou $i = e^{K_g} - 1$

**Taxa
decrecente
de
crescimento**

$$\frac{dP}{dt} = K_d \cdot (P_s - P)$$

$$P_t = P_0 + (P_s - P_0) \cdot \left[1 - e^{-K_d \cdot (t - t_0)} \right]$$

$$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2}$$

$$K_d = \frac{-\ln\left[\frac{(P_s - P_2)}{(P_s - P_0)}\right]}{t_2 - t_0}$$

**Crescimento
logístico**

$$\frac{dP}{dt} = K_1 \cdot P \cdot \left(\frac{P_s - P}{P_s} \right)$$

$$P_t = \frac{P_s}{1 + e^{-K_1 \cdot (t - t_0)}}$$

$$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2}$$

$$c = (P_s - P_0) / P_0$$

$$K_d = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left[\frac{P_0 (P_s - P_1)}{P_1 (P_s - P_0)} \right]$$

Fonte: Qasim (1985 apud SPERLING, 2005).

Onde:

dP/dt = taxa de crescimento da população em função do tempo;

P_0, P_1 e P_2 = população nos anos t_0, t_1 e t_2 (as fórmulas para taxa decrescente e crescimento logístico exigem valores eqüidistantes, caso não sejam baseadas na análise de regressão (hab.);

P_1 = população estimada no ano t (hab.);

P_s = população de saturação (hab.);

K_0, K_g, K_d, K_i, i, c = coeficientes (a obtenção dos coeficientes pela análise de regressão é preferível, já que se pode utilizar toda a série de dados existentes e não apenas P_0, P_1 e P_2).

Adotou-se a taxa anual Decrescente de Crescimento como parâmetro todos os municípios do CIMASAS. Esta taxa preconiza que à medida em que a cidade cresce, a taxa de crescimento torna-se menor. A população tende assintoticamente a um valor de saturação.

4.3 Estimativa de geração de RSU no CIMASAS

Dado o número de habitantes dos municípios consorciados no ano de 2000 e a quantidade de resíduos gerados no mesmo período (IBGE, 2000; 2002), calculou-

se a taxa de geração de resíduo per capita para cada município integrante do consórcio, conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 – Geração de RSU per capita do CIMASAS ano de 2000.

Municípios do CIMASAS	Lixo/dia	População	Geração RSU per capita
	(kg)	(habitantes)	(kg/hab/dia)
Wenceslau Braz	1.000	2.596	0,39
São José do Alegre	600	3.802	0,16
Piranguinho	5.000	7.399	0,68
Piranguçu	1.600	4.974	0,32
Itajubá	65.000	84.135	0,77
Delfim Moreira	5.000	8.032	0,62

Fonte: Adaptado de IBGE (2000 e 2002).

Os indicadores per capita encontrados na Tabela 21 foram comparados com os indicadores apresentados pela ABRELPE (2009, 2010 e 2011) a fim de corrigir e determinar um indicador mais próximo da realidade atual dos municípios, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 – Taxa de geração de RSU per capita do CIMASAS atual (admitido).

	Lixo per capita (kg/hab/dia)				Crescimento da taxa de geração dos RSU (anual)
	2000	2008	2009	2010	
Minas Gerais	-----	0,73	0,91	1,02	1,15%
Wenceslau Braz	0,39				1%
São José do Alegre	0,16				1%
Piranguinho	0,68				1%
Piranguçu	0,32				1%

Itajubá	0,77	0,64	1%
Delfim Moreira	0,62		

Fonte: Adaptado de IBGE (2002) e ABRELPE (2009, 2010 e 2011).

Com base nos dados da ABRELPE (2009, 2010 e 2011) a geração de RSU no estado de Minas Gerais cresceu em média 1, 15% ao ano. Por isso, admitiu que a taxa de crescimento do indicador per capita da geração dos RSU no CIMASAS foi de 1% ao ano para cada um dos municípios.

O produto da geração per capita e do número de habitantes do CIMASAS (eq. 14) resulta na quantidade de resíduos gerados em um determinado período, sendo assim, é possível estimar quanto de RSU o aterro irá receber ao longo de sua vida útil.

$$P_{d(A)} = \left(\frac{Pop_i \cdot p \cdot R}{1000} \right) \quad (14)$$

Onde:

$P_{d(A)}$ = produção diária média de lixo (ton./dia);

Pop_i = População no ano considerado;

p = produção per capita (kg/hab./dia);

R = percentual de resíduos aterrados (%) (neste caso, admitiu-se que 100% dos resíduos serão dispostos no aterro sanitário).

4.4 Modelos de estimativa de geração de biogás

Os modelos selecionados para estimar a quantidade de biogás a ser gerado no aterro foram os do BM (2003), LandGEM da EPA (2005), e o Biogás da CETESB (2006).

Os modelos foram alimentados com os dados das projeções populacionais e com as estimativas de geração de resíduos dos municípios do CIMASAS, ano a ano. Considerou que o serviço de coleta de RSU atenda integralmente a região e que todo RSU gerado é destinado ao aterro.

Entre os modelos selecionados, somente o *software* Biogás da CETESB leva em consideração a dificuldade de captura do biogás produzido no aterro. No entanto, para corrigir esta distorção nos demais modelos, considerou que 80% do biogás produzido será coletado e utilizado.

A fim de comparar os resultados dos modelos adotou-se os seguintes dados de entradas como padrão:

- Potencial de geração de metano (L_0) : 170 m³/ton. de resíduo ou 0,17 m³/kgRSU;
- Taxa de geração do metano (k) : 0,05;
- Data de início : 2010;
- Data de término : 2029
- Fração do metano no biogás : 50%;
- Eficiência da coleta : 80%;
- Eficiência do flare : 100%.

4.5 Dimensionamento da energia gerada

O cálculo para estimar a geração de energia a partir do biogás de aterro é uma relação entre: a quantidade de gás metano capturado pelo sistema de extração, poder calorífico do gás metano e pela eficiência do grupo gerador. A equação 15 exemplifica esta relação.

$$P = Q \cdot PC_i \cdot n \cdot FC \quad (15)$$

Onde:

P = Potência disponível a cada ano (kW);

Q = Vazão do metano a cada ano (m³ de CH₄);

PC_i = poder calorífico do metano (kWh/m³);

n = eficiência da planta (%);

FC = Fator de Capacidade (%).

A Tabela 23 apresenta os valores considerados para o cálculo da potência.

Tabela 23 – Parametros para calculo de geração de energia.

Parametros	Valor/ unidade	Fonte
PC _i do metano	10,5 kWh/m ³ CH ₄	LMOP (2011)
Eficiência da planta (Motor de Combustão Interna)	33%	EPA (1996)
Fator de capacidade	85%	Muylaert et al. (2001)

4.6 Dimensionamento da Potência Ótima

Para dimensionar a potência da central térmica a ser instalada é necessário verificar a frequência da vazão do metano ano a ano, e posteriormente, converter a quantidade de metano em energia. Para isto, utilizou a curva de duração.

A curva de duração é na realidade um histograma de frequências, que também é conhecida como curva de permanência. Ela representa de forma compacta todos os dados históricos de um determinado assunto. A curva de duração pode ser construída utilizando como base de dados às vazões médias diárias, mensais ou anuais de emissão de metano. A figura 13b exemplifica a curva de duração de emissão de metano no aterro do CIMASAS. Ela fornece a porcentagem de tempo para a qual um determinado valor de vazão ocorre.

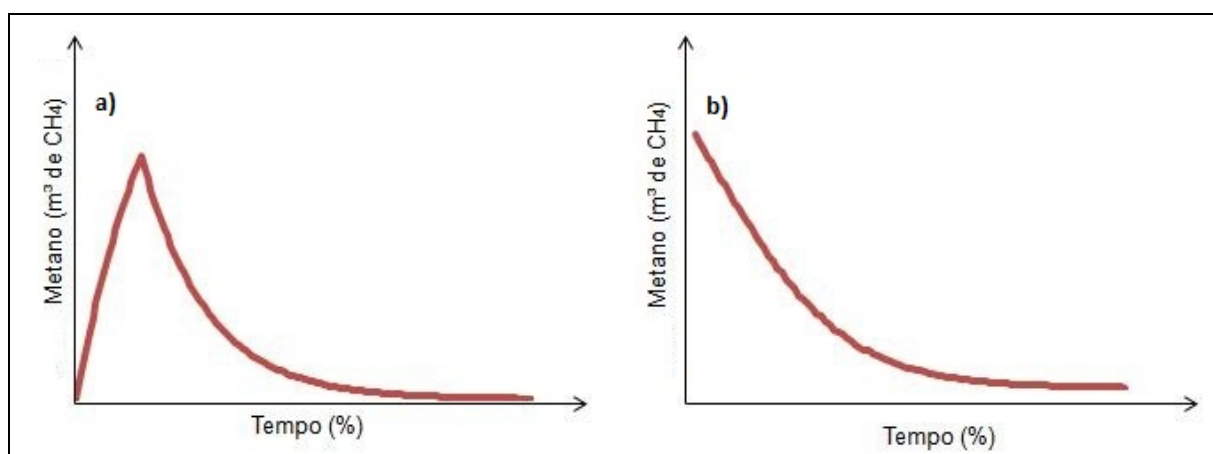


Figura 15 – a) Curva de vazão do metano; b) Curva de duração da vazão do metano.

Usando os dados da curva de permanência, como apresentado anteriormente, pode-se obter uma nova curva, que é a chamada “curva de energia”. A curva de energia (Figura 16) representa de forma percentual, o período em que determinadas potências ocorrem ao longo do período de tempo estudado.

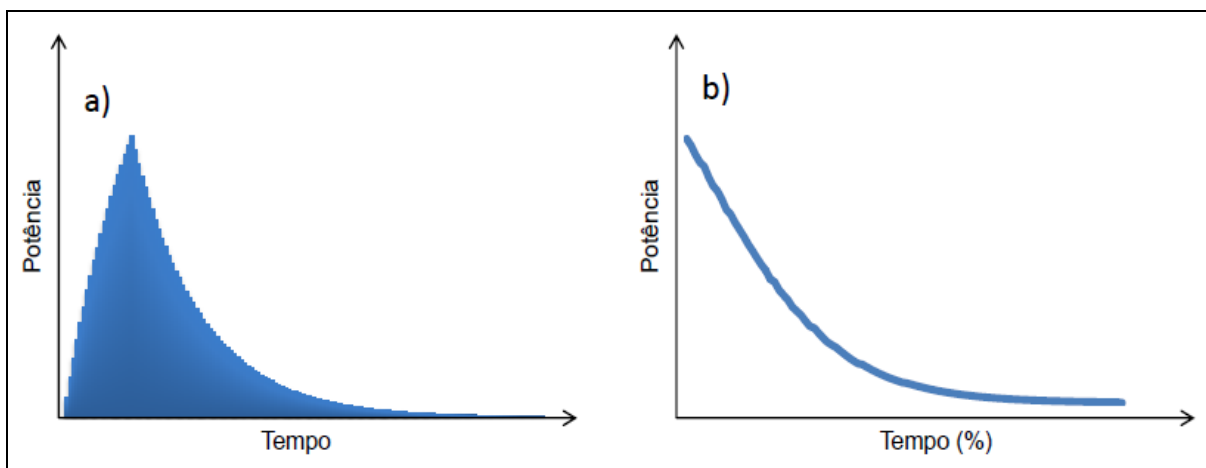


Figura 16 – Curva de energia.

Dessa forma, a partir da curva de energia, (Figura 16), torna-se possível determinar a energia média gerada. Considerando que para uma determinada potência instalada a energia gerada corresponderá à área sobre essa ordenada delimitada pela curva de permanência. Assim, ao se instalar uma central termoelétrica com a potência P_1 a energia gerada será S_1 , conforme apresentado na Figura 17.

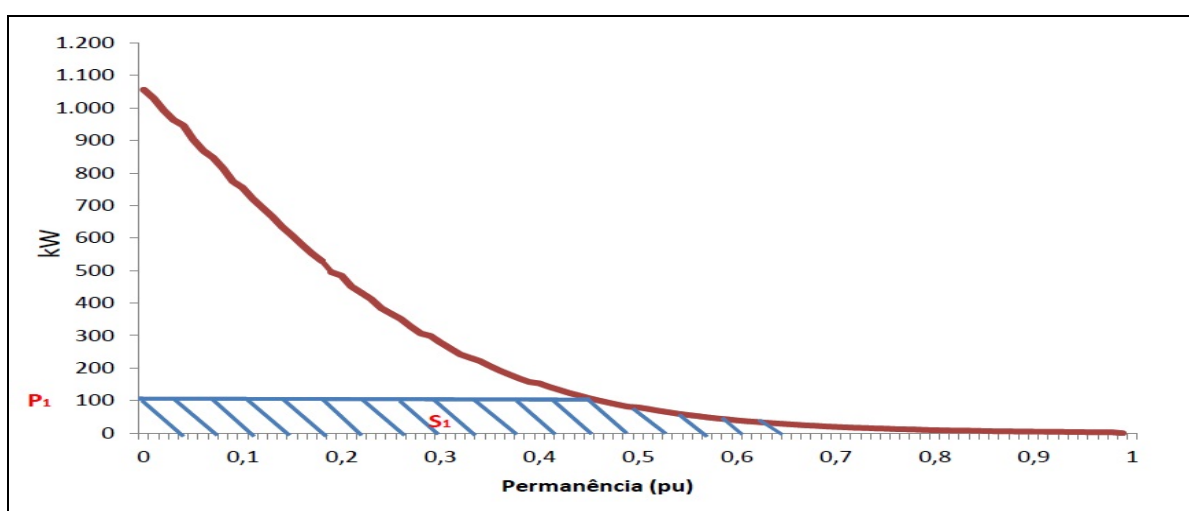


Figura 17 – Demonstração da energia gerada por uma determinada potência do aterro.

Logo, se o valor da potência instalada for incrementado de intervalos regulares, partindo-se do zero até a potência máxima possível de ser gerada que neste caso será quando ocorrer a emissão máxima de biogás no aterro, levanta-se a incremento da energia média que pode ser gerada pela central. O resultado para o caso em estudo é apresentado na Figura 18.

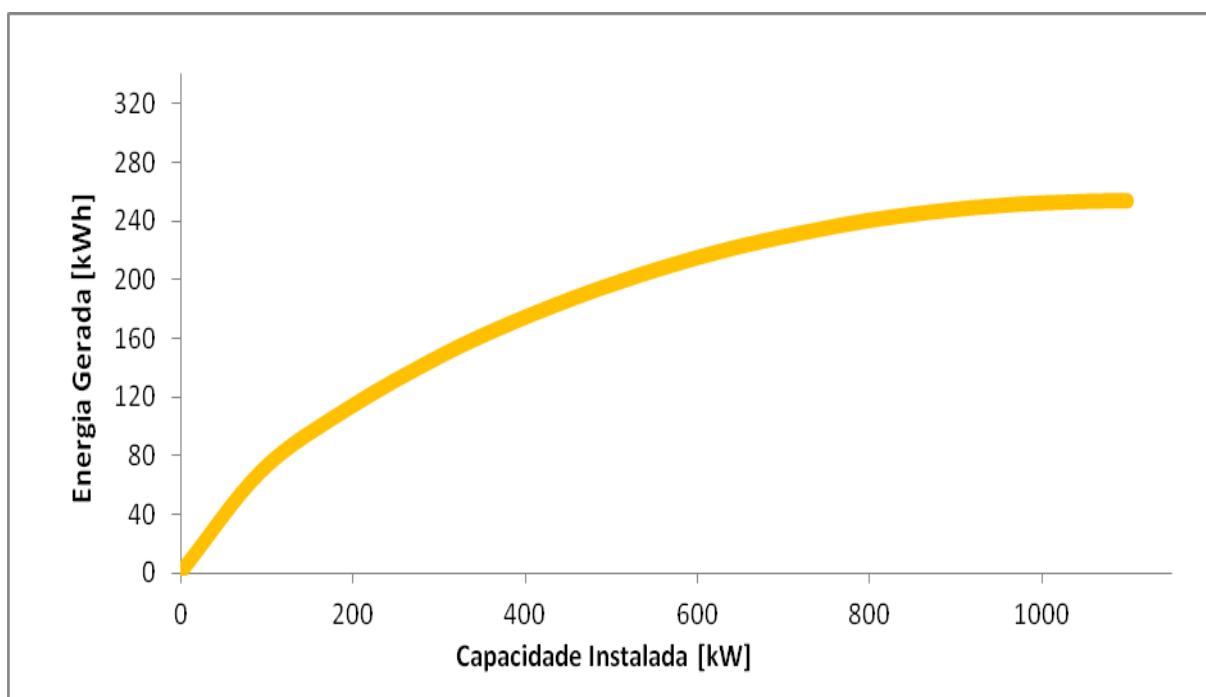


Figura 18 – Curva da Energia Média gerada em função da potência instalada na central.

A curva de energia obtida permite analisar o fator de capacidade resultante da potência instalada.

4.7 Análise Econômica

A partir dos valores dos custos de implantação e operação do empreendimento (custos com pessoal, equipamentos e custo de operação e manutenção), das receitas da venda da energia gerada para um consumidor e da venda de certificados de redução de emissão de carbobo por meio do MDL, criou-se simulações de fluxo de caixa (Figura 19) a fim de verificar a viabilidade do empreendimento.

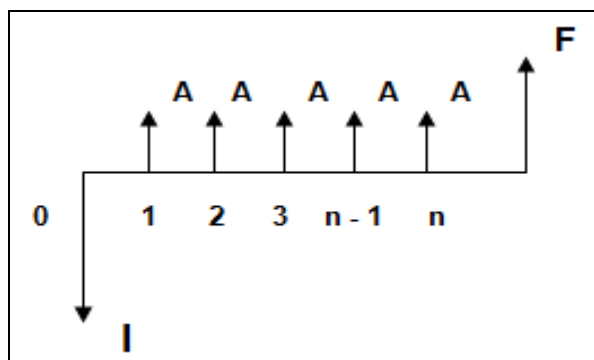


Figura 19 – Exemplificação do Fluxo de Caixa.

Para verificar a viabilidade econômica do empreendimento analisou-se o fluxo de caixa por meio do método do Valor Presente Líquido (VPL), da taxa interna de retorno (TIR) e pelo Máximo Benefício Líquido (MBL). O primeiro método caracteriza-se pela transferência, para o instante presente, de todas as variações de caixa esperadas, descontadas à taxa mínima de atratividade, ou seja, seria o transporte para a data zero de um diagrama de fluxos de caixa (representação gráfica do conjunto de entradas (receitas) e saídas (despesas) relativo a um certo intervalo de tempo), de todos os recebimentos e desembolsos esperados, descontados à taxa de juros considerada (12% ao ano). Neste método se o valor presente for positivo, a proposta de investimento é atrativa, e quanto maior o valor positivo, mais atrativa é a proposta.

No segundo método, a TIR, é a taxa de juros que zera o valor líquido presente do empreendimento. Esta é a taxa de juros que torna equivalente o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente, ou seja, é a taxa que torna nulo o valor presente líquido do projeto dentro de um período de tempo estipulado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estimativas da População do CIMASAS

A partir dos dados do IBGE (2000, 2007 e 2010a) e da metodologia apresentada na Tabela 20, construiu-se a projeção populacional para todos os municípios a fim de verificar qual taxa de crescimento apresentaria valores mais coerentes para este estudo. A Figura 20 apresenta as projeções populacionais de todos os municípios integrantes do consórcio. Como observado na figura 20, com exceção dos municípios de Delfim Moreira e Wenceslau Braz, as demais projeções comportaram-se de forma semelhantes (Ver projeções nos Anexos).

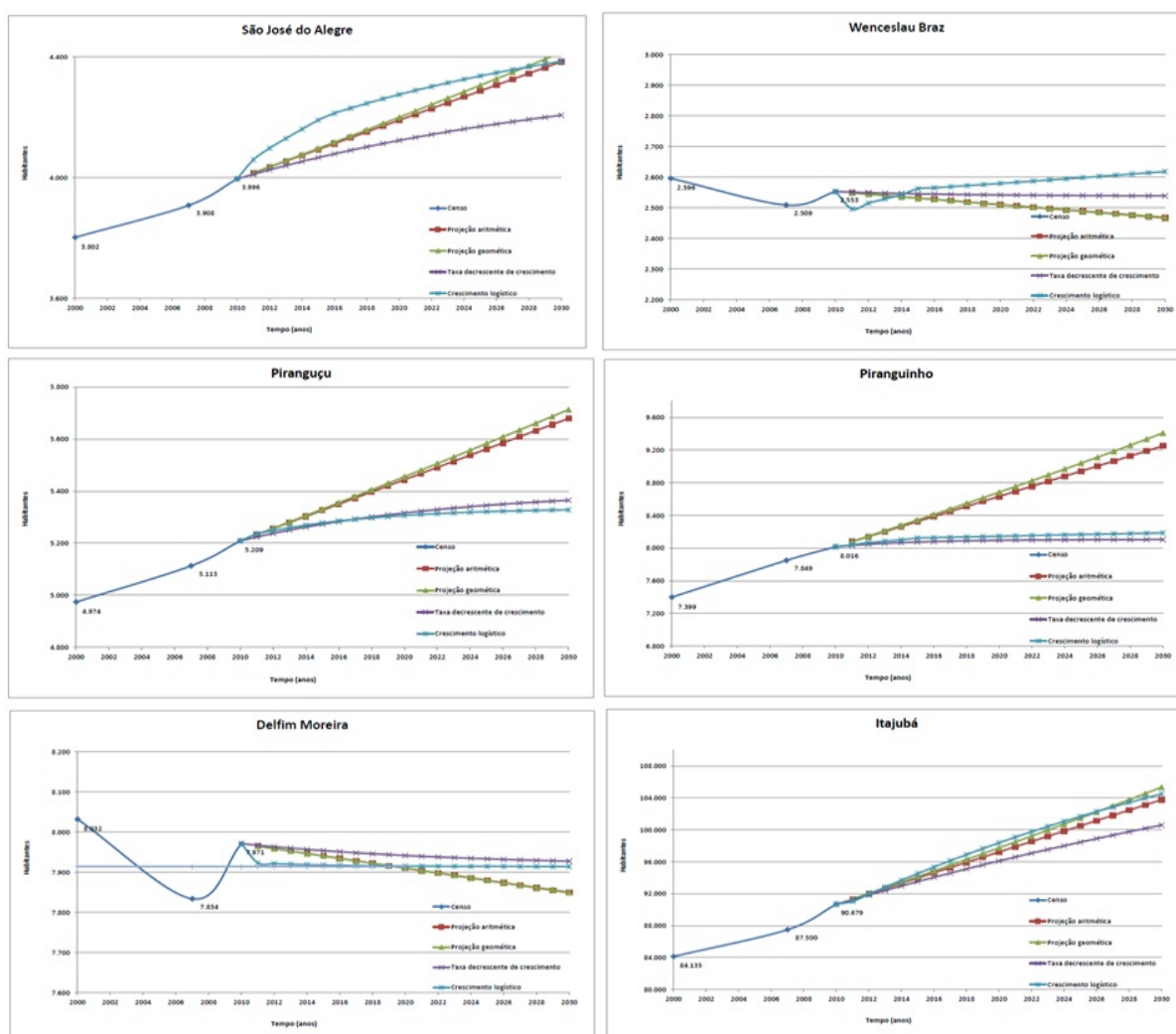


Figura 20 – Projeções Populacionais dos Municípios do CIMASAS.

Os valores obtidos a partir da taxa de decrescimento de crescimento apresentaram-se inferiores em relação as demais taxas. No entanto, adotou-se tal taxa, a fim de trabalhar com valores conservadores.

Aplicando a taxa decrescimento de crescimento em todos os municípios do CIMASAS, obtém-se a projeção populacional para o consórcio no período selecionado, conforme apresentado na Figura 21 e na Tabela 24.

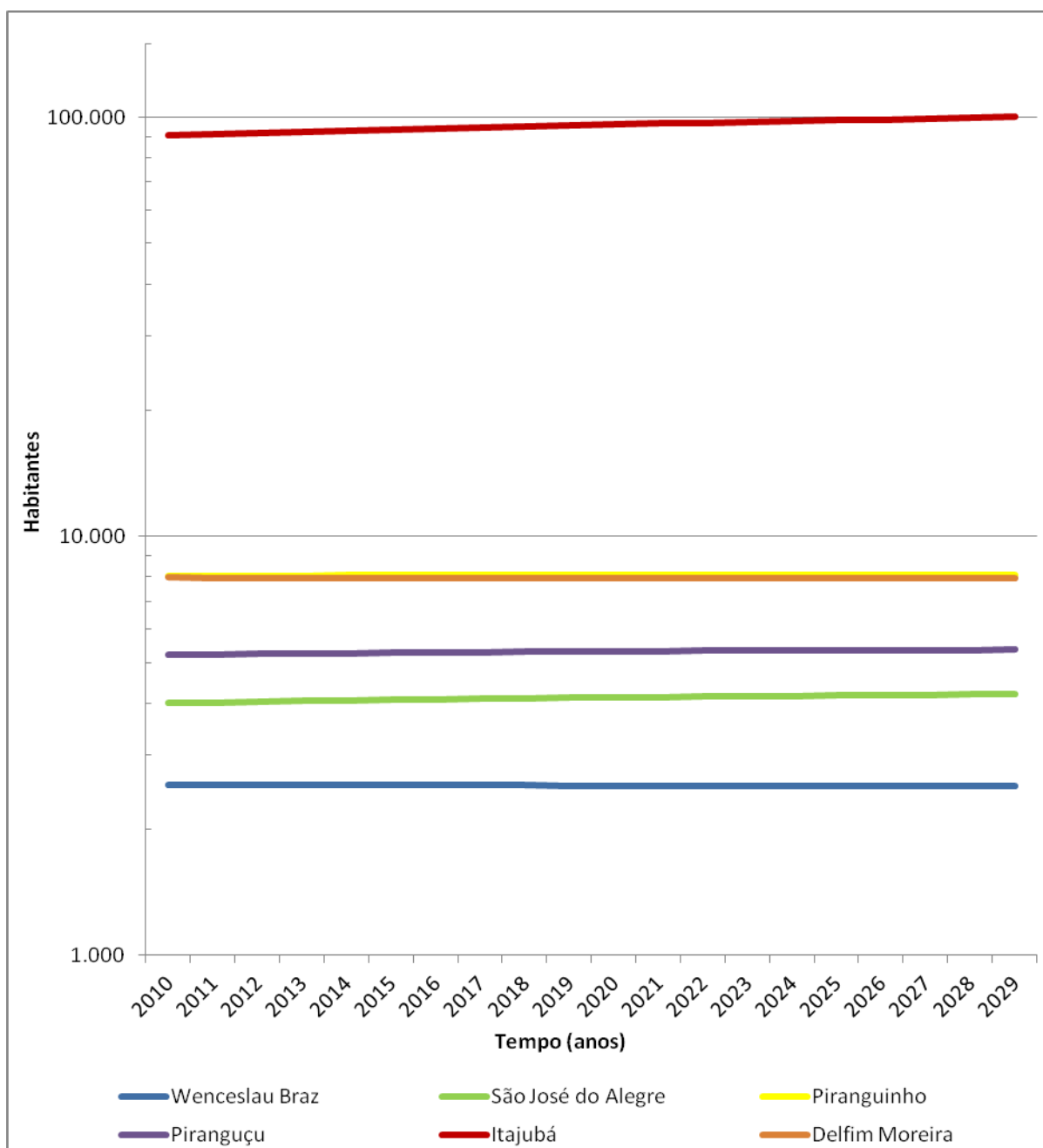


Figura 21 – Gráfico das Projeções Populacionais dos Municípios do CIMASAS.

Tabela 24 – Projeção Populacional do CIMASAS.

Anos	Wenceslau Braz	São José do Alegre	Piranguinho	Piranguçu	Itajubá	Delfim Moreira	Total
2010	2.553	3.996	8.016	5.209	90.679	7.971	118.424
2011	2.551	4.011	8.033	5.224	91.268	7.967	119.054
2012	2.549	4.026	8.046	5.238	91.846	7.963	119.669
2013	2.548	4.040	8.057	5.250	92.413	7.960	120.269
2014	2.547	4.053	8.066	5.262	92.970	7.957	120.855
2015	2.546	4.066	8.074	5.273	93.516	7.954	121.428
2016	2.545	4.079	8.080	5.283	94.052	7.951	121.989
2017	2.544	4.091	8.085	5.292	94.578	7.948	122.538
2018	2.543	4.102	8.089	5.301	95.094	7.946	123.075
2019	2.542	4.113	8.092	5.309	95.601	7.944	123.600
2020	2.542	4.123	8.094	5.316	96.098	7.942	124.115
2021	2.541	4.133	8.097	5.323	96.586	7.940	124.619
2022	2.541	4.143	8.098	5.329	97.065	7.938	125.113
2023	2.541	4.152	8.100	5.335	97.534	7.936	125.598
2024	2.540	4.161	8.101	5.340	97.995	7.935	126.072
2025	2.540	4.169	8.102	5.345	98.448	7.933	126.537
2026	2.540	4.177	8.103	5.350	98.891	7.932	126.993
2027	2.539	4.185	8.103	5.354	99.327	7.931	127.439
2028	2.539	4.193	8.104	5.358	99.754	7.929	127.877
2029	2.539	4.200	8.104	5.361	100.174	7.928	128.307

Percebe-se na Tabela 24 um leve decréscimo na população dos municípios de Delfim Moreira e Wenceslau Braz, isto ocorre pelo fato das projeções populacionais seguirem as tendências indicadas nos censos destes municípios. Em vinte anos, o município de Delfim Moreira que possuía 7.971 habitantes, irá passar a ter 7.928, e Wenceslau Braz vai de 2.553 para 2.539 habitantes. Uma possível

explicação para este fenômeno é o fato da população procurar melhores condições de vida em cidades maiores e próximas, como o município de Itajubá.

A contribuição dos municípios de Piranguçu, Piranguinho e São José do Alegre é praticamente inexpressiva em relação ao crescimento de Itajubá. Municípios que em vinte anos irão aumentar sua população em mais de 10.000 habitantes. Este crescimento já é esperado, pois o município é o maior em número de habitantes entre os demais, representando a cerca de 77% (Figura 22) do total da população do consórcio.

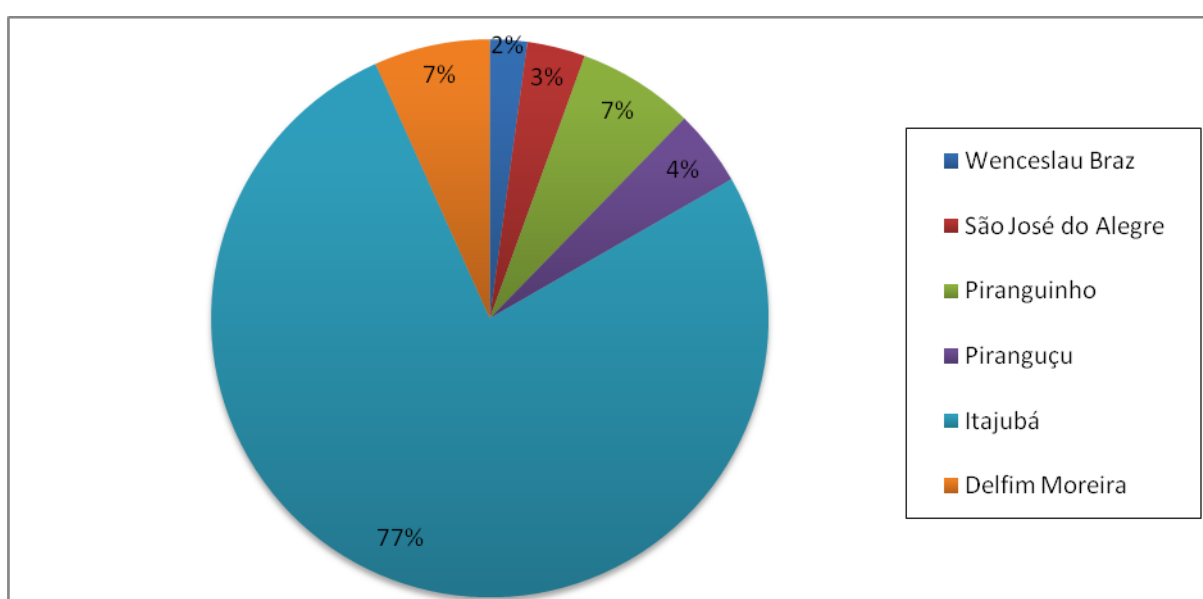


Figura 22 – Participação dos Municípios por número de habitantes no CIMASAS.

O município de Itajubá nos últimos dez anos cresceu em número de habitantes aproximadamente 0,75% ao ano. Os demais municípios que apresentaram um crescimento populacional (São José do Alegre, Piranguinho e Piranguçu) no mesmo período, apresentaram um taxa de crescimento de 0,4; 0,8 e 0,4% respectivamente. No geral, a tendência de crescimento populacional no CIMASAS é positiva conforme evidenciado na Figura 23.

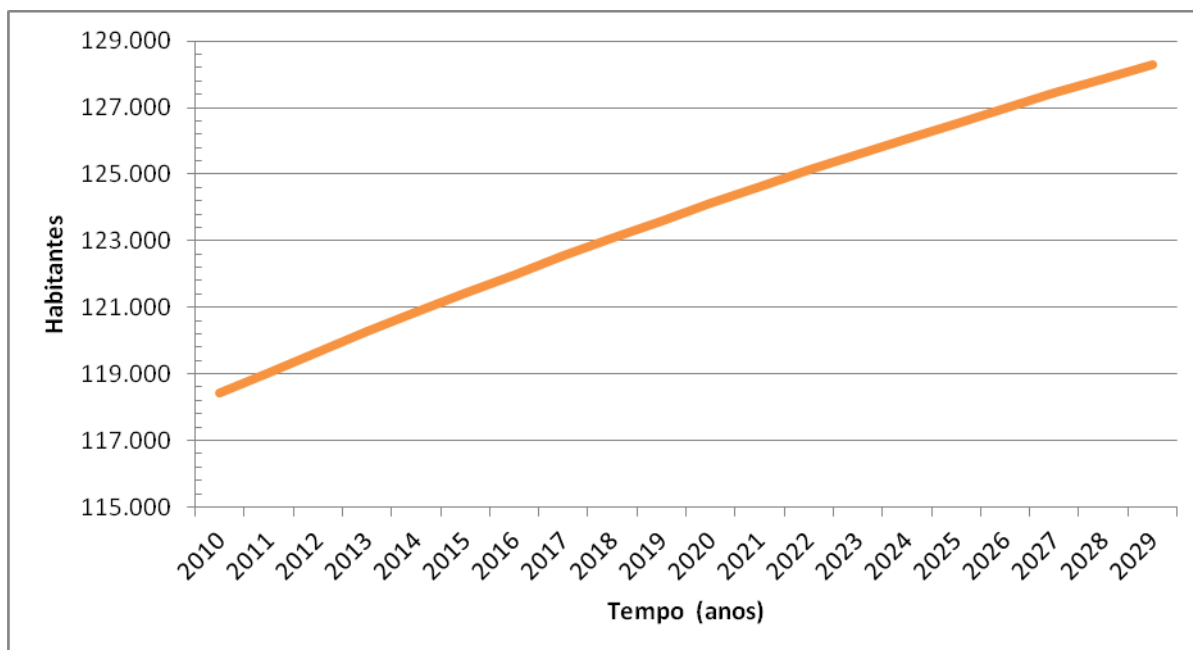


Figura 23 – Projeção Populacional total do CIMASAS.

Ao longo de vinte anos, percebe-se um crescimento populacional modesto no CIMASAS.

5.2 Estimativa de geração de RSU no CIMASAS

Conforme apresentado na Tabela 21, Itajubá é o município que possui o maior índice de geração de resíduo per capita. Isto está relacionado ao Produto Interno Bruto (PIB) e ao seu Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), de acordo com a Tabela 25.

Tabela 25 – PIB per capita a preços correntes e IDH dos municípios.

Municípios do CIMASAS	Geração RSU per capita	PIB per capita	IDH
	(kg/hab/dia)	(2008)	(2000)
Wenceslau Braz	0,39	R\$ 5.736,72	0,743
São José do Alegre	0,16	R\$ 5.742,33	0,756
Piranguinho	0,68	R\$ 5.348,84	0,757
Piranguçu	0,32	R\$ 6.267,01	0,734

Itajubá	0,77	R\$ 14.468,22	0,815
Delfim Moreira	0,62	R\$ 4.689,04	0,72

Fonte: IBGE (2008) e PNUD (2003).

Observa-se na tabela acima que os municípios de São José do Alegre, Wenceslau Braz e Piranguçu apresentaram valores de geração de resíduo per capita muito menor que os demais. Esses valores ficaram abaixo da média de geração per capita de lixo Nacional e do Estado de Minas Gerais, por isto, foram desconsiderados e adotado um valor médio entre os municípios do consórcio.

Outro fator que explica o elevado índice de geração per capita de RSU em Itajubá, é por ser local de referência cultural, comercial, industrial e de assistência médica para os municípios circundantes. A população dos municípios vizinhos, durante o período do dia se desloca para o município de Itajubá para realizar diversas atividades do cotidiano (estudo, compras, consulta médica e trabalho), em virtude disto, a taxa de geração de lixo do município sofre uma elevação, pois são mais pessoas consumindo e descartando mais produtos.

A partir do índice de geração de RSU per capita dos municípios, encontrou-se a quantidade de RSU/dia gerados no período de atividade do aterro por cada um dos municípios consorciados, conforme apresentado nas Figura 24 e Figura 25.

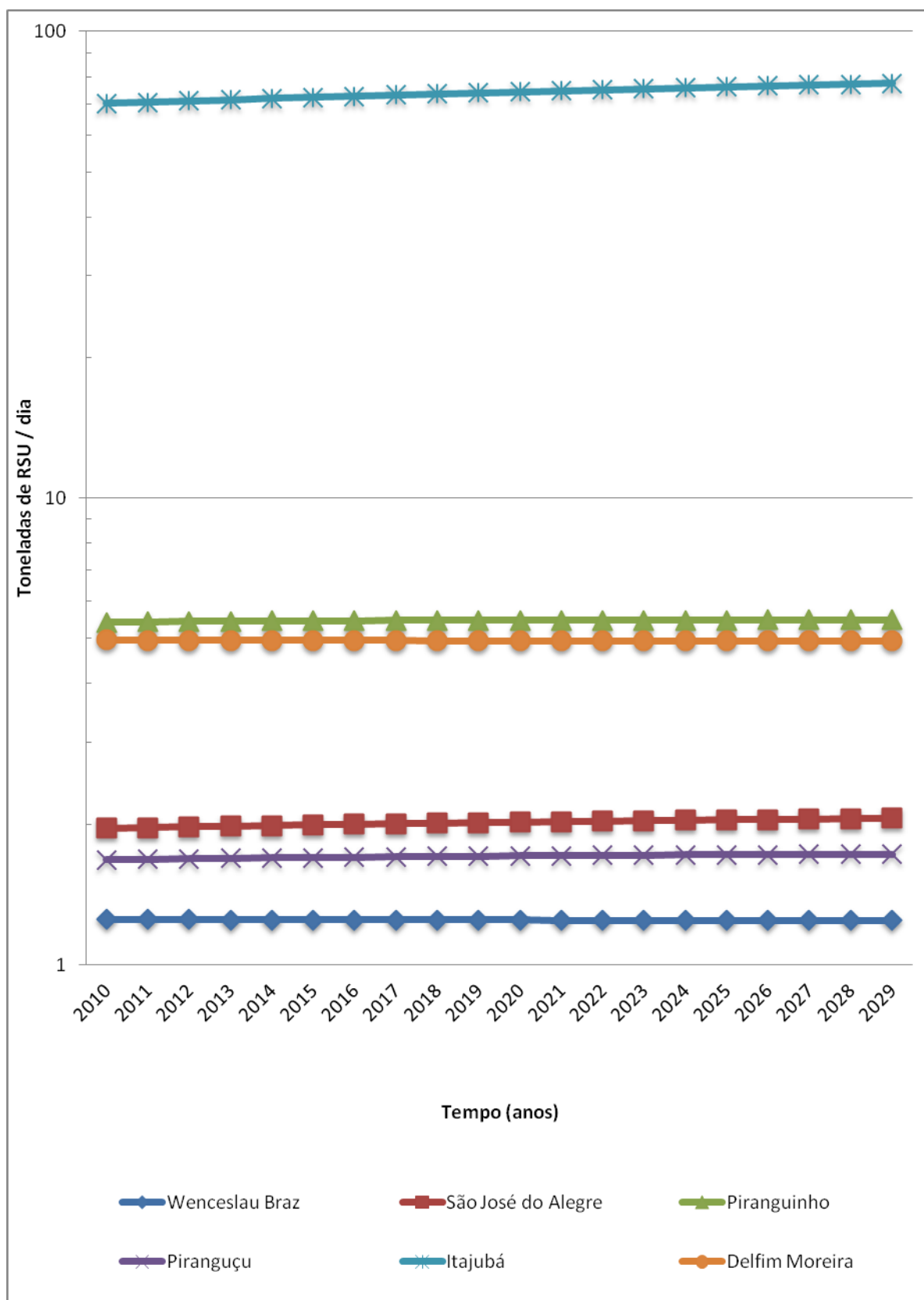


Figura 24 – Geração de RSU por município/dia.

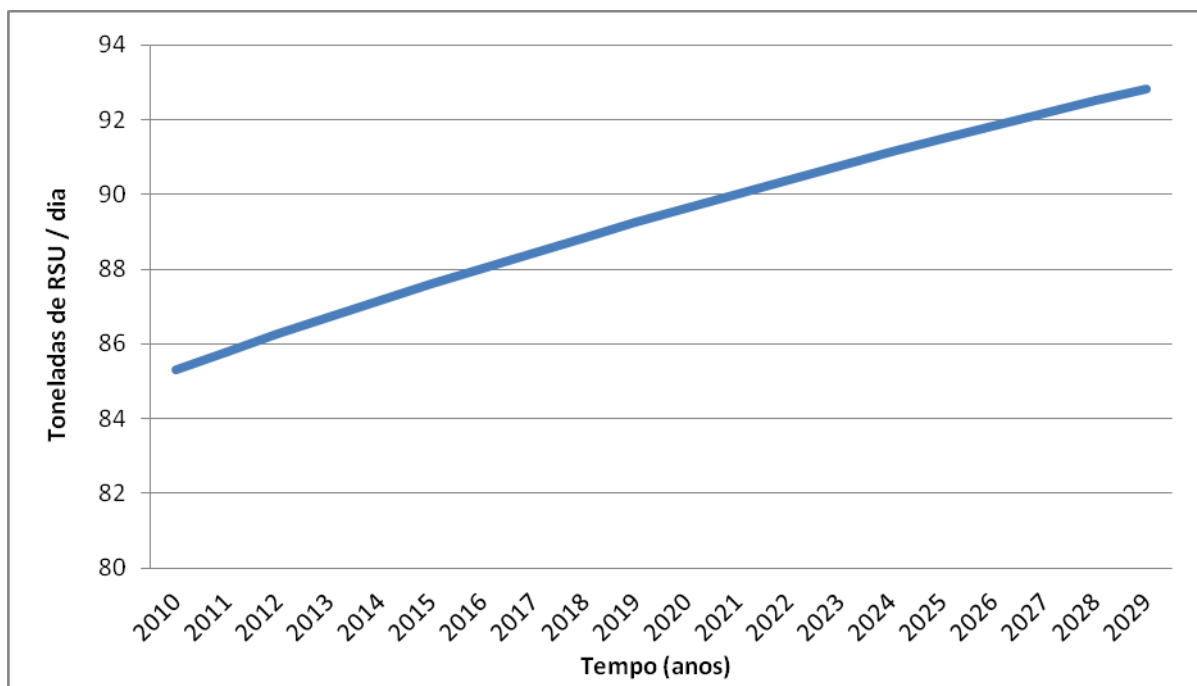


Figura 25 – Geração diária de RSU total do CIMASAS.

Ao longo de vinte anos o CIMASAS irá gerar cerca de 90 toneladas de lixo/dia. Considerando que a coleta do consócio atenda integralmente a região, o aterro de Itajubá deverá receber mais de 650.000 toneladas de RSU em vinte anos.

5.3 Modelos de geração de biogás

5.3.1 BANCO MUNDIAL

A equação 3 foi alimentada com as estimativas da população e da geração de RSU do CIMASAS, juntamente com os parâmetros de entrada dos modelos de emissão de biogás selecionados, obtendo assim o resultado apresentado na Figura 26.

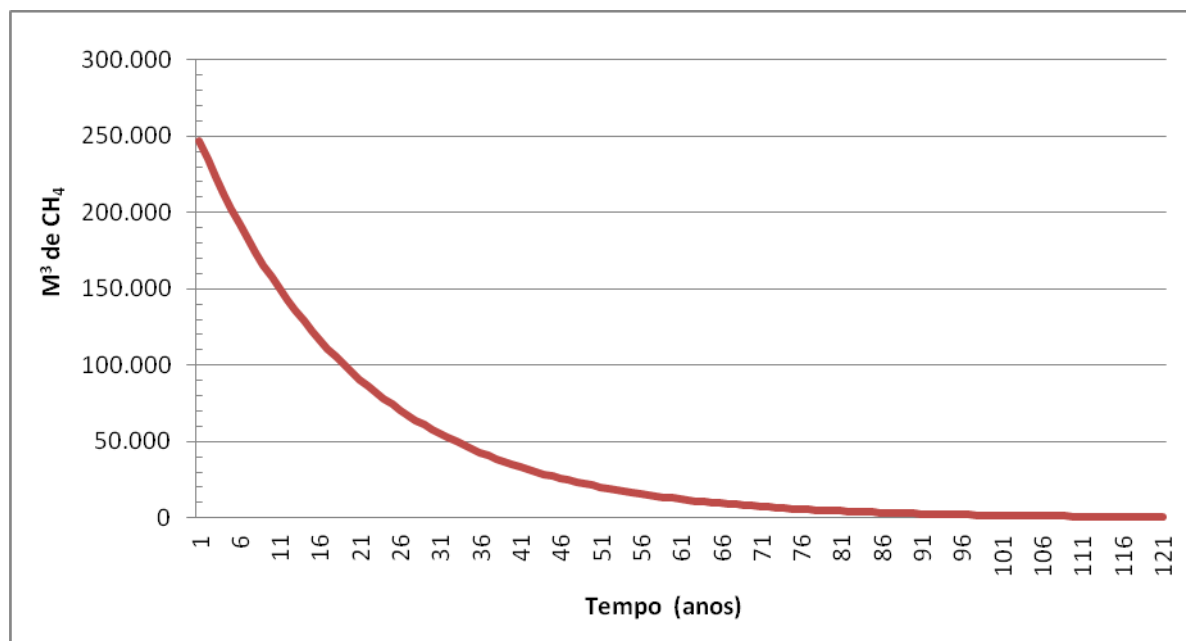


Figura 26 – Emissão de CH₄ referente a massa de RSU depositada no primeiro ano do aterro.

Observa-se no gráfico acima que a curva de geração de metano está decrescendo com o passar do tempo, isto ocorre devido à degradação da matéria orgânica contida nos RSU. O valor da geração do metano tende a diminuir conforme a parte orgânica dos RSU sofre o processo de digestão anaeróbia.

No entanto, este modelo somente indica a emissão de metano referente à massa de RSU depositada no ano indicado. Ou seja, para cada ano de vida do aterro, é necessário aplicar a equação (3), somando o resultado da mesma com o valor residual da emissão do ano anterior, que também foi encontrada a partir da mesma equação. Para mensurar o total de metano gerado do período da vida útil do aterro é necessário somar ano a ano as emissões ocorridas conforme apresentado no gráfico da Figura 27.

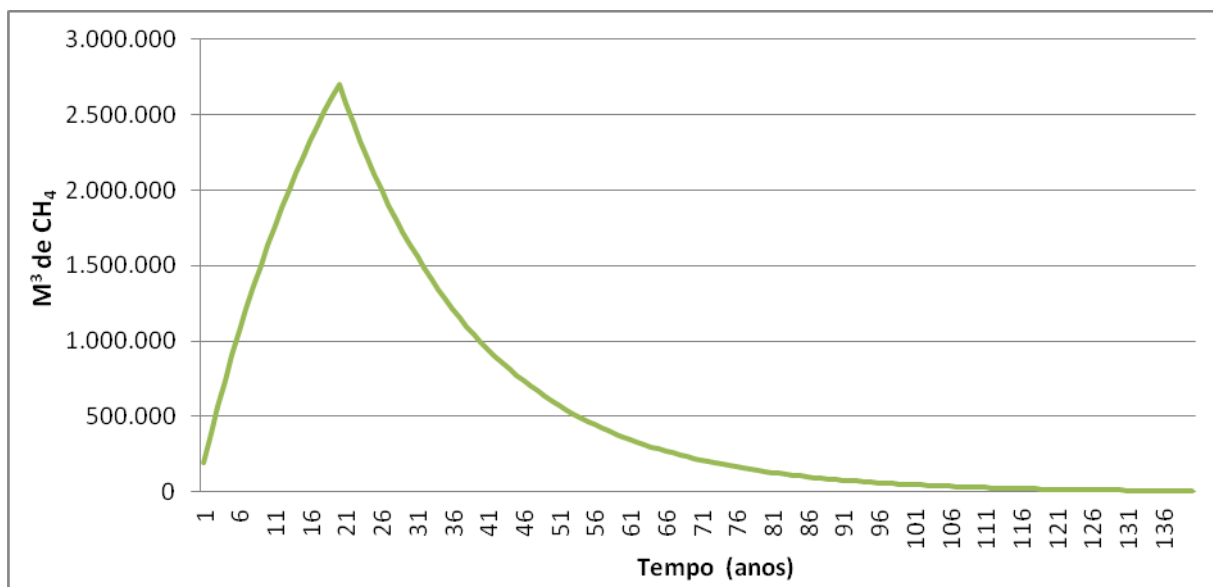


Figura 27 – Somatório das emissões de CH₄ ao longo da vida útil do aterro segundo o modelo do Banco Mundial.

5.3.2 LandGEM

A ferramenta LandGEM já fornece os dados de emissão de metano acumulado durante o período selecionado, não necessitando de realizar o somatório ano a ano. Informando os mesmos dados de entrada utilizados no modelo do BM no LandGEM, obtém-se o seguinte resultado (Figura 28).

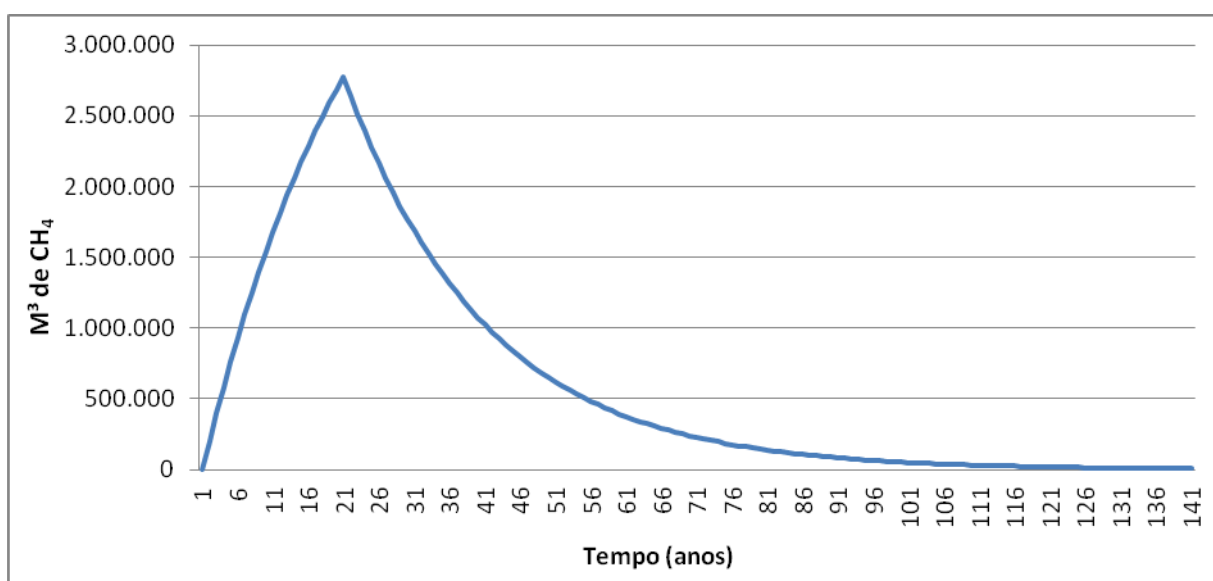


Figura 28 – Emissões de CH₄ ao longo da vida útil do aterro segundo o LandGEM.

Observando a Figura 28 percebe-se que o LandGEM considera que a emissão de metano somente começará após o fim do primeiro ano de deposição da massa de RSU. Diferentemente do modelo do Banco Mundial que considera a emissão do RSU depositado ao longo do primeiro ano.

A curva de geração de metano deste modelo é deslocada no eixo x do gráfico em um ano para frente, consequentemente o ápice da curva da geração de metano será deslocado em um ano para frente também.

5.3.3 BIOGÁS DA CETESB

O software Biogás não permite aplicar a projeção populacional construída a partir da metodologia de Qasin (1985 apud SPERLING, 2005) como base para geração de resíduos. Este modelo possui ferramenta própria de estimativa de geração de RSU.

Dentre as opções de cálculo de fluxo de resíduos, adotou-se a que solicita como dados de entrada o histórico de deposição anual dos RSU no aterro. Uma vez que já foi estimada a geração diária de resíduos ao longo da vida útil do aterro (Figura 25). A partir deste ponto, é possível calcular a deposição anual conforme apresentado na Figura 29.

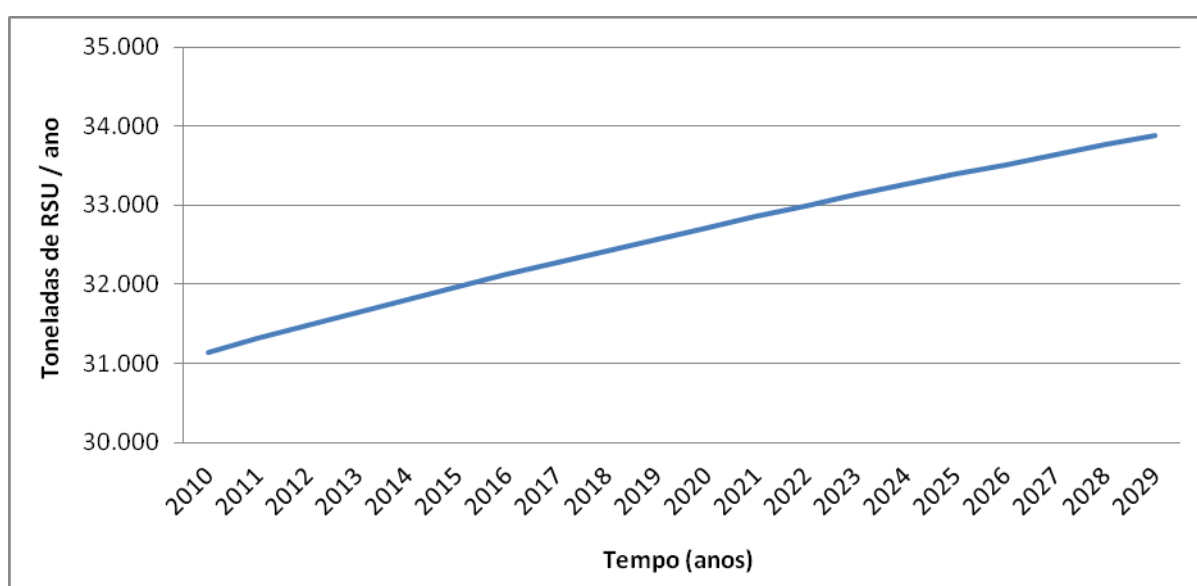


Figura 29 – Quantidade de RSU depositado no aterro durante o período de atividade utilizado como base de cálculo no software Biogás.

A partir dos dados do gráfico apresentado na Figura 29 o software gerou o gráfico apresentado a seguir.

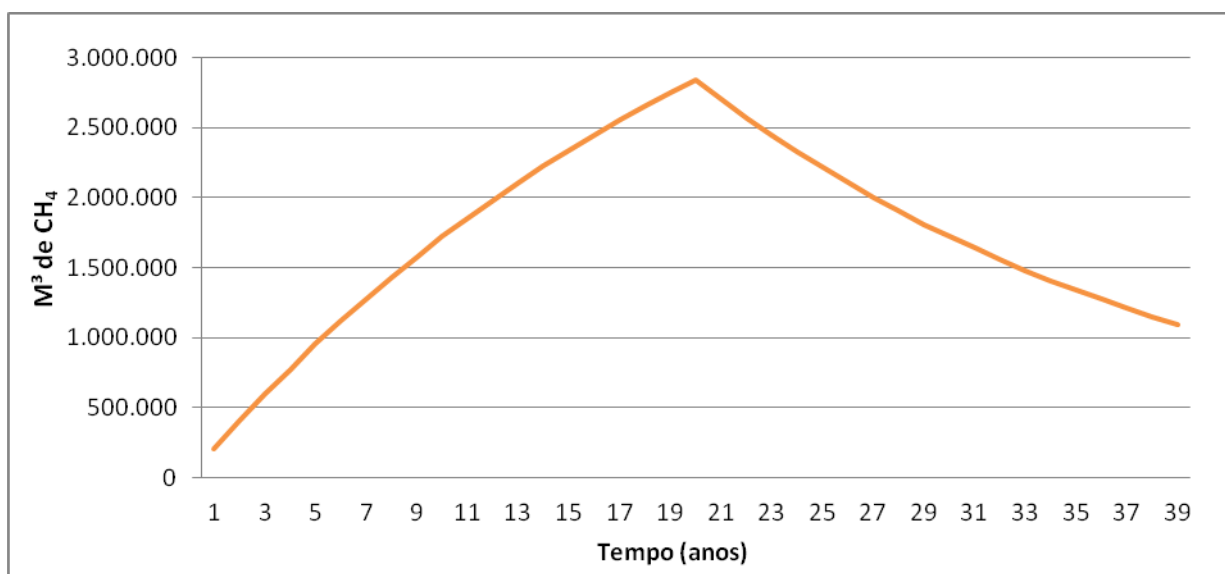


Figura 30 – Emissão de CH₄ segundo o software Biogás.

Percebe-se no gráfico da Figura 30 que a curva de emissão de metano se comporta da mesma forma que a dos demais modelos. Este resultado já era esperado, pois todos os modelos são baseados em uma equação de primeira ordem.

No entanto, este modelo gerou uma estimativa de emissão de metano em um período menor em relação aos demais. Neste modelo não é possível visualizar quando o aterro cessará com a geração de metano. Percebe-se no gráfico acima que está ocorrendo uma diminuição da produção de metano, no entanto, não se pode afirmar quando esta produção se esgotará por completo.

A quantidade de gás metano tende a crescer proporcionalmente a deposição dos RSU no aterro. No entanto, quando cessa esta deposição, a quantidade de metano tende a diminuir gradativamente. Nota-se que o ápice da curva coincide com o último ano de deposição de RSU no aterro.

5.4 Comparação dos resultados dos modelos de emissão de metano

Sobrepondo as curvas de emissão de metano, obtém o resultado apresentado na Figura 31.

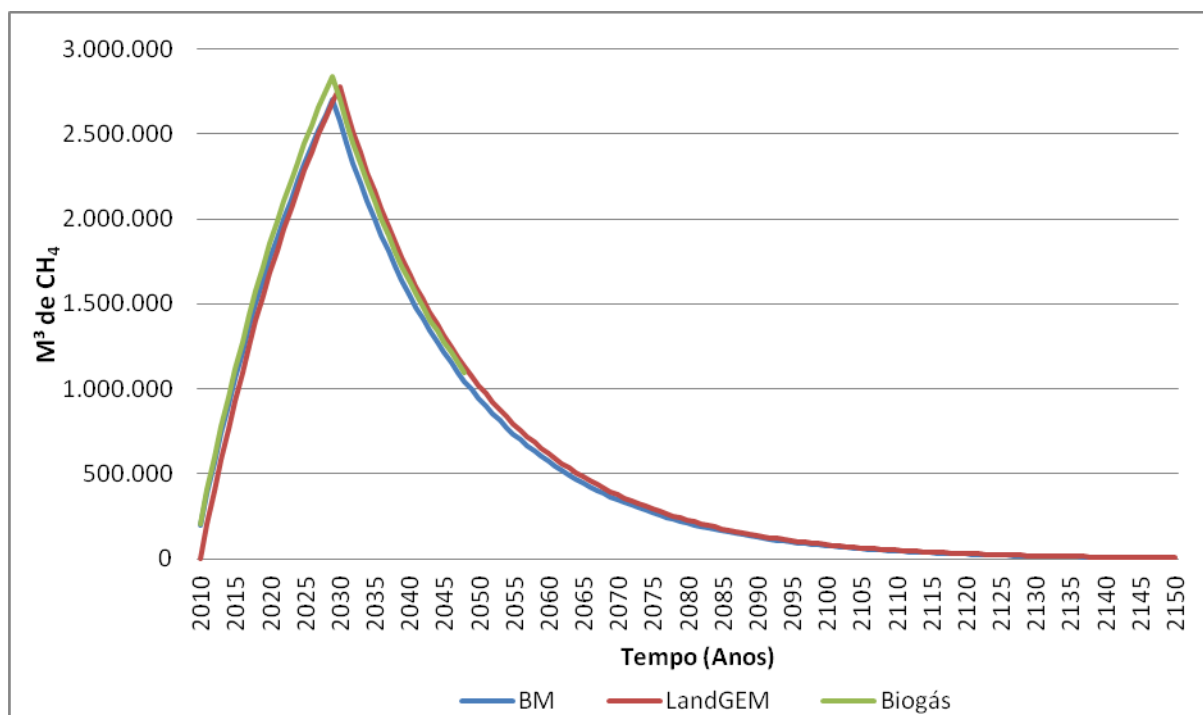


Figura 31 – Comparação entre os modelos de emissão de metano.

Observa-se no gráfico da Figura 31 que as curvas comportam-se de forma semelhantes e que não apresentam valores discrepantes em relação umas com as outras. Os valores de ápice da curva de emissão de metano variaram de 2.700.000 (Banco Mundial) a 2.840.000 (Biogás) m³ de CH₄. O ápice da curva do modelo da EPA apresentou um valor intermediário de 2.680.000 m³ de CH₄, por isto e por sua fácil aplicação e entendimento, este modelo é recomendável para executar tais simulações.

5.5 Dimensionamento de energia

A partir dos valores de emissão de metano do modelo da EPA foi gerada uma curva de energia considerando uma eficiência de coleta do biogás de 80%. A curva demonstrada na Figura 32 foi construída a partir da equação 15 e dos dados da Tabela 23.

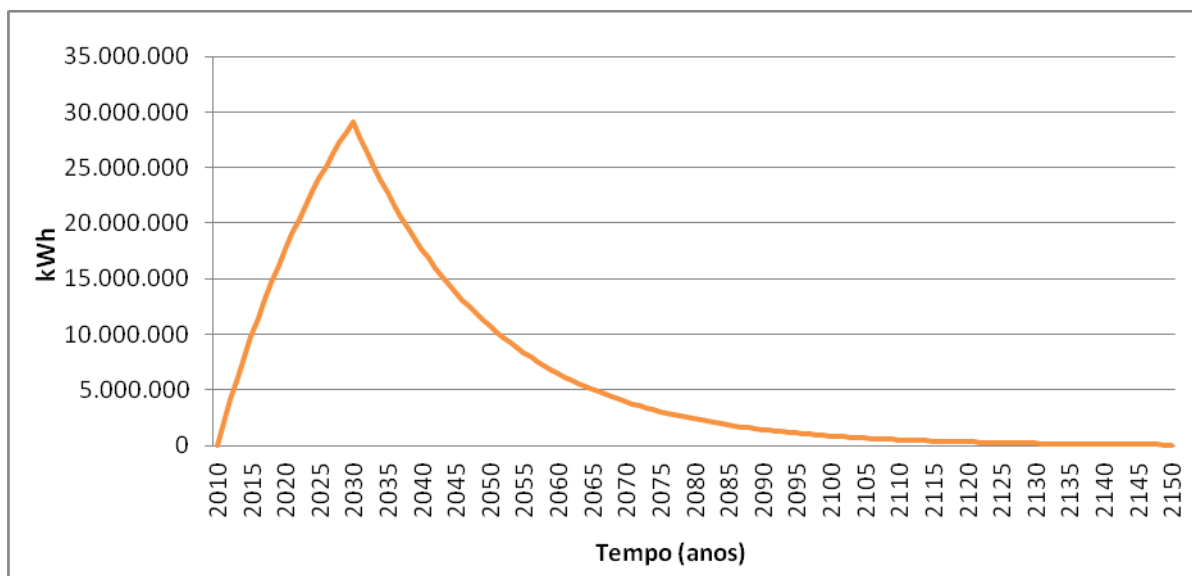


Figura 32 – Energia produzida a partir do CH₄ gerado pelo aterro ao longo de sua vida útil.

Para converter a curva de energia em potência, assumiu-se que o biogás passa por um processo de separação para que somente o metano seja aproveitado como combustível. Foi assumido também uma eficiência dos equipamentos de conversão de energia elétrica (motor de combustão interno acoplado a um gerador elétrico) de 33% e um fator de capacidade de 85%. O resultado pode ser observado na Figura 33.

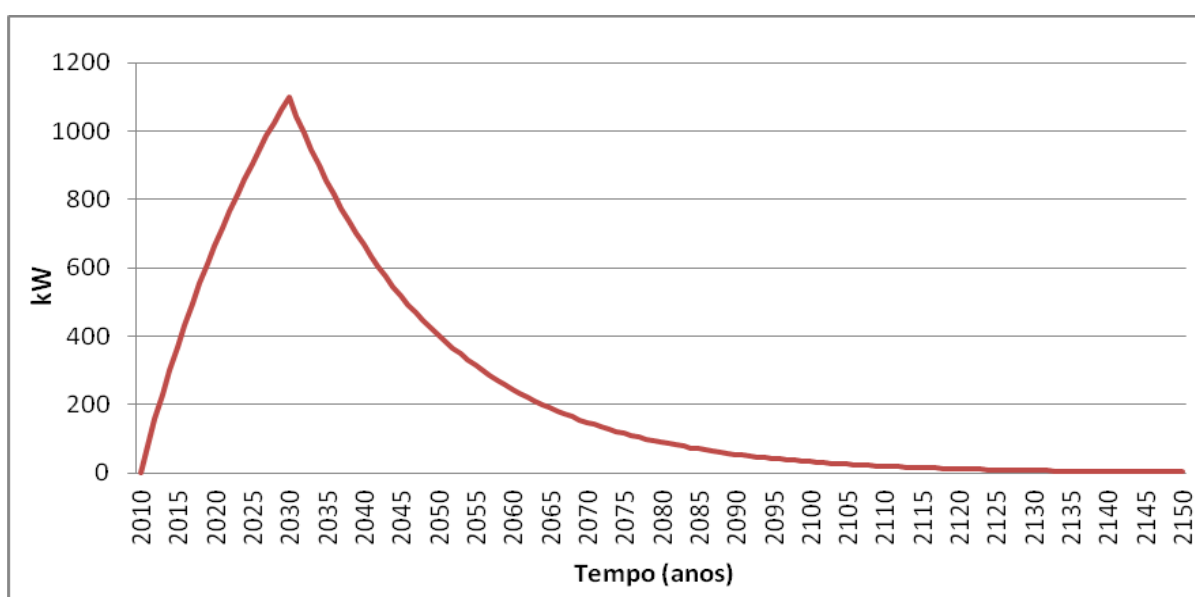


Figura 33 – Potência produzida a partir da energia gerada pelo aterro ao longo de sua vida útil.

A partir do gráfico anterior é possível verificar quando ocorrerão as maiores potências, no entanto, o dimensionamento de uma central para aproveitamento do biogás deve considerar que a vazão do mesmo é variável ao longo do tempo, devido à produção de biogás ir diminuindo, conseqüentemente obtendo potências menores. Como um projeto de aproveitamento de biogás envolve investimentos para implantação e manutenção do projeto, é de extrema importância dimensionar uma potência no qual se gere maior quantidade de energia por um menor valor de investimento possível, ou seja, determinar o ponto de maior aproveitamento.

5.6 Determinação do ponto ótimo para a central termoeétrica

Para determinar o ponto ótimo da central térmica para o aterro do CIMASAS, primeiramente verificou-se a frequência que ocorreria cada potência ao longo da vida útil do empreendimento, ordenado-as de acordo com a porcentagem de tempo em que cada uma ocorreria. Isto resultou no gráfico apresentado abaixo.

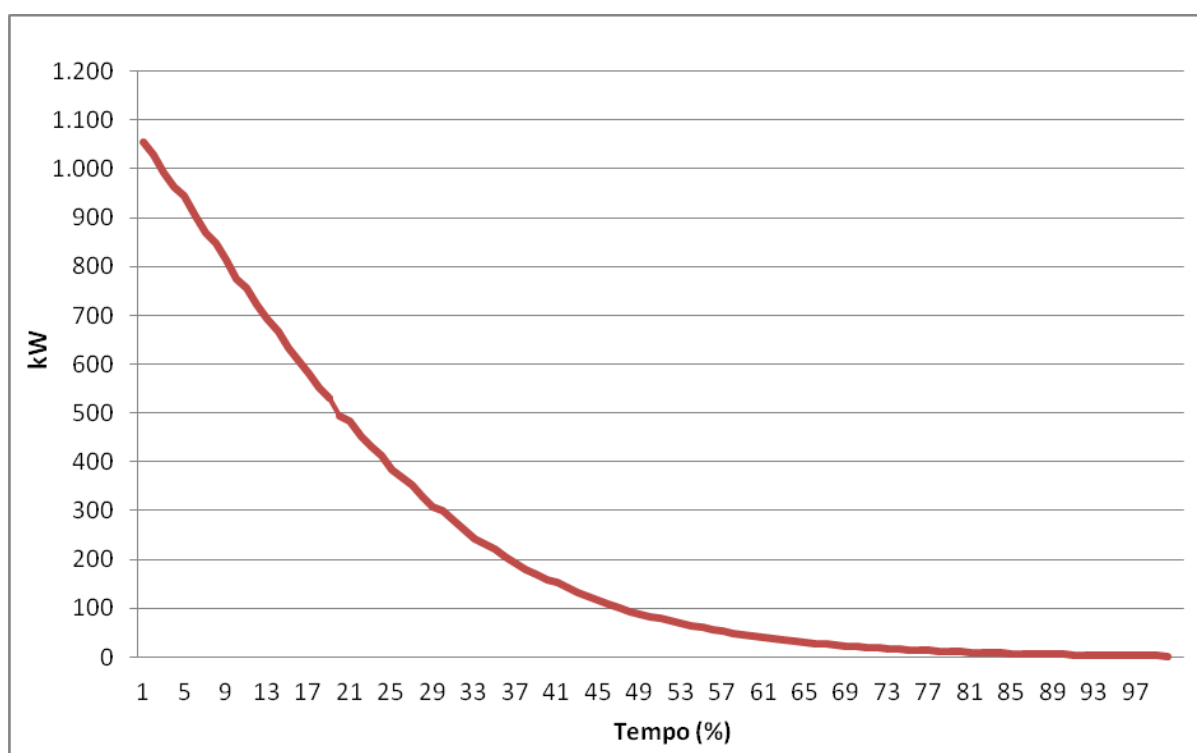


Figura 34 – Frequência da potência a ser gerada pelo o aterro.

A área de baixo da curva do gráfico acima representa a energia passível de ser gerada por cada potência apresentada. Relacionando a potência instalada com

sua energia gerada (Figura 35) é possível verificar o ponto em se gerará mais energia com uma menor potência, pois a geração de energia não cresce proporcionalmente com o aumento da potência elétrica.

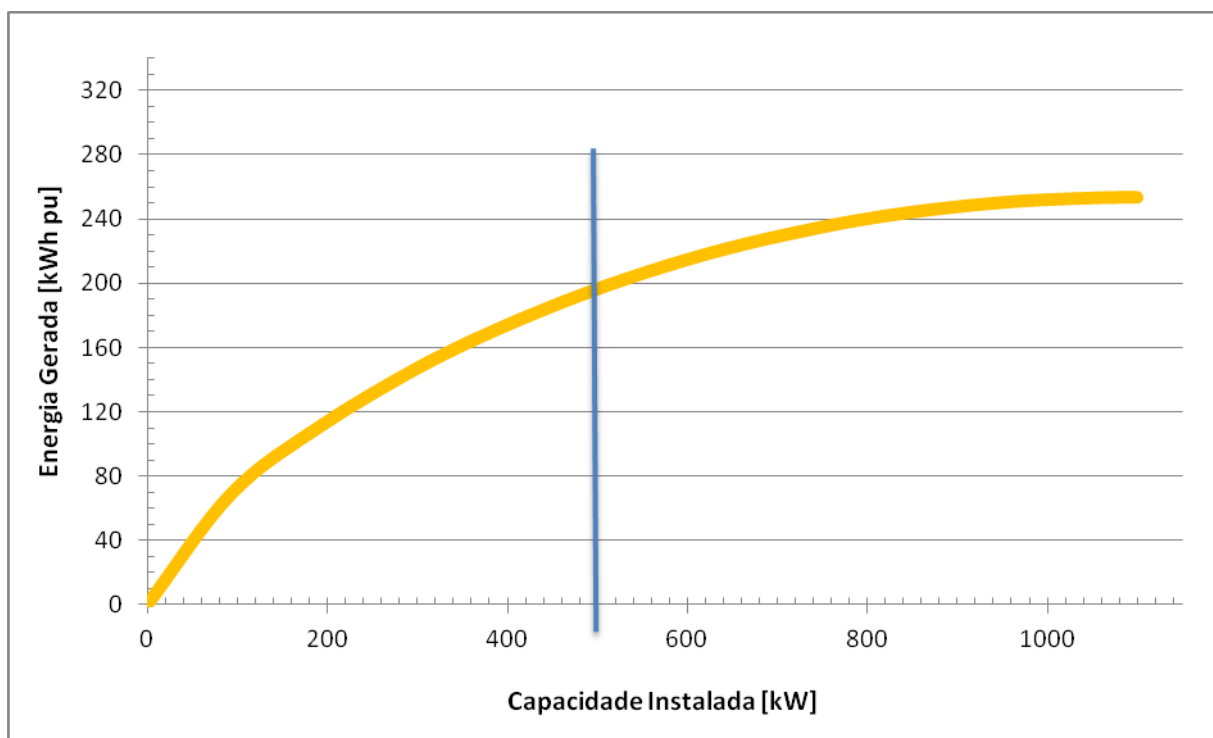


Figura 35 – Capacidade instalada pela energia gerada. Determinação da potência da central termoelétrica

Observa-se no gráfico da Figura 35 que à medida que a potência instalada cresce, a taxa de crescimento da energia média gerada tende a estagnar, vai saturando até alcançar o ponto correspondente à máxima capacidade de geração possível de ser instalada na central.

A partir da análise desta curva é possível verificar que as potências mais interessantes para efetuar o aproveitamento energético do biogás do aterro do CIMASA iniciam-se a partir de 500 kW, pois deste ponto em diante, a geração de energia não cresce significativamente. Este ponto também pode ser encontrado por meio do Máximo Benefício Líquido, como demonstrado a seguir.

5.7 Máximo Benefício Líquido

5.7.1 CUSTO UNITÁRIO

Para determinar o custo de instalação da central termoeétrica foram pesquisados valores de mercado de diversos grupos geradores, relacionando seus respectivos preços com sua potência a fim de determinar o custo unitário (R\$/kW) da central (Figura 36). A partir deste ponto simulou o custo da central com diversas potências.

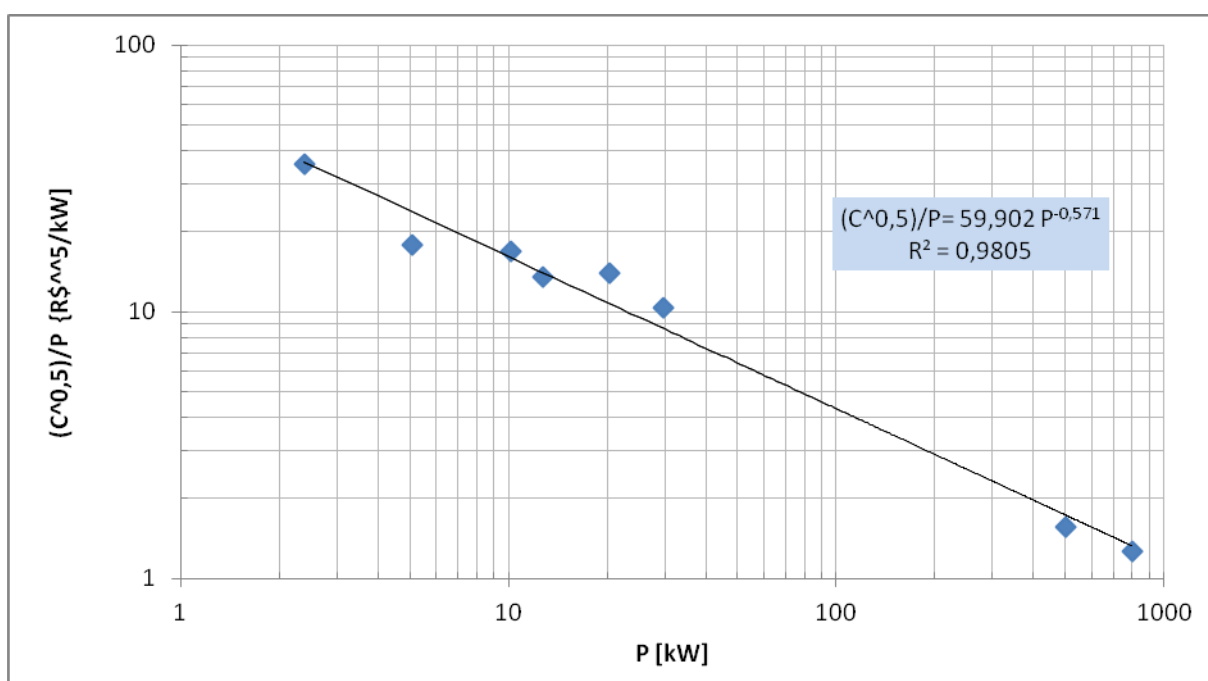


Figura 36 – Curva que correlaciona o preço do grupo gerador com a potência.

Ao se plotar os custos unitários expressos em (R\$/kW), o resultado é mostrado na figura acima, na qual pode-se observar que os pontos convergem para uma função (equação 16 e 17).

$$\sqrt{\frac{\text{(kW)}}{\text{R\$}}} = 59,902 \cdot p^{-0,571} \quad (16)$$

$$\left(\frac{kW}{R\$}\right) = 3588,25 \cdot p^{0.858} \quad (17)$$

5.7.2 CUSTO TOTAL

Tendo-se a função do custo unitário (R\$/kW) e as possíveis potências (kW), calculou-se os possíveis custos totais através da equação 18.

$$CT = CU \cdot P \quad (18)$$

Onde:

CT = Custo Total da central em (R\$);

CU = Custo Unitário da central (R\$/kW);

P = Potência da central (kW).

5.7.3 CUSTO ANUAL

$$CA = CT \cdot frc \quad (19)$$

Onde:

CA = Custo Anual;

CT = Custo Total;

Frc = Fator de recuperação de capital. Calculado pela equação 20.

$$frc = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (20)$$

Onde:

n = é o tempo de vida econômica do aterro (20 anos);

i = taxa de atratividade (9,5%).

5.7.4 BENEFÍCIO ANUAL

O Benefício Anual foi calculado de acordo com a equação 21.

$$BA = 8760 \cdot E_m \cdot TE \quad (21)$$

Onde:

E_m = energia média gerada pela central kWh;

TE = a tarifa de venda da energia.

5.7.5 BENEFÍCIO LÍQUIDO

O Benefício Líquido anual é a diferença entre benefício anual e o custo anual conforme exemplificado pela equação 22.

$$BL = BA - CA \quad (22)$$

Onde:

BL = Benefício Líquido do empreendimento em R\$;

BA = Benefício Anual do empreendimento em R\$;

CA = Custo Anual da instalação em R\$.

5.7.6 CRITÉRIO DE MOTORIZAÇÃO

O critério de motorização adotado para o aterro foi baseada na teoria econômica, buscando-se o maior lucro possível. Portanto, a potência do projeto será determinada pelo método do Máximo Benefício Líquido. Este método relaciona o benefício líquido com a potência instalada.

Para o Máximo Benefício Líquido, deve-se obter sua primeira derivada em relação a potência e igualar a zero, de acordo com a equação 23.

$$\text{Máx}BL \rightarrow \frac{\partial BL}{\partial P} = 0 \quad (23)$$

Tendo-se a primeira derivada do benefício anual e do custo anual, ambos em relação a potência e fazendo as manipulações algébricas necessárias, chega-se a conclusão que a variação do benefício anual: ∂BA , é igual a variação do custo anual: ∂CA , como demonstrado a seguir:

$$\frac{\partial BL}{\partial P} = \frac{\partial BA}{\partial P} - \frac{\partial CA}{\partial P} \quad (24)$$

$$\frac{\partial BA}{\partial P} - \frac{\partial CA}{\partial P} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial BA}{\partial P} = \frac{\partial CA}{\partial P}$$

$$\frac{\partial BA}{\partial CA} = 1 \quad (26)$$

A equação (25) indica que o Máximo Benefício Líquido será atingido quando a variação do Benefício Anual (∂BA) for igual a variação do Custo Anual (∂CA).

Através de um método iterativo, ou seja, a partir dos valores de emissão de metano e suas respectivas durações, obtém-se os possíveis valores de potência (kW), energia média (kWh), fator de capacidade, custo total, custo unitário, benefício anual, benefício líquido.

De posse da curva de permanência das emissões de metano e / ou das potências e a taxa mínima de atratividade (9,5%), através das expressões apresentadas entre (16) a (26) pode-se verificar para uma determinada tarifa (115 R\$/MWh) de venda de energia a qual capacidade instalada resulta no máximo benefício líquido e para esta condição analisar a viabilidade e atratividade do empreendimento.

Tabela 26 – Análise do Máximo Benefício Líquido, da Viabilidade e da Atratividade do Aterro do CIMASAS, considerando a Tarifa de Venda de Energia com sendo R\$ 115,00/MWh.

Permanência	Potência (kW)	Energia Gerada (kWh)	Fator de Capacidade (FC)	Custo Anual (CA)	Benefício Anual (BA)	Benefício Líquido (BL)	ΔCA	ΔBA	$\Delta BA/\Delta CA$
0,01	1.119,2	247,3	0,22	223.808	236.635	12.827	0	0	0
0,05	963,3	243,4	0,25	205.612	232.905	27.293	18.196	3.730	0,20
0,1	788,7	230,3	0,29	184.722	220.372	35.650	20.890	12.533	0,60
0,15	645,7	212,4	0,33	167.126	203.270	36.144	17.596	17.102	0,97
0,2	504,5	187,7	0,37	149.187	179.616	30.430	17.940	23.654	1,32
0,25	391,6	162,3	0,41	134.338	155.321	20.983	14.849	24.295	1,64
0,3	305,0	138,5	0,45	122.522	132.522	10.000	11.816	22.799	1,93
0,35	226,0	112,8	0,50	111.314	107.934	-3.380	11.208	24.588	2,19
0,4	160,3	88,2	0,55	101.569	84.363	-17.206	9.744	23.571	2,42
0,45	118,0	70,2	0,59	94.992	67.151	-27.842	6.577	17.212	2,62
0,5	83,1	53,6	0,65	89.322	51.315	-38.007	5.670	15.835	2,79
0,55	61,6	42,3	0,69	85.648	40.491	-45.158	3.674	10.825	2,95
0,6	43,4	31,9	0,73	82.402	30.484	-51.918	3.246	10.007	3,08
0,65	30,6	23,8	0,78	79.997	22.818	-57.179	2.404	7.665	3,19
0,7	21,5	17,7	0,82	78.217	16.985	-61.232	1.781	5.834	3,28
0,75	15,2	13,1	0,86	76.898	12.569	-64.329	1.319	4.415	3,35
0,8	10,7	9,7	0,90	75.922	9.243	-66.678	977	3.326	3,41
0,85	7,5	7,1	0,94	75.198	6.748	-68.450	723	2.495	3,45
0,9	5,3	5,1	0,96	74.663	4.883	-69.779	536	1.865	3,48
0,95	3,7	3,7	0,98	74.266	3.494	-70.772	397	1.389	3,50
1	0,0	0,0	0,00	73.133	0	-73.133	1.133	3.494	3,09

Pela Tabela 26, o máximo benefício líquido ocorre entre as potências 504 kW a 645 kW, quando a relação $\partial BA/\partial CA \cong 1$, ou seja, fazendo uma interpolação neste

intervalo de potências, encontra-se o valor correspondente de 564 kW em uma permanência de 18% do tempo.

De posse dos valores da tabela 26, pode-se agora determinar a TIR e o VPL para o empreendimento nas condições de máximo benefício conforme apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL) do empreendimento.

Permanência	Potência (kW)	Energia Gerada (kWh)	Fator de Capacidade (FC)	Custo Anual (CA)	Benefício Anual (BA)	Benefício Líquido (BL)	TIR	VLP
0,01	1.119,2	247,3	0,22	223.808	236.635	12.827	3,9%	R\$ 89.182,17
0,05	963,3	243,4	0,25	205.612	232.905	27.293	12,9%	R\$ 57.361,30
0,1	788,7	230,3	0,29	184.722	220.372	35.650	19,2%	R\$ 151.494,25
0,15	645,7	212,4	0,33	167.126	203.270	36.144	21,6%	R\$ 171.998,30
0,2	504,5	187,7	0,37	149.187	179.616	30.430	20,3%	R\$ 137.059,11
0,25	391,6	162,3	0,41	134.338	155.321	20.983	15,4%	R\$ 65.776,78
0,3	305,0	138,5	0,45	122.522	132.522	10.000	7,1%	R\$ 22.080,78
0,35	226,0	112,8	0,50	111.314	107.934	3.380	---	R\$ 132.013,03
0,4	160,3	88,2	0,55	101.569	84.363	17.206	---	R\$ 247.296,58
0,45	118,0	70,2	0,59	94.992	67.151	27.842	---	R\$ 336.811,60
0,5	83,1	53,6	0,65	89.322	51.315	38.007	---	R\$ 422.929,92
0,55	61,6	42,3	0,69	85.648	40.491	45.158	---	R\$ 483.799,03
0,6	43,4	31,9	0,73	82.402	30.484	51.918	---	R\$ 541.555,69
0,65	30,6	23,8	0,78	79.997	22.818	57.179	---	R\$ 586.610,22
0,7	21,5	17,7	0,82	78.217	16.985	61.232	---	R\$ 621.386,47
0,75	15,2	13,1	0,86	76.898	12.569	64.329	---	R\$ 647.995,20
0,8	10,7	9,7	0,90	75.922	9.243	66.678	---	R\$ 668.204,81
0,85	7,5	7,1	0,94	75.198	6.748	68.450	---	R\$ 683.457,43
0,9	5,3	5,1	0,96	74.663	4.883	69.779	---	R\$ 694.905,86

0,95	3,7	3,7	0,98	74.266	3.494	70.772	---	R\$ 689.469,75
------	-----	-----	------	--------	-------	--------	-----	----------------

Observa-se na tabela 27 que o valor da TIR começa a se tornar positiva a partir de uma potência instalada de 305 kW e chega ao seu valor máximo com a potência de 645 kW. Em contrapartida, o valor do VPL torna-se positivo a partir da potência 391 kW e atinge seu valor máximo na potência de 645 kW. Após a potência de 645 kW o VPL começa a diminuir consideravelmente. Estas sutiações estão apresentados nos gráficos abaixo.

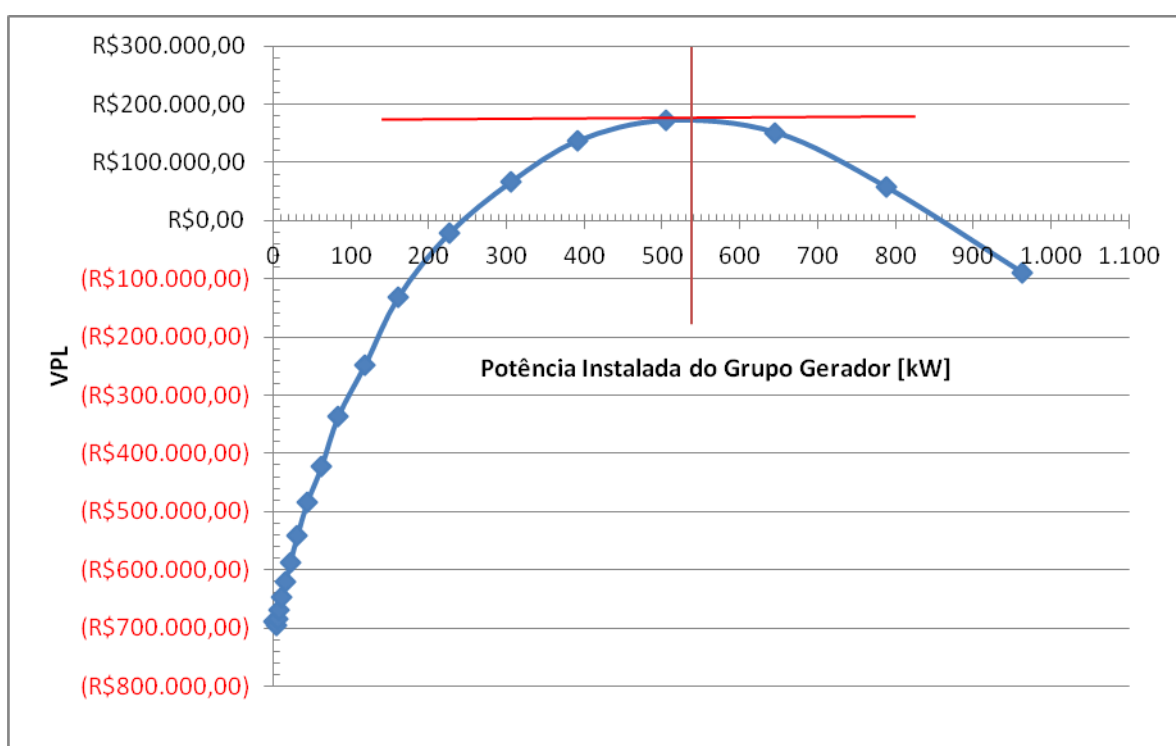


Figura 37 – VPL em função da potência instalada.

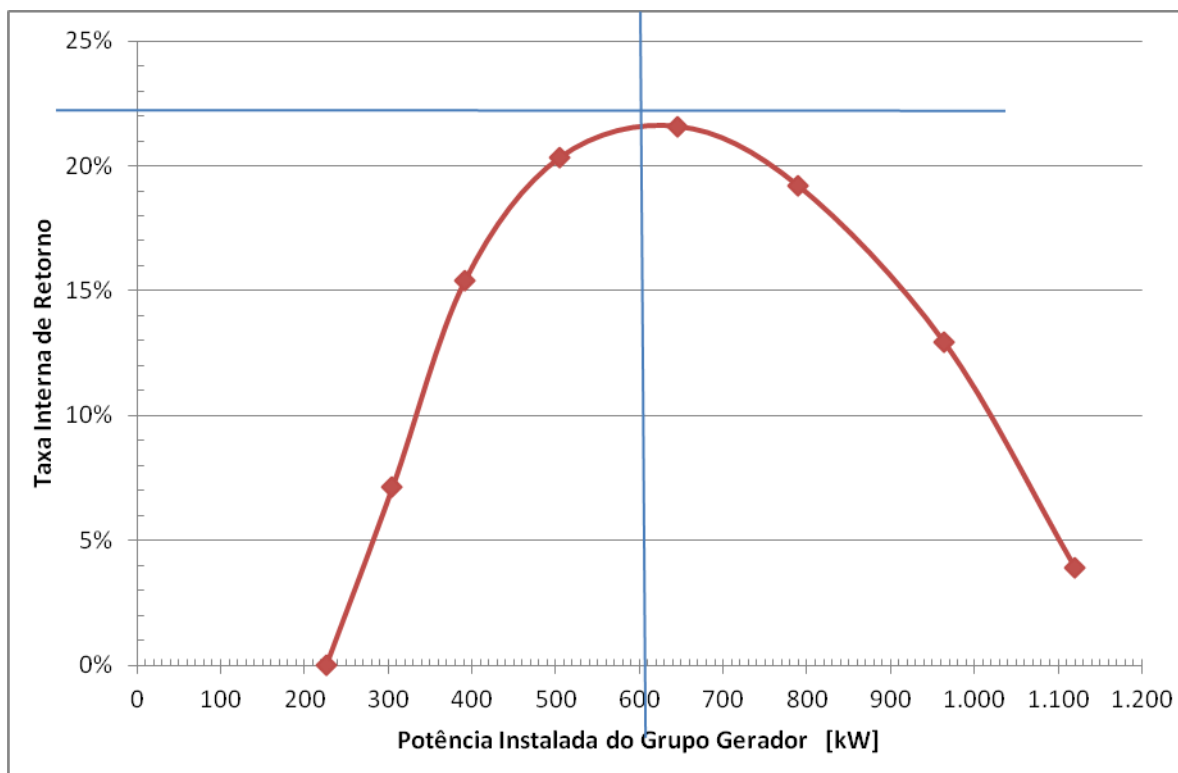


Figura 38 – TIR em função da potência instalada.

Interpolando os intervalos de potências apresentados pelo o método do MBL, TIR e VPL, percebe-se que a potência da central térmica do CIMASAS deve estar entre os valores de 504 kW a 645 kW. Logo, fazendo uma outra interpolação neste intervalo, chega-se a potência de 564 kW para o aterro.

Em resumo o aterro do CIMASAS nas condições de tarifa e investimentos descrito acima, mostra-se viável e atrativa economicamente para um potência de 564 kW.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise demográfica dos dados das projeções mostrou que o município de Itajubá além de ser o município com o maior número de habitantes atualmente, foi o município que mais cresceu no CIMASAS nos últimos de anos. As projeções também mostraram que dois municípios, Delfim Moreira e Wenceslau Braz, tiveram uma taxa de crescimento negativa. No entanto, como esses municípios representam 7% e 2% respectivamente do total de habitantes do consórcio, os mesmos não comprometeram as estimativa dos RSU total do CIMASAS.

A estimativa de geração dos RSU para o período de 20 anos, seguiu a tendência apresentada pela projeção populacional do CIMASAS, embora três municípios tenham apresentados indicadores de geração per capita de RSU muito abaixo do esperado.

As projeções populacionais e a estimativa de geração dos RSU do CIMASAS demonstram-se fundamentais para o entendimento e análise dos modelos de emissão de metano.

Os resultados das simulações de emissão de metano dos modelos selecionados comportaram-se de forma semelhante, isto já era esperado, pois as equações base dos modelos são todas de primeira ordem.

Os resultados demonstraram que o modelo da EPA (LandGEM) apresentou valores de emissões intermediário em relação aos demais. E que o mesmo modelo também mostrou o comportamento do biogás em um período maior de tempo, contribuindo de forma mais clara para análise dos dados. Os resultados deste modelo indicou que o aterro do CIMASAS, produzirá em vinte anos mais 40.000.000 de m³ de metano.

A geração de energia a partir da combustão do gás do aterro mostrou-se vantajosa para um grupo gerador de uma potência de 564 kW, pois, esta potência se encontra em um intervalo (504 kW a 645 kW) no qual gera-se uma TIR e VLP positivos e atrativos. Além de apresentar uma relação do MBL, muito próxima de 1.

A metodologia descrita no presente trabalho apresentou-se eficaz para a determinação da potência ótima da central termoelétrica a ser instalada no aterro, nas condições deste estudo. No entanto, recomenda-se aplicar esta metodologia em outros aterros de outras regiões a fim de verificar sua sensibilidade.

Para trabalhos futuros, recomenda-se também pesquisar a influência da composição gravimétrica dos RSU, principalmente variando o teor de matéria orgânica, para determinação de potência elétrica. Bem como recomenda-se estudar a influência da tarifa energética para viabilização do empreendimento. Outro campo que também pode ser explorado em uma pesquisa futura, é a influência da melhoria da tecnologia de conversão energética para o aproveitamento do biogás.

Ainda como recomendação, sugere-se fazer um mapeamento dos drenos de captação de gás de aterro, verificando em cada dreno a vazão do biogás e a concentração de gás metano contido no mesmo, a fim de verificar de forma mais precisa a quantidade de insumo energético gerado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbano.** Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 8.849: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 10.005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Riode Janeiro, 2004b.

_____. **NBR 10.006: Procedimento de obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Riode Janeiro, 2004c.

_____. **NBR 10.007: Amostragem de resíduos.** Rio de Janeiro, 2004d.

_____. **NBR 13.463: Coleta de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 1997.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2010.** São Paulo. 2011.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2009.** São Paulo. 2010.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2008.** São Paulo. 2009.

ABREU, F. V.; FILHO, M. A. F. C; SOUZA, M. C. L. **Biogás de aterros sanitários para geração de Energia renovável e limpa - um estudo de viabilidade técnica e econômica.** 2009. Disponível em: <http://www.eng.uerj.br/publico/anexos/1280380722/07-c0343-a1-viana-cibim2009.pdf>>. Acessoem: 15 de janeiro de 2011.

ALVES, I. R. F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife, 2008.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Gerenciamento de resíduos de serviços de saúde.** Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

AZEVEDO, L. P.; LANDIM, A. L. P. F. **O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: Unindo o inútil ao sustentável.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 59-100, mar. 2008.

BARLAZ, M. A.; SCHAEFER, D. M.; R. K. HAM. **Bacterial Population development and Chemical Characteristics of Refuse Decomposition in a Simulated Sanitary Landfill.** Applied and Environmental Microbiology. American Society for Microbiology. v. 55, n.1, p. 55-65, jan. 1989.

BARLAZ, M. A. **Forest products decomposition in municipal solid waste landfills.** Waste Management, v. 26, p. 321-333, jan. 2006. doi:10.1016/j.wasman.2005.11.002.

BENSON, C. H et al. **Practice review of five bioreactor/recirculation landfills.** Waste Management, v. 27, p. 13-29, jun. 2006. doi:10.1016/j.wasman.2006.04.005.

BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA-FILHO, J. V. (Org.). **Logística ambiental de resíduos sólidos.** São Paulo: Atlas, 2011.

BARROS, R. M; TIAGO FILHO, G. L. **Avaliação preliminar do potencial energético de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos: O caso de Itajubá – MG.** Curitiba: 2009. Disponível em: <<http://www.porthuseventos.com.br/site/eventos/2009/eventobioenergia.com.br/congresso/br/palestras.php>>. Acesso em: 2 de julho de 2010.

BIDONE, F. R. A; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos.** São Carlos: EESC/USP, 1999.

BNDES – BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. **Bioetanol de Cana-de-açúcar: Energia para o desenvolvimento sustentável.** 1ª Edição. Rio de Janeiro: Editora de divulgação do BNDES, 2008.

BORBA, S. M. P. **Análise de modelos de geração de gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental.** São Paulo: Prentice Hall, 2005.

_____. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico;** altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga. Diário Oficial da União, Brasília, Distrito Federal. 2007.

_____. **Lei nº 12.305, 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.** 2010a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 26 de julho de 2011.

_____. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos**

e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. 2010b. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm>. Acesso em: 26 de julho de 2011.

BURANI, G. F. et al. **Cogeração através de aproveitamento energéticos a partir de resíduos sólidos urbanos.** 2006. Disponível em: <http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/CLAGTEE2003_GeraldoBurani3.pdf>. Acesso em: 8 de dezembro de 2011.

BURNS, E. M. **História da civilização ocidental.** Tradução Lorival Gomes Machado e Lourdes Santos Machado. 2. ed. Rio de Janeiro: Globo, 2007.

CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás.** Rio de Janeiro: ABES, RiMa - Projeto PROSAB, 2003.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil.** São Paulo, Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/economiaambiental/page.php?id=144>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2011.2004.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Biogás, geração e uso energético- aterros, versão 1.0 / CETESB, Secretaria de Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia.** São Paulo: SMA: CETESB: MCT. 2006. CD-ROM. Manual v. 1-2, programas executáveis e código fonte.

_____. **Pesquisa sobre emissões de metano dos depósitos de lixo no Brasil.** São Paulo. 1999. Disponível em <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 2 de julho de 2010.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 5, de 5 de agosto de 1993.** Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res93/res0593.html>> Acesso em: 2 de julho de 2010.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Minas Gerais: DESA/UFMG, 1997.

_____. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1993.

CNEN – CONSELHO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Resolução nº 19 de 1985. Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas**. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm605.pdf>>. Acesso em: 26 de julho de 2011.

D'ALMEIDA, M.L.O.; VILHENA, A. (coord.). **LixoMunicipal: manual de gerenciamento integrado**. 2.ed. São Paulo: IPT-CEMPRE, 2000.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2003.

EIA – U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Growth of the landfill gas industry**. 1996. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/renewable.energy.annual/chap10.htm>> Acesso em: 17 de novembro de 2011.

EPA – U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **AP- 42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors**. 5th Edition, v.1: Stationary Point and Area Sources Chapter 2: Solid Waste Disposal, Section 2.4, US EPA Supplement E, USA. 2008.

_____. **Turning a liability into an asset: a landfill gas-to-energy project development handbook**. Landfill Methane Outreach Program. EPA. 1996.

_____. **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 user's guide**. Morrisville, NC, 2005. Disponível em:

<<http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#software>>. Acesso em: 2 de maio de 2011.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, EPE, 2007.

_____. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande-MS**. Série Recursos Energéticos. Nota Técnica DEN 06/08. Rio de Janeiro, nov. 2008.

FARQHAR, G. J.; ROVERS, F. A. **Gas production during refuse decomposition**. Water, Air, and Soil Pollution, v. 2, p. 483 – 495, 1973.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Renewable biological systems for alternative sustainable energy production**. FAO, Agricultural Services Bulletin. n. 128. 1997. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e0f.htm>>. Acesso em: 1 de outubro de 2011.

FRANKLIN, M. A. **Solid Waste Stream Characteristics**. In: TCHOBANOGLOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. 2.ed. New York: Mcgraw-Hill, 2002.

GONÇALVES, A. T. T. **Potencialidade Energética dos Resíduos Sólidos Domésticos e Comerciais do Município de Itajubá-MG**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Gaduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, 2007.

HANSEN, T. L.; SCHMIDT, J. E.; ANGELIDAKI, I.; MARCA, E.; JANSEN, J. C.; MOSBAEK, H.; CHRISTENSEN, T. H. **Method for determination of methane potentials of solid organic waste**. Waste Management, v. 24, p. 393 – 400, 2004.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTÁTICA. **Censo 2000: Tabela 200 - População residente por sexo, situação e grupos de idade.** 2000. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&c=200>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2011.

_____. **Contagem populacional de 2007: Tabela 793 - População residente.** 2007. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&c=793>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2011.

_____. **Censo 2010.** 2010a. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/tabelas_pdf/total_populacao_minas_gerais.pdf>. Acesso em: 15 de janeiro de 2011.

_____. **Pesquisa Nacional do Saneamento Básico 2000.** Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. IBGE. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **Pesquisa Nacional do Saneamento Básico 2008.** Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. IBGE. Rio de Janeiro, 2010b.

_____. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2009.** Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. IBGE. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **PIB per capita a preços correntes 2008.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/comparamun/compara.php?codmun=317220&coduf=31&tema=pibmunic&codv=v06&lang=>>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2011.

ICLEI Brasil - Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás, volume um, aterros sanitários.** ICLEI - Governos Locais pela

Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

IPCC – INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual**. v. 3. 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>>. Acesso em: 2 de julho de 2010.

_____. **Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 881, 2001. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml#T2cnOsUge_g>. Acesso em: 2 de julho de 2010.

_____. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Waste**. v. 5. 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>>. Acesso em: 2 de julho de 2010.

LMOP – LANDFILL METHANE OUTREACH PROGRAM. Disponível em: <http://www.epa.gov/lmop>. Acesso em: 16 de dezembro de 2011.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. **Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 18, n 2, p. 106-118, 2008.

LEVIS, J. W. et al. **Assessment of the state of food waste treatment in the United States and Canada**. Waste Management, v. 30, p. 1486–1494, 2010. doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.031.

Lima, L. M. Q. Nunes, C. R., **Aterro Sanitário Celular**. 1994.

MAGALHÃES, A. C. F. **A questão dos resíduos de serviços de saúde: Uma avaliação da situação na fundação Hospital estadual do acre.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Gaduação em Desenvolvimento Regional, Universidade Federal do Acre – UFAC, Rio Branco, 2009.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. **Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil.** Waste Management, 2011. doi:10.1016/j.wasman.2001.01.030.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada à biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca.** Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife, 2003.

MENEZES, R. A. A.; MENEZES, M. A. A.; REAL, J. L. G. **Estágio Atual da Incineração no Brasil.** 2000. Disponível em: <<http://www.luftech.com.br/arquivos/art07.htm>> Acesso em: 9 de dezembro de 2011.

MERZ, R. C.; STONE, R. **Special Studies of a Sanitary Landfill, U.S.** Department of Health Education and Welfare, Washington, DC. 1970.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa nº 52 de 14 de dezembro de 2001. Convoca os municípios para o licenciamento ambiental de sistema adequado de disposição final de lixo e dá outras providências.** 2001. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5479>> Acesso em: 8 de dezembro de 2011.

MONTEIRO, M. B.; COSTA, M. B. **Relatório e Plano de Controle Ambiental do Aterro Sanitário de Itajubá – MG.** Itajubá: Relatório Técnico Novo Meio Engenharia & Consultoria Ltda. 2006.

MUYLAERT, M. S. (coord.) et al. **Consumo de energia e aquecimento do planeta – Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudos de caso.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.

O'LEARY, R. P.; TCHOBANGLIOUS, G. **Landfilling**. In: TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

OLIVEIRA, L. B. **A energia do lixo no Brasil: barata, limpa, empregatícia, representativa, confiável e imeiata**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, Rio de Janeiro. 2006.

PAGLIUSO, J. D. **Tratamento térmico de resíduos: gaseificação ou combustão? Universidade de São Paulo (USP)**. 2009. Disponível em: <http://www.eesc.usp.br/shs/neper/isimposio/palestras/02122009-manha/JOSMAR_PAGLIUSO-TratamentoTermicoDeResiduos.pdf> Acesso em: 8 de dezembro de 2011.

PMI – PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJUBÁ. **Aterro sanitário de Itajubá começa a beneficiar municípios da região**. 20 de setembro de 2011. Disponível em <<http://www.itajuba.mg.gov.br/noticia.php?id=2418>> Acesso em: 8 de dezembro de 2011.

PINATTI, D. G. et al. **Large Scale Low Cost Production of Submicrometric Powder Through Biomass Refinery**. Materials Research, v. 6, n. 3, p. 375-388, 2003.

POHLAND, F. G. et al. **Behavior and assimilation of organic and Inorganic priority pollutants codisposed with municipal Refuse**. U.S. Environmental Protection Agency - EPA, Washington, D.C. v. 1, 1993.

PNUD – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Atlas do desenvolvimento humano no Brasil**. Versão 1.0. 2003. Disponível em:<<http://www.pnud.org.br/atlas/tabelas/index.php>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2011.

QASIM, S. R. **Wastewater treatment plants: planning, design and operation**. Holt, Rinehart and Wiston. New York: 1985. In: SPERLING, M. V. **Introdução à**

qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2. ed, vol. 1. 2005.

SMA – Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo. **Resolução SMA nº 38 de 2 de agosto de 2011. Estabelece a relação de produtos geradores de resíduos de significativo impacto ambiental, para fins do disposto no artigo 19, do Decreto Estadual nº 54.645, de 05.08.2009, que regulamenta a Lei Estadual nº 12.300, de 16.03.2006, e dá providências correlatas.** **elaboração Normativa nº 52 de 14 de dezembro de 2001.** 2011. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/legislacao/resolucoes-sma/resolucao-sma-n%C2%B0-38/> Acesso em: 8 de dezembro de 2011.

SCHARFF, H.; JACOBS, J. **Applying Guidance for Methane Emission Estimation for Landfills.** Waste Management, v. 26, p. 417-429, jan. 2006. doi:10.1016/j.wasman.2005.11.015.

SPERLING, M. V. **Princípios básicos do tratamento de esgotos – Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** Belo Horizonte: DESA/UFMG, vol. 2. 1996.

_____. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2. ed, vol. 1. 2005.

SÖDERMAN, M.L. (2003). **Recovering energy from waste in Sweden – a systems engineering study.** *Resources, Conservation and Recycling*. v. 38. p. 89-121. apud REICHERT, G.A. (2005). *Aplicação da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Revisão.* Anais do 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Campo Grande (MS), 18 a 23 de setembro de 2005.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. **Methane generation in landfills.** *Renewable Energy*, v. 32, p.1243–1257, 2007. doi:10.1016/j.renene.2006.04.020.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, CINERGIA, 2003.

VERMA, S. **Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes**. Department of Earth & Environmental Engineering, Columbia University. 2002.

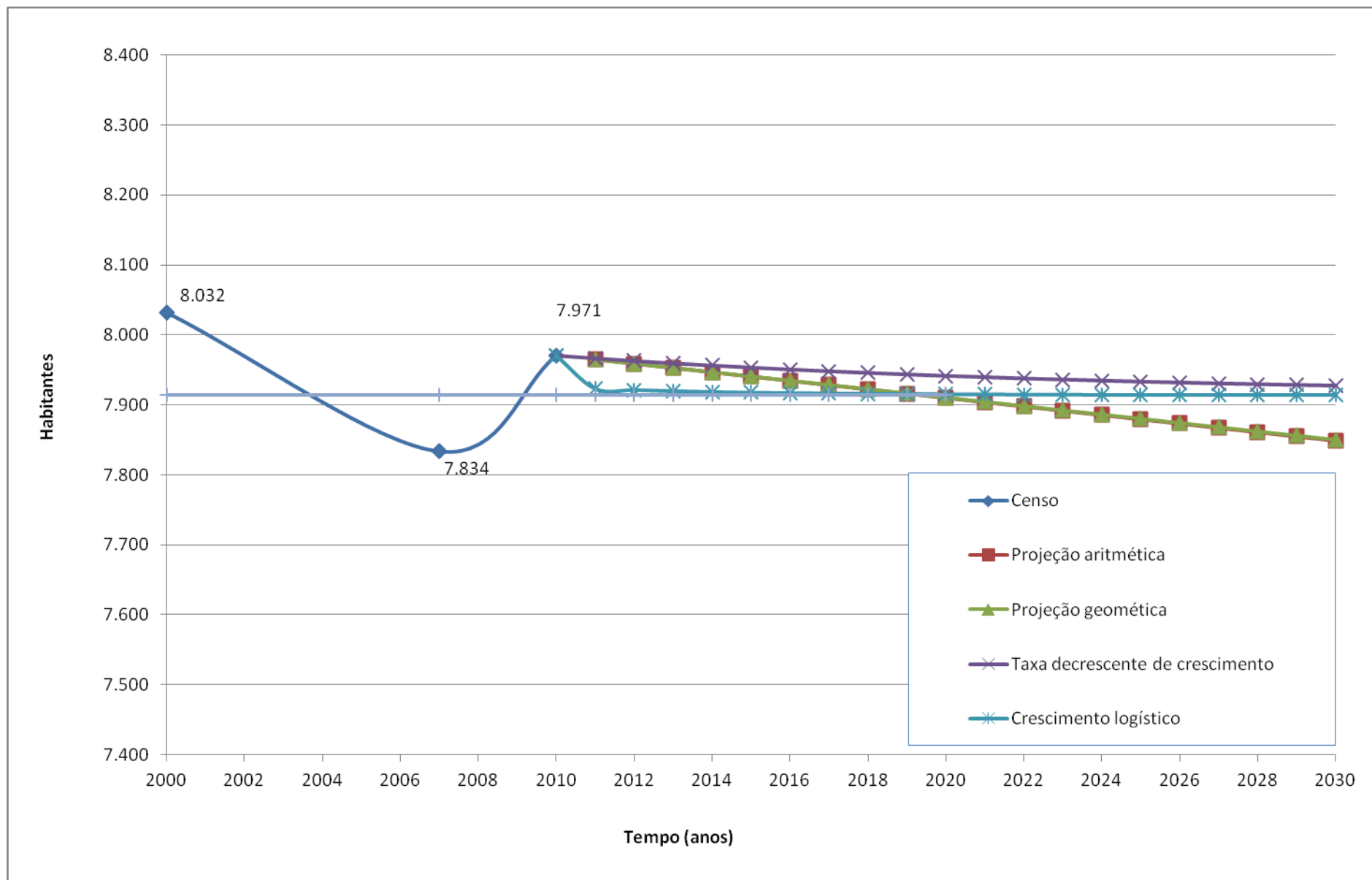
VIMIEIRO, G. V. **Tecnologias de tratamento de resíduos de serviços de saúde - ênfase no uso de plasma**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: 2007.

WORLD BANK. **Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean**. Conestoga-Rovers & Associates, 2004.

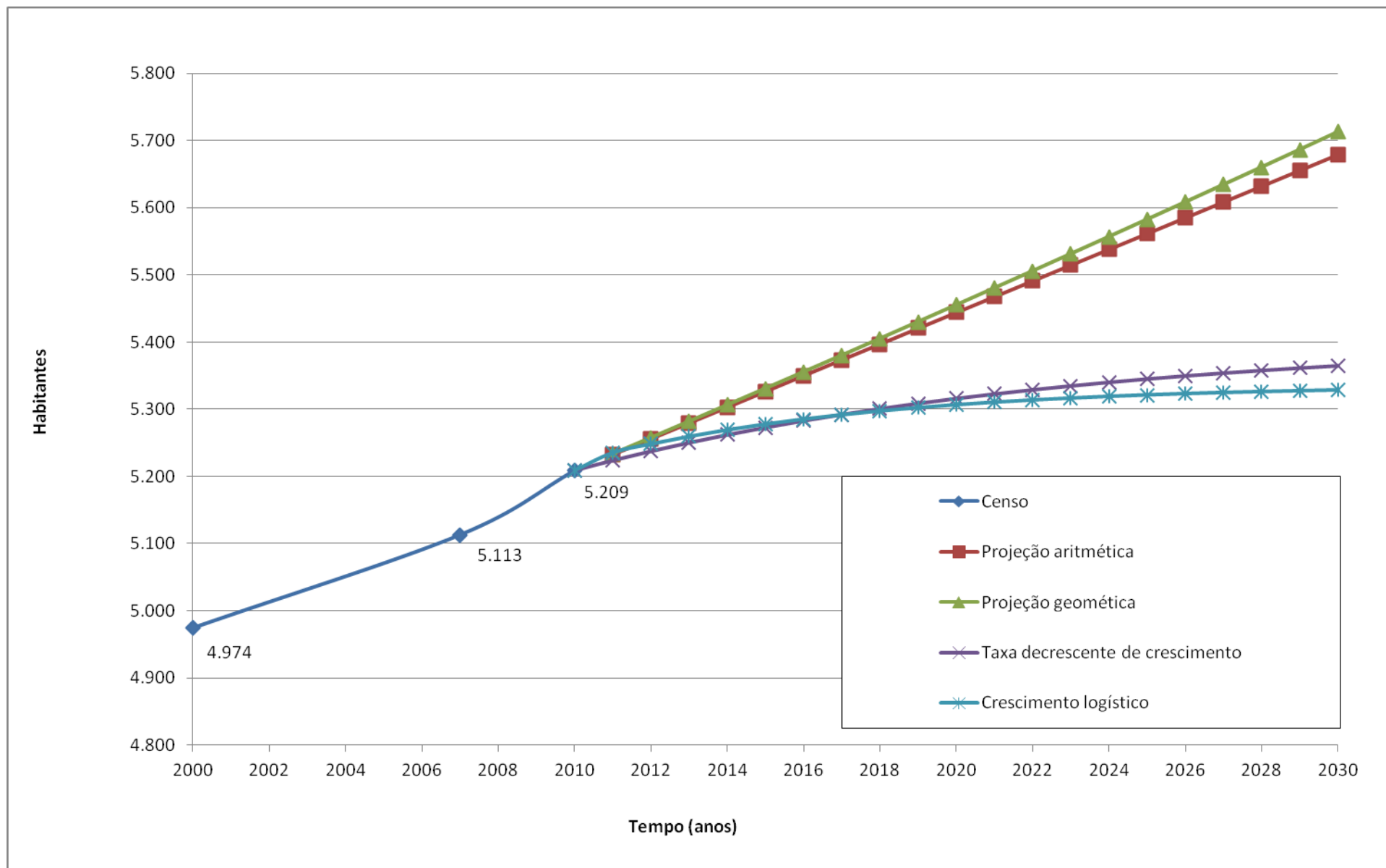
WILLUMSEN, H. C. **Energy recovery from landfill gas in Denmark and worldwide**. Viborg, Dinamarca: LFG Consult, 2001.

ZVEILBIL, V.Z. (coord.). **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

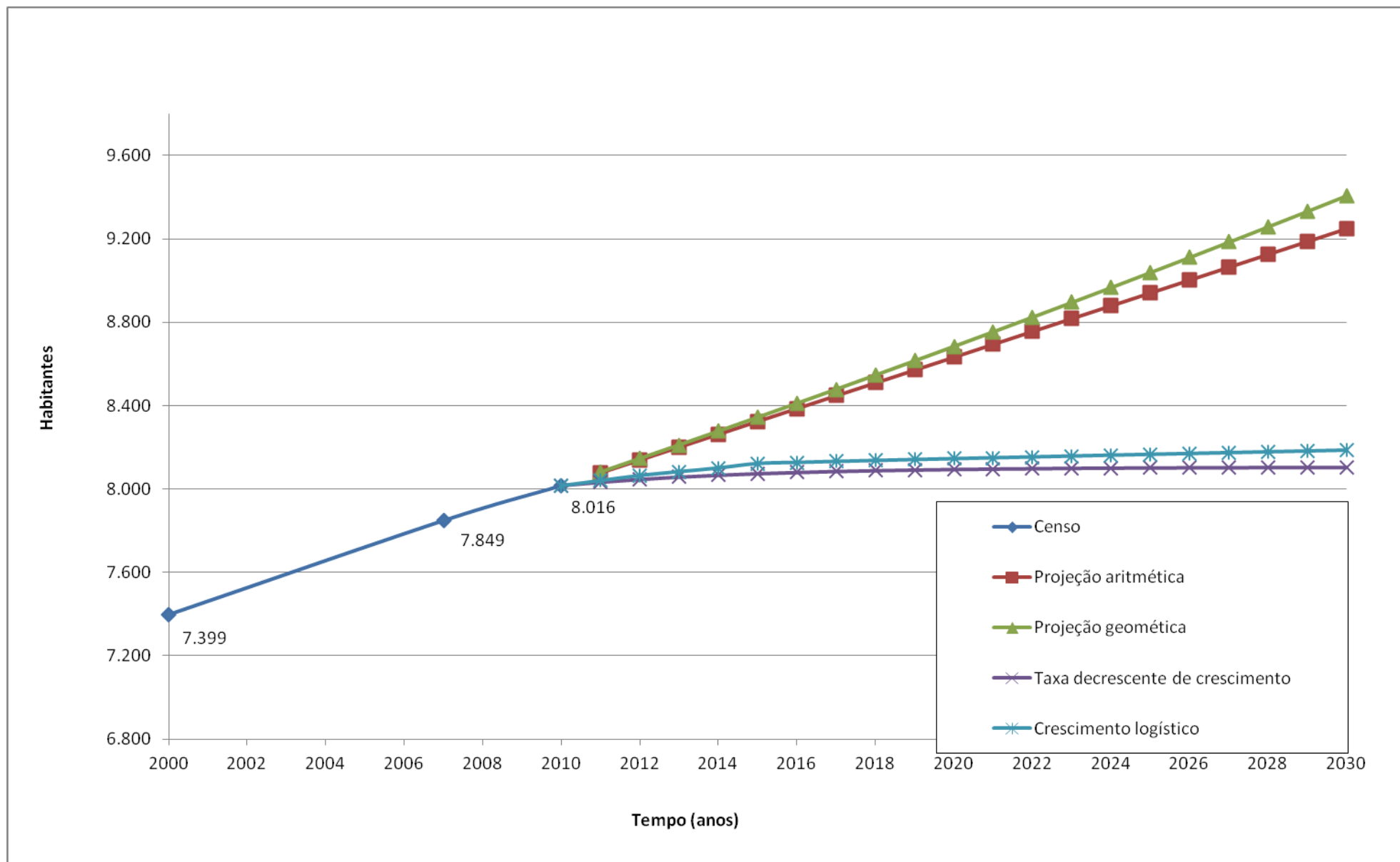
**ANEXO A – Projeções Populacionais para o Município de Delfim
Moreira.**



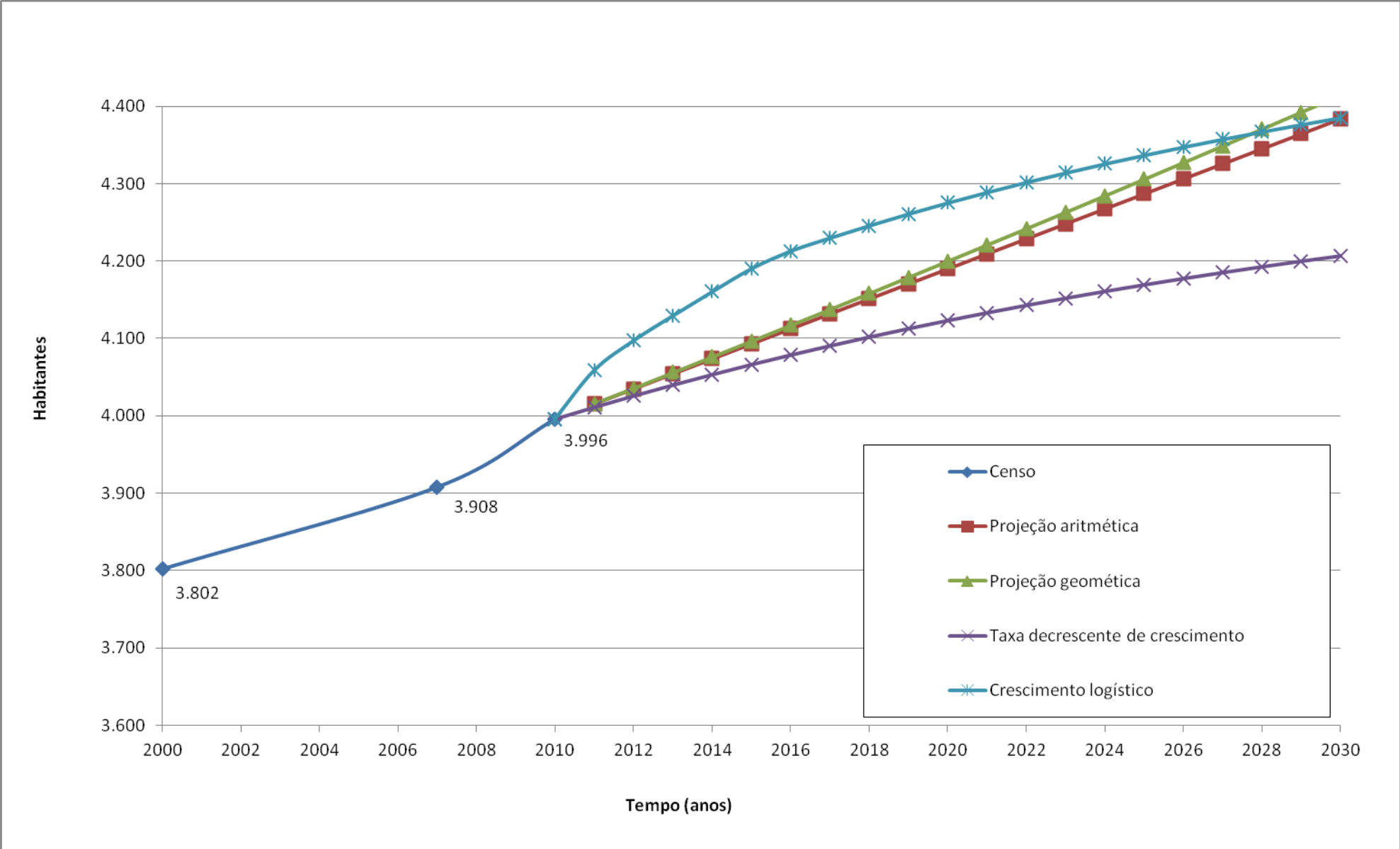
**ANEXO B – Projeções Populacionais para o Município de
Piranguçu.**



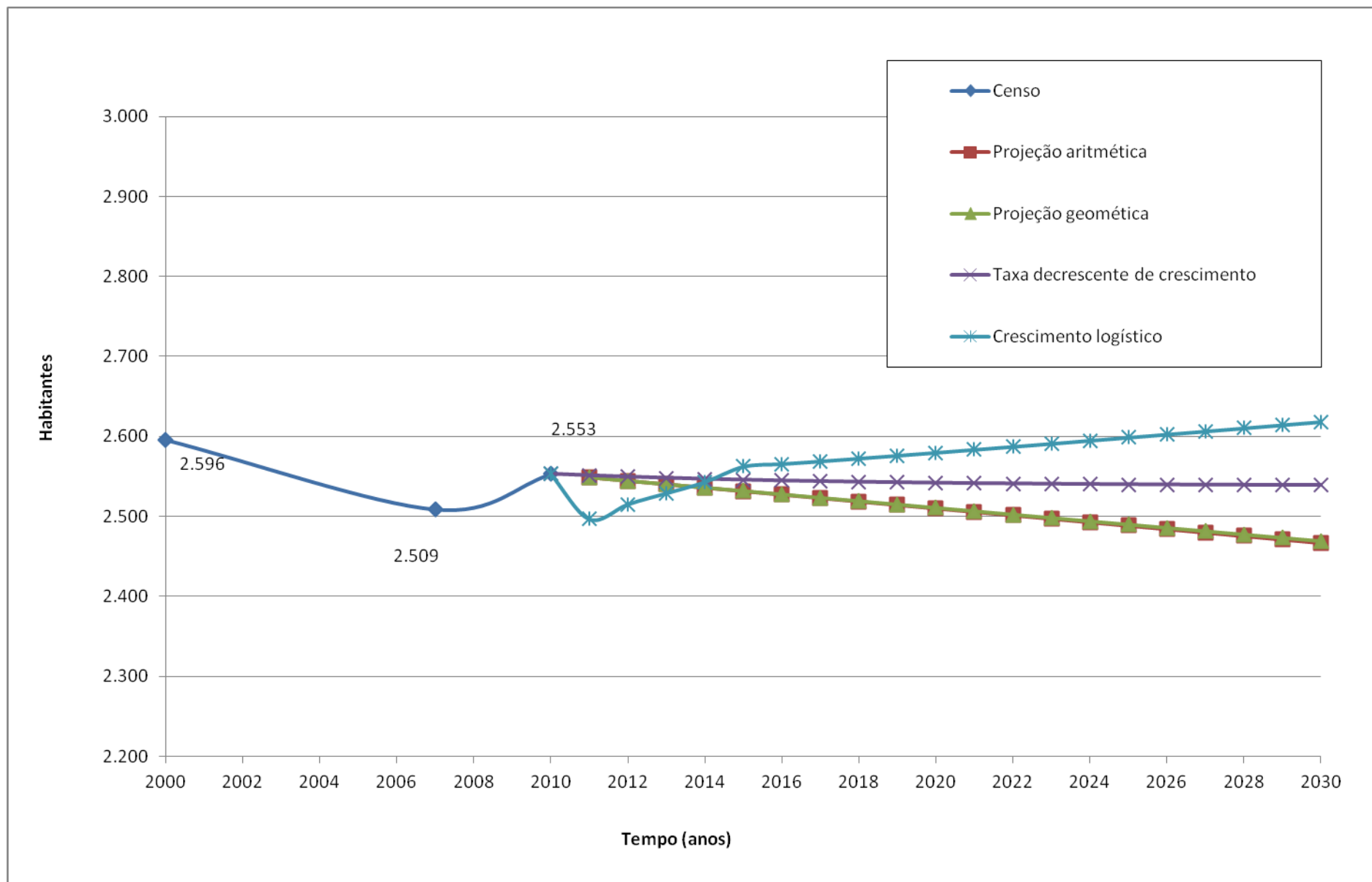
**ANEXO C – Projeções Populacionais para o Município de
Piranguinho.**



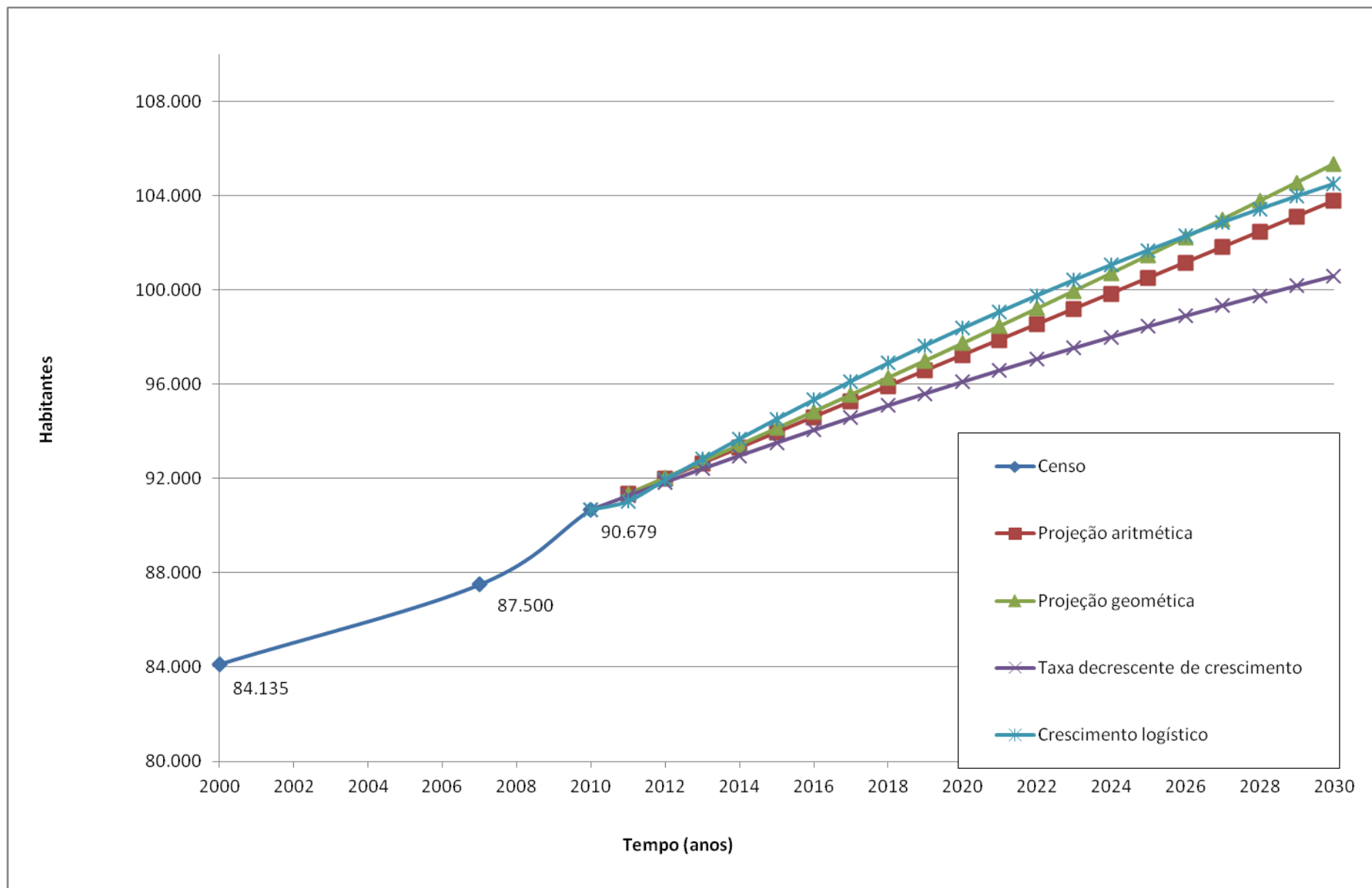
**ANEXO D – Projeções Populacionais para o Município de São
José do Alegre.**



**ANEXO E – Projeções Populacionais para o Município de
Wenceslau Braz.**



ANEXO F – Projeções Populacionais para o Município de Itajubá.



ANEXO G – Tabela 28 – Cálculo da Produção de Energia a partir da Estimativa da Geração de Metano segundo o LandGEM.

Tabela 28 – Cálculo da Produção de Energia a partir da Estimativa da Geração de Metano segundo o LandGEM.

Ano	Pop. (Taxa decresc. de crescimen.)	lixo/ano [ton]	LandGEM		Energia e Potência	
			(m ³ CH ₄ /ano)	80% CH ₄ (n ^o coleta)	kWh/ ano	kW ¹
2010	118.424	31.142	0	0	0	0
2011	119.054	31.315	258.840	207.072	2.174.259	82
2012	119.669	31.484	506.499	405.199	4.254.590	160
2013	120.269	31.650	743.487	594.790	6.245.292	235
2014	120.855	31.812	970.294	776.235	8.150.471	307
2015	121.428	31.971	1.187.386	949.909	9.974.046	376
2016	121.989	32.126	1.395.209	1.116.167	11.719.754	441
2017	122.538	32.278	1.594.186	1.275.348	13.391.159	504
2018	123.075	32.427	1.784.722	1.427.777	14.991.661	565
2019	123.600	32.573	1.967.203	1.573.762	16.524.501	622
2020	124.115	32.716	2.141.996	1.713.597	17.992.770	678
2021	124.619	32.856	2.309.454	1.847.563	19.399.412	731
2022	125.113	32.993	2.469.909	1.975.927	20.747.235	782
2023	125.598	33.128	2.623.680	2.098.944	22.038.915	830
2024	126.072	33.260	2.771.072	2.216.857	23.277.003	877
2025	126.537	33.389	2.912.373	2.329.898	24.463.929	922
2026	126.993	33.516	3.047.858	2.438.287	25.602.010	964
2027	127.439	33.641	3.177.792	2.542.233	26.693.452	1.006
2028	127.877	33.763	3.302.424	2.641.939	27.740.359	1.045
2029	128.307	33.883	3.421.993	2.737.594	28.744.737	1.083
2030			3.536.726	2.829.381	29.708.496	1.119
2031			3.364.238	2.691.390	28.259.596	1.065
2032			3.200.162	2.560.129	26.881.359	1.013
2033			3.044.088	2.435.270	25.570.339	963
2034			2.895.626	2.316.501	24.323.259	916
2035			2.754.405	2.203.524	23.137.000	872
2036			2.620.071	2.096.057	22.008.595	829
2037			2.492.288	1.993.831	20.935.223	789
2038			2.370.738	1.896.591	19.914.200	750
2039			2.255.116	1.804.093	18.942.973	714
2040			2.145.133	1.716.106	18.019.114	679
2041			2.040.513	1.632.411	17.140.311	646
2042			1.940.996	1.552.797	16.304.368	614
2043			1.846.333	1.477.066	15.509.195	584
2044			1.756.286	1.405.029	14.752.802	556
2045			1.670.631	1.336.505	14.033.300	529
2046			1.589.153	1.271.323	13.348.888	503
2047			1.511.649	1.209.320	12.697.855	478
2048			1.437.925	1.150.340	12.078.573	455
2049			1.367.797	1.094.238	11.489.494	433
2050			1.301.089	1.040.871	10.929.145	412
2051			1.237.634	990.107	10.396.124	392
2052			1.177.274	941.819	9.889.099	373

Tabela 29 – Cálculo da Produção de Energia a partir da Estimativa da Geração de Metano segundo o LandGEM.

Ano	Pop. (Taxa decresc. de crescimen.)	lixo/ano [ton]	LandGEM		Energia e Potência	
			(m ³ CH4/ano)	80% CH4 (ª coleta)	kWh/ ano	kW ¹
2053			1.119.857	895.886	9.406.802	354
2054			1.065.241	852.193	8.948.027	337
2055			1.013.289	810.631	8.511.627	321
2056			963.870	771.096	8.096.510	305
2057			916.862	733.489	7.701.638	290
2058			872.146	697.717	7.326.025	276
2059			829.611	663.689	6.968.730	263
2060			789.150	631.320	6.628.861	250
2061			750.663	600.530	6.305.568	238
2062			714.053	571.242	5.998.042	226
2063			679.228	543.382	5.705.514	215
2064			646.102	516.881	5.427.253	204
2065			614.591	491.673	5.162.562	194
2066			584.617	467.693	4.910.781	185
2067			556.105	444.884	4.671.280	176
2068			528.983	423.187	4.443.459	167
2069			503.184	402.547	4.226.749	159
2070			478.644	382.915	4.020.608	151
2071			455.300	364.240	3.824.520	144
2072			433.095	346.476	3.637.996	137
2073			411.973	329.578	3.460.569	130
2074			391.880	313.504	3.291.795	124
2075			372.768	298.215	3.131.252	118
2076			354.588	283.670	2.978.539	112
2077			337.295	269.836	2.833.274	107
2078			320.845	256.676	2.695.094	102
2079			305.197	244.157	2.563.653	97
2080			290.312	232.250	2.438.622	92
2081			276.153	220.923	2.319.689	87
2082			262.685	210.148	2.206.556	83
2083			249.874	199.899	2.098.941	79
2084			237.687	190.150	1.996.575	75
2085			226.095	180.876	1.899.201	72
2086			215.069	172.055	1.806.576	68
2087			204.579	163.664	1.718.468	65
2088			194.602	155.682	1.634.657	62
2089			185.111	148.089	1.554.934	59
2090			176.083	140.867	1.479.099	56

Tabela 30 – Cálculo da Produção de Energia a partir da Estimativa da Geração de Metano segundo o LandGEM.

Ano	Pop. (Taxa decresc. de crescimen.)	lixo/ano [ton]	LandGEM		Energia e Potência	
			(m ³ CH4/ano)	80% CH4 (ª coleta)	kWh/ ano	kW ¹
2091			167.496	133.996	1.406.962	53
2092			159.327	127.461	1.338.344	50
2093			151.556	121.245	1.273.072	48
2094			144.165	115.332	1.210.984	46
2095			137.134	109.707	1.151.923	43
2096			130.446	104.357	1.095.743	41
2097			124.084	99.267	1.042.303	39
2098			118.032	94.426	991.470	37
2099			112.276	89.820	943.115	36
2100			106.800	85.440	897.119	34
2101			101.591	81.273	853.366	32
2102			96.637	77.309	811.747	31
2103			91.923	73.539	772.157	29
2104			87.440	69.952	734.499	28
2105			83.176	66.541	698.677	26
2106			79.119	63.295	664.602	25
2107			75.261	60.208	632.189	24
2108			71.590	57.272	601.357	23
2109			68.099	54.479	572.028	22
2110			64.777	51.822	544.130	20
2111			61.618	49.295	517.593	19
2112			58.613	46.890	492.349	19
2113			55.754	44.604	468.337	18
2114			53.035	42.428	445.496	17
2115			50.449	40.359	423.769	16
2116			47.988	38.391	403.101	15
2117			45.648	36.518	383.442	14
2118			43.422	34.737	364.741	14
2119			41.304	33.043	346.953	13
2120			39.289	31.432	330.032	12
2121			37.373	29.899	313.936	12
2122			35.551	28.440	298.625	11
2123			33.817	27.053	284.061	11
2124			32.168	25.734	270.207	10
2125			30.599	24.479	257.029	10
2126			29.106	23.285	244.493	9
2127			27.687	22.149	232.569	9
2128			26.337	21.069	221.227	8
2129			25.052	20.042	210.437	8
2130			23.830	19.064	200.174	8
2131			22.668	18.134	190.412	7
2132			21.563	17.250	181.125	7
2133			20.511	16.409	172.292	6

Tabela 31 – Cálculo da Produção de Energia a partir da Estimativa da Geração de Metano segundo o LandGEM.

Ano	Pop. (Taxa decresc. de crescimen.)	lixo/ano [ton]	LandGEM		Energia e Potência	
			(m ³ CH4/ano)	80% CH4 (n ^o coleta)	kWh/ ano	kW ¹
2134			19.511	15.608	163.889	6
2135			18.559	14.847	155.896	6
2136			17.654	14.123	148.293	6
2137			16.793	13.434	141.060	5
2138			15.974	12.779	134.181	5
2139			15.195	12.156	127.637	5
2140			14.454	11.563	121.412	5
2141			13.749	10.999	115.491	4
2142			13.078	10.463	109.858	4
2143			12.440	9.952	104.500	4
2144			11.834	9.467	99.404	4
2145			11.257	9.005	94.556	4
2146			10.708	8.566	89.944	3
2147			10.185	8.148	85.557	3
2148			9.689	7.751	81.385	3
2149			9.216	7.373	77.416	3
2150			8.767	7.013	73.640	3

ANEXO H – Tabela 29 – Análise Econômica.

Tabela 29 – Análise Econômica.

Potência Instalada	Área do Trapézio (Energia gerada)	Fator de Capacidade	Investimento Inicial	Custo Anual (CA)	Benefício Anual (BA)	Benefício Líquido (BL)	ΔCA	ΔBA	$\Delta BA/\Delta CA$	TIR	VLP
kW	kWh/h	FC	Io	CA	BA	BL					
1.119,2	247,3	0,22	1.481.841,29	223.808	236.635	12.827	0	0	0	3,9%	R\$ 89.182,17
963,3	243,4	0,25	1.302.890,73	205.612	232.905	27.293	18.196	3.730	0,20	12,9%	R\$ 57.361,30
788,7	230,3	0,29	1.097.445,75	184.722	220.372	35.650	20.890	12.533	0,60	19,2%	R\$ 151.494,25
645,7	212,4	0,33	924.396,15	167.126	203.270	36.144	17.596	17.102	0,97	21,6%	R\$ 171.998,30
504,5	187,7	0,37	747.962,91	149.187	179.616	30.430	17.940	23.654	1,32	20,3%	R\$ 137.059,11
391,6	162,3	0,41	601.929,73	134.338	155.321	20.983	14.849	24.295	1,64	15,4%	R\$ 65.776,78
305,0	138,5	0,45	485.724,07	122.522	132.522	10.000	11.816	22.799	1,93	7,1%	R\$ 22.080,78
226,0	112,8	0,50	375.493,33	111.314	107.934	-3.380	11.208	24.588	2,19	#NUM!	R\$ 132.013,03
160,3	88,2	0,55	279.659,75	101.569	84.363	-17.206	9.744	23.571	2,42	#NUM!	R\$ 247.296,58
118,0	70,2	0,59	214.979,08	94.992	67.151	-27.842	6.577	17.212	2,62	#NUM!	R\$ 336.811,60
83,1	53,6	0,65	159.212,65	89.322	51.315	-38.007	5.670	15.835	2,79	#NUM!	R\$ 422.929,92
61,6	42,3	0,69	123.080,76	85.648	40.491	-45.158	3.674	10.825	2,95	#NUM!	R\$ 483.799,03
43,4	31,9	0,73	91.153,12	82.402	30.484	-51.918	3.246	10.007	3,08	#NUM!	R\$ 541.555,69
30,6	23,8	0,78	67.507,64	79.997	22.818	-57.179	2.404	7.665	3,19	#NUM!	R\$ 586.610,22
21,5	17,7	0,82	49.995,89	78.217	16.985	-61.232	1.781	5.834	3,28	#NUM!	R\$ 621.386,47
15,2	13,1	0,86	37.026,75	76.898	12.569	-64.329	1.319	4.415	3,35	#NUM!	R\$ 647.995,20
10,7	9,7	0,90	27.421,87	75.922	9.243	-66.678	977	3.326	3,41	#NUM!	R\$ 668.204,81
7,5	7,1	0,94	20.308,52	75.198	6.748	-68.450	723	2.495	3,45	#NUM!	R\$ 683.457,43
5,3	5,1	0,96	15.040,41	74.663	4.883	-69.779	536	1.865	3,48	#NUM!	R\$ 694.905,86
3,7	3,7	0,98	11.138,87	74.266	3.494	-70.772	397	1.389	3,50	#NUM!	R\$ 689.469,75
0,0	0,0	0,00	0,00	73.133	0	-73.133	1.133	3.494	3,09	0%	R\$ 0,00

