

MARTA CECATO ARMANDO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO BIOGÁS GERADO E SISTEMAS DE
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NO ATERRO SANITÁRIO DO
MUNICÍPIO DE TOLEDO-PR**

DISSERTAÇÃO

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2013

MARTA CECATO ARMANDO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO BIOGÁS GERADO E SISTEMAS DE
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NO ATERRO SANITÁRIO DO
MUNICÍPIO DE TOLEDO-PR**

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

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi.

Co-Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

A757a Armando, Marta Cecato
Avaliação do potencial do biogás gerado e sistemas de aproveitamento energético no aterro sanitário do município de Toledo-PR.
/ Marta Cecato Armando — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013.
118 p.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi
Co-orientador: Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Baricatti
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Biogás. 3. Aterro sanitário. 4. Método de estimativa. 5. Emissão de metano. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 333.79

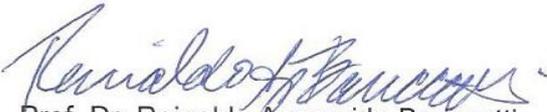
MARTA CECATO ARMANDO

“Avaliação do potencial do biogás gerado e sistemas de aproveitamento energético no aterro sanitário do município de Toledo – PR”

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

Orientador:


Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Alexandre Sordi
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Londrina

Cascavel, 25 de fevereiro de 2013.

Dedico aos meus queridos pais Rosete e Marcio, os responsáveis por minha existência, por serem os meus dois grandes exemplos de amor pelo conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço com grande satisfação, a Deus por me fornecer mais uma chance de crescimento e superação.

À minha família, que sempre me motivou nos momentos de fraqueza.

À todos os meus queridos amigos, de dentro e fora da Prefeitura Municipal de Toledo, que estiveram presentes durante a realização de todo o trabalho, acompanhando as etapas, e que de alguma forma fizeram parte deste estudo, em especial a todos os colegas da Secretaria do Meio Ambiente, e aos funcionários do Aterro Sanitário de Toledo-PR.

Aos meus colegas de mestrado, em especial aos que me fizeram aprender algo a mais, e me forneceram experiências únicas das quais levarei pelo resto da vida como boas lembranças. Agradeço em especial à minha colega Luiza, que esteve comigo em quase todos os momentos, muitos deles divertidos e alguns difíceis.

Ao meu compreensivo e prestativo, orientador Ricardo Nagamine Costanzi, que apesar da distância, me auxiliou como se estivesse aqui.

Ao meu co-orientador Reinaldo A. Bariccatti, pela ajuda nas análises do biogás, e em várias discussões sobre o trabalho.

Agradeço a Prefeitura Municipal de Toledo-PR pelo fornecimento do espaço para realização da pesquisa, incluindo todas as informações fornecidas para o trabalho.

Agradeço à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, pelo conhecimento fornecido durante o mestrado.

Agradeço a BRF Brasil Foods S.A. por via do colega Adilson Borssoi, pelo fornecimento de alguns equipamentos de coleta de dados para o estudo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Ennio.....	4
Figura 2 – Sistematização de um aterro sanitário	11
Figura 3 – Destinação final de RSU no Estado do Paraná.....	12
Figura 4 – Destinação final de RSU no Brasil	13
Figura 5 – Fases de um típico processo de degradação de RSU em aterros	14
Figura 6 – Alternativas de Aproveitamento do biogás	19
Figura 7 – Localização do Município de Toledo	24
Figura 8 – Área do aterro sanitário de Toledo – PR	26
Figura 9 – Ensaio de Composição Gravimétrica	28
Figura 10 – Ponto 1 de coleta de biogás – Saída do queimador (célula 1)	30
Figura 11 – Ponto 2 de coleta de biogás – Antes do Filtro de limalha de ferro	30
Figura 12 – Ponto 3 de coleta de biogás – Entrada do Gerador	31
Figura 13 – Funcionamento da placa de fluxo.....	32
Figura 14 – Vista aérea da célula de estudo	33
Figura 15 – Processo de cravamento da placa de fluxo nos pontos de amostragem.....	34
Figura 16 – Kit Biogás com Biofoto Microprocessado	36
Figura 17 – Analisador instantâneo de gases de combustão Madur	37
Figura 18 – Obtenção do peso específico da amostra	56
Figura 19 – Triagem dos resíduos da amostra em tambores	56
Figura 20 – Análise do gás após queima pelo moto gerador.	65
Figura 21 – Tentativa de ensaio com medidor de vazão na placa de fluxo	66
Figura 22 – Ensaio com placa de fluxo no Ponto 10 – cobertura de terra.....	71
Figura 23 – Ensaio com placa de fluxo no Ponto 12 – cobertura de grama	73
Figura 24 – Pontos de emissão de metano pela camada de cobertura da célula experimental do aterro sanitário de Toledo - PR	74
Figura 25 – Cobertura da área com a geomembrana protetora	89
Figura 26 – Sistema de captação de chorume e biogás	89
Figura 27 – Moto bomba de recirculação de chorume alimentada a biogás	92
Figura 28 – Canalização do biogás do <i>flare</i> para o sistema de aproveitamento	93
Figura 29 – Soprador do sistema	93
Figura 30 – Filtro para remoção do gás sulfídrico	94
Figura 31 – Moto gerador movido à biogás.....	95
Figura 32 – Esteiras de triagem alimentadas pelo aproveitamento energético do biogás.....	96
Figura 33 – Prensa de compactação dos resíduos, e fardos depois de prensados ..	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características do biogás gerado por diferentes substratos.....	16
Quadro 2 – Dados para o cálculo do valor da constante de reação (k).....	79
Quadro 3 – Valor de DOC para Toledo	80
Quadro 4 – Valores de MCF para cada tipo de local de deposição de resíduos.....	82
Quadro 5 – Valores do índice de geração de metano para a constante k.....	113
Quadro 6 – Valores do carbono orgânico degradável (DOC) em resíduos sólidos urbanos	114
Quadro 7 – Classificação dos valores do Fator de Correção de Metano (MCF)	115
Quadro 8 – Modelos gerados para projeção e estimativa de crescimento populacional de Toledo-PR	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Participação dos Materiais no Total de RSU Coletado no Brasil	10
Tabela 2 – Comparação das emissões entre as tecnologias de conversão.....	21
Tabela 3 – Dados populacionais registrados pelo IBGE no município de Toledo	41
Tabela 4 – Variação da taxa de crescimento média anual de dados observados.....	42
Tabela 5 – Taxa de crescimento média anual calculada ano a ano para as projeções demográficas.....	49
Tabela 6 – Resíduos Domiciliares Gerados no Município de Toledo	50
Tabela 7 – Geração de Resíduos Sólidos Dispostos e Estimados, no Aterro Sanitário de Toledo	52
Tabela 8 – Divisão de setores de coleta de resíduos sólidos domiciliares no município de Toledo	54
Tabela 9 – Peso específico dos resíduos sólidos de cada setor de coleta no município de Toledo	55
Tabela 10 – Composição Gravimétrica dos resíduos sólidos no município de Toledo	57
Tabela 11 – Composição dos resíduos sólidos na América do Sul, Brasil e Toledo	58
Tabela 12 – Volume parcial de cada substância nas amostras.....	60
Tabela 13 – Proporção de metano (CH ₄) e dióxido de carbono (CO ₂) no biogás amostrado	61
Tabela 14 – Caracterização do biogás nos Pontos 2 e 3 do sistema.....	62
Tabela 15 – Características do biogás por análise do medidor portátil	63
Tabela 16 – Informações obtidas nos ensaios realizados com a placa de fluxo e nas análises das amostras coletadas	68
Tabela 17 – Valores médios oriundos dos dados da tabela 16.....	69
Tabela 18 – Valores de metano encontrados no biogás do aterro	82
Tabela 19 – Estimativa máxima acumulada de geração de metano no aterro sanitário	117
Tabela 20 – Estimativa mínima acumulada de geração de metano no aterro sanitário	118

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1 – Cromatograma injetando 0,3 mL dos padrões de ar, CH ₄ e CO ₂	36
Gráfico 2 – Inserção das linhas de tendência a partir dos dados populacionais	43
Gráfico 3 – Linhas de tendência para a 2ª fase de crescimento populacional de Toledo-Pr, dos anos de 1996, 2000, 2007 e 2010.	46
Gráfico 4 – Modelos matemáticos de projeção populacional	48
Gráfico 5 – Estimativa de geração de resíduos sólidos no município de Toledo.....	53
Gráfico 6 – Composição gravimétrica dos resíduos gerados no município de Toledo	58
Gráfico 7 – Cromatograma das amostras de biogás do Ponto 1	60
Gráfico 8 – Cromatograma do biogás no ensaio do ponto 7, com cobertura de grama	70
Gráfico 9 – Cromatograma do biogás no ensaio do ponto 10, com cobertura de terra	72
Gráfico 10 – Cromatograma do biogás no ensaio do ponto 12, com cobertura de grama	73
Gráfico 11 – Absorbância das amostras para determinação da concentração de gás sulfídrico	75
Gráfico 12 – Absorbância das amostras para determinação da concentração de amônia.....	77
Gráfico 13 – Estimativas de produção de metano (CH ₄) durante e após a vida útil do aterro sanitário	87
Gráfico 14 – Comportamento da vazão durante 01 hora de funcionamento do moto gerador	98
Gráfico 15 – Comportamento da vazão do biogás durante 01 dia de funcionamento do moto gerador	99

RESUMO

ARMANDO, Marta Cecato. Universidade Estadual do Oeste do Paraná; 2013. **Avaliação do potencial do biogás gerado e sistemas de aproveitamento energético no aterro sanitário do município de Toledo-PR.** Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi. Co-orientadores: Prof. Dr. Reinaldo Baricatti e Prof. Dr. Armin Feiden.

Existem atualmente diversos métodos de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos gerados nas áreas habitadas, porém, uma das formas mais utilizadas para destinação final de resíduos sólidos urbanos em países em desenvolvimento como o Brasil é o aterro sanitário. Na disposição final dos resíduos sólidos urbanos, diversos problemas ambientais devem ser considerados, sendo um deles, a emissão de gases pela decomposição do material orgânico. Os principais constituintes desses gases são o dióxido de carbono (CO_2) e o gás metano (CH_4), combinação esta chamada de biogás. Em proporções menores são encontrados, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, amônia, gás sulfídrico, monóxido de carbono, e diversos outros. O metano, que representa uma fração de 45 à 65% do biogás de aterro, é um gás combustível, poluente, e passível de ser transformado em energia térmica ou elétrica. Por esta razão, o presente trabalho tem o objetivo de quantificar, através de métodos de estimativa, o potencial energético do biogás produzido no aterro sanitário municipal de Toledo-PR, bem como avaliar as características do biogás aproveitado e emitido pela superfície do aterro sanitário, além de uma descrição do funcionamento dos sistemas de aproveitamento energético. O teor médio de metano do biogás aproveitado pelo aterro foi de 55,72% ($\text{DP}\pm 8,23$). E o teor médio de metano emitido pela camada de cobertura do aterro em pontos sem cobertura de grama foi de 11,52% ($\text{DP}\pm 0,53$), e em pontos com cobertura de grama foi de 0,42% ($\text{DP}\pm 0,53$). A vazão do biogás medida no sistema de geração de energia elétrica foi de $17,43 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Pelo método de estimativa de geração de metano, o potencial máximo estimado foi de $1.111,91 \text{ Ton} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$ em 2016. Atualmente, o sistema moto gerador movido a biogás em funcionamento no aterro sanitário de Toledo, e gera uma média de 160,26 kWh de energia elétrica. O plantio de grama na camada de cobertura do aterro apontou ser uma prática positiva para o encerramento das camadas, visto que a produção total de metano calculada para o aterro é significativa, em decorrência do teor de metano no biogás, e concentração de material orgânico presente nos resíduos sólidos urbanos gerados. O aproveitamento do biogás, e energia elétrica gerada no aterro tende a aumentar com o fechamento das próximas células de deposição.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Biogás. Aterro Sanitário. Método de Estimativa. Emissão de Metano

ABSTRACT

ARMANDO, Marta Cecato. Universidade Estadual do Oeste do Paraná; 2013. **Evaluation of the potential of biogas generated systems and energy used in the sanitary landfill in Toledo-PR.** Advisor: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi. Co-Advisor: Prof. Dr. Reinaldo Baricatti e Prof. Dr. Armin Feiden.

There are currently several methods of management of solid waste in inhabited areas, but one of the most used for disposal of urban solid waste in developing countries such as Brazil, are the sanitary landfills. In the final disposal of solid urban waste, several environmental problems must be considered, one of them is the emission of gases upon decomposition of organic material. The major constituent of such gases are carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), this combination is called biogas. In smaller proportions are found, nitrogen, oxygen, hydrogen, ammonia, hydrogen sulfide, carbon monoxide, and many others. Methane, which is a fraction of 45 to 65% of landfill biogas, is a combustible gas, pollutant, and that can be transformed into thermal or electrical energy. Therefore, this study aims to quantify, through estimation methods, the potential energy of biogas in the sanitary landfill of Toledo-PR, and evaluate the characteristics of biogas leveraged and issued by the surface of the sanitary landfill, in addition to a description of the functioning of the energy systems. The average content of methane from biogas leveraged by landfill was of 55.72% (SD ± 8.23). And the average content of methane emitted by the landfill cover layer in spots without grass covered was 11.52% (SD ± 0.53) and in points with grass cover was 0.42% (SD ± 0.53). The flow rate of biogas measurement in electrical power generation system was 17.43 m³.h⁻¹. By the method of estimation of generation of methane, the maximum potential was 1,111.91 Ton.CH₄.ano⁻¹ in 2016. Currently, the moto generator system moved the biogas plant in operation in the sanitary landfill Toledo, and generates an average of 160.26 kWh of electricity. The planting of grass cover layer of the landfill pointed out to be a positive practical for the closure of the layers, whereas the total production of methane calculated for the landfill is significant, due to the methane content in biogas and concentration of organic material present in urban solid waste. The use of biogas and electricity generated in the landfill tends to increase with the closing of the next cell deposition.

Keywords: Urban Solid Waste. Biogas. Sanitary Landfill. Estimation Method. Methane Emissions.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS	3
2.1.1 Biomassa	4
2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – RSU	6
2.2.1 Definição e classificação	6
2.2.2 Origem e situação atual	8
2.3 ATERROS SANITÁRIOS	10
2.3.1 Definição e dados gerais	10
2.3.2 Processos de degradação de resíduos sólidos em aterros sanitários	13
2.4 BIOGÁS	15
2.4.1 Caracterização	15
2.4.2 Condições necessárias à produção de Biogás em aterros	17
2.5 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS	18
2.5.1 Geração de energia elétrica com biogás	19
2.5.2 Geração de energia térmica com biogás	21
3 MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 ETAPA 1 – ESTUDOS DESCRITIVOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SÍTIO E DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS GERADOS	23
3.1.1 Município de Toledo-PR	23
3.1.1.1 <i>Hidrografia e relevo</i>	24
3.1.1.2 <i>Clima</i>	25
3.1.2 Descrição do Aterro Sanitário	25
3.1.3 Análise quantitativa dos RSU	27
3.1.4 Caracterização dos RSU	27
3.2 ETAPA 2 - ANÁLISE DO BIOGÁS GERADO PELO ATERRO EM DUAS VIAS: BIOGÁS APROVEITADO; E BIOGÁS EMITIDO PELA SUPERFÍCIE DE COBERTURA	29
3.2.1 Amostragem do biogás captado pelo aterro	29
3.2.2 Avaliação da emissão de metano pela superfície de cobertura do aterro sanitário	31
3.2.3 Análises das amostras coletadas no sistema gerador e na placa de fluxo	35
3.2.3.1 <i>Análise no Cromatógrafo à gás</i>	35
3.2.3.2 <i>Análises com Alfakit</i>	36
3.2.3.3 <i>Análises por Espectrofotometria UV-Vis</i>	37
3.2.3.4 <i>Análise instantânea por medidor portátil</i>	37
3.3 ETAPA 3 - AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE DE PRODUÇÃO DE METANO	38
3.3.1 Quantificação dos resíduos sólidos degradáveis	38
3.4 ETAPA 4 - ANÁLISE TÉCNICA DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA IMPLANTADOS NO ATERRO SANITARIO DE TOLEDO-PR	40
3.4.1 Análise e descrição dos sistemas de aproveitamento energético	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 ETAPA 1 – GERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS GERADOS	41
4.1.1 Crescimento populacional do município de Toledo	41

4.1.2	Geração de resíduos sólidos no município de Toledo-Pr	50
4.1.3	Caracterização dos resíduos sólidos do município	53
4.2	ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS GERADO PELO ATERRO EM DUAS VIAS: BIOGÁS APROVEITADO; E BIOGÁS EMITIDO PELA SUPERFÍCIE DE COBERTURA	59
4.2.1	Características do biogás aproveitado pelo aterro	59
4.2.1.1	<i>Resultados do Ponto 1 de coleta</i>	59
4.2.1.2	<i>Resultados dos Pontos 2 e 3 de coleta</i>	61
4.2.1.3	<i>Resultados da análise instantânea do biogás</i>	63
4.2.2	Características do biogás emitido pela camada de cobertura do aterro	66
4.2.2.1	<i>Testes iniciais de tentativa de medição de vazão</i>	66
4.2.2.2	<i>Resultados das análises do biogás em ensaios com a placa de fluxo</i>	67
4.2.2.3	<i>Resultados das análises da composição de metano e dióxido de carbono em cada ponto de ensaio</i>	70
4.2.2.4	<i>Resultados das análises de gás sulfídrico e amônia por espectrofotometria das amostras obtidas pelo Kit Biogás</i>	74
4.3	ETAPA 3 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO DO ATERRO SANITÁRIO DE TOLEDO	78
4.3.1	Variáveis do aterro utilizadas nas equações	78
4.3.1.1	<i>Constante de reação (k)</i>	78
4.3.1.2	<i>Carbono orgânico degradável (DOC)</i>	79
4.3.1.3	<i>Fração de carbono orgânico degradável passível de ser decomposto anaerobicamente (DOCf)</i>	80
4.3.1.4	<i>Tempo de retardo (Δ)</i>	81
4.3.1.5	<i>Fração de metano do gás gerado no aterro (F)</i>	81
4.3.1.6	<i>Fator de correção de metano (MCF)</i>	82
4.3.2	Utilização do método FOD para estimativa de geração de metano	83
4.3.2.1	<i>Cálculo do DDOCm</i>	84
4.3.2.2	<i>Cálculo do carbono orgânico degradável acumulado em cada ano (DDOCma)</i>	84
4.3.2.3	<i>Cálculo da quantidade de metano gerado acumulado no aterro sanitário a cada ano [CH₄ gen (i)]</i>	85
4.4	ETAPA 4 - ANÁLISE TÉCNICA DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA IMPLANTADOS NO ATERRO SANITARIO DE TOLEDO-PR	88
4.4.1	Sistema de captação do biogás e chorume	88
4.4.2	Funcionamento do sistema de moto bomba de recirculação do chorume	91
4.4.3	Sistema de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica	92
4.4.4	Medição de vazão do sistema de captação do biogás no grupo gerador de energia	98
	5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	ANEXO A	113
	ANEXO B	114
	ANEXO C	115
	ANEXO D	116
	ANEXO E	117
	ANEXO F	118

1 INTRODUÇÃO

Toda e qualquer geração e/ou consumo de energia é de alguma maneira impactante ao ambiente, no entanto, os padrões atuais de consumo ainda podem ser aperfeiçoados, estimulando o uso eficiente de energia e as ações de transição das fontes de energia fósseis para fontes renováveis (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Para Vanzin (2006), o crescimento da população e das atividades industriais trazem como conseqüência a demanda, cada vez maior, de energia e o aumento do descarte de resíduos sólidos, que por sua vez, vão gerar problemas ambientais, e demanda maior de custos.

Apesar das inúmeras experiências bem sucedidas na recuperação e reciclagem de constituintes dos resíduos sólidos urbanos, o montante total reaproveitado ainda não faz frente ao grande volume de resíduos gerados diariamente. Assim, tendo em vista que a incineração dos resíduos tem sua aplicabilidade técnica, econômica e ambiental restrita, o aterramento dos RSU responde pela destinação final da maior parte dos resíduos sólidos coletados no Brasil (LIBÂNIO, 2002).

No aterramento dos resíduos sólidos urbanos (RSU), diversos problemas ambientais devem ser considerados, sendo um deles, a emissão de gases pela decomposição do material orgânico. Os principais constituintes desses gases são o dióxido de carbono (CO_2) e o gás metano (CH_4), sendo este último 21 vezes mais potencialmente impactante para o aquecimento global do que o CO_2 .

Por esta, e outras razões, os vazadouros a céu aberto, ou também chamados de lixões, devem ser eliminados e os resíduos sólidos urbanos devem possuir destinação final ambientalmente adequada até o ano de 2014 em todo país, como estabelece a Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010, que Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

O aterro sanitário consiste na disposição dos resíduos sólidos no solo associada à aplicação de princípios de engenharia e de técnicas sanitárias de modo a minimizar os impactos ambientais causados pelo acúmulo desses resíduos. Sua concepção visa, além do armazenamento correto dos RSU, o aproveitamento do gás

gerado pela decomposição dos resíduos ao longo do tempo, chamado de biogás, considerado combustível, que pode ser transformado em energia.

Somente no Brasil, no ano de 2008, com uma população de 189,952 milhões de pessoas, foram coletados 183.481,50 toneladas de resíduos sólidos por dia nos municípios brasileiros, e destes, 94.335,10 toneladas eram compostos de material orgânico (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011); (IBGE, 2010a). Este dado, inicialmente representa um notável problema ambiental, mas com uma correta sistematização e manejo, torna-se uma grande fonte de biomassa potencialmente geradora de biogás, e energia nos aterros sanitários do país.

A expectativa para as próximas décadas é de que o país se adéqüe as exigências ambientais legais no que se refere à destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos gerados, e de que ocorra uma ascensão de novas tecnologias mundiais de otimização e aproveitamento de resíduos sólidos, tanto nos centros urbanos, quanto nas indústrias.

Sendo assim, o presente trabalho tem o objetivo de quantificar o potencial energético do biogás por metodologia específica (IPCC, 2006) do aterro sanitário municipal de Toledo-PR, bem como avaliar a quantidade de biogás utilizável e a sua emissão pela superfície; associada a uma descrição do funcionamento do sistema de aproveitamento energético instalado no aterro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

As fontes de energias renováveis, ou também denominadas fontes alternativas de energia, tem um papel fundamental no enfrentamento da crise de escassez das fontes não renováveis e dos combustíveis fósseis. O aumento das emissões dos gases efeito estufa (GEE), o aumento populacional, o crescimento da economia brasileira e a demanda de energia requerem a necessidade de um novo modelo de desenvolvimento socioeconômico (FURTADO, 2010).

Para *Le Monde Diplomatique* Brasil (2007), numa visão mundial, o crescimento das energias renováveis enfrentam um obstáculo político ideológico, mas o maior obstáculo é o econômico:

As fontes de energia alternativas não se diferenciam das tradicionais apenas por serem sustentáveis. Em todos os casos, sua produção adapta-se muito mais facilmente a um modelo descentralizado e desconcentrador de produção. A lógica não é mais gerar eletricidade em imensos empreendimentos comandados por grandes corporações. Até as pequenas comunidades devem e podem tornar-se autônomas em energia. Para tanto, não é preciso mobilizar enormes volumes de dinheiro. Um sinal de que o capitalismo pode estar sendo superado, também, no terreno em que sempre afirmou sua superioridade: o da “eficiência” produtiva.

No Brasil, é possível afirmar que as fontes renováveis estão em fase de expansão e desenvolvimento. A participação deste tipo de energia na produção de eletricidade aumentou em 2011, atingindo 88,8% na matriz elétrica brasileira, já na matriz energética do país, atingiu 44,1% no mesmo ano. Em contrapartida, a média mundial em 2009, alcançou 19,5% das fontes renováveis participando da produção de eletricidade no mundo, próximo ao percentual de 13,3% de fontes renováveis na matriz energética mundial também em 2009 (EPE, 2012).

As diferentes fontes de energia, além de renováveis e não renováveis, também são divididas em fontes primárias e fontes secundárias. Esta análise é realizada pelo diagrama de Ennio (Figura 1).

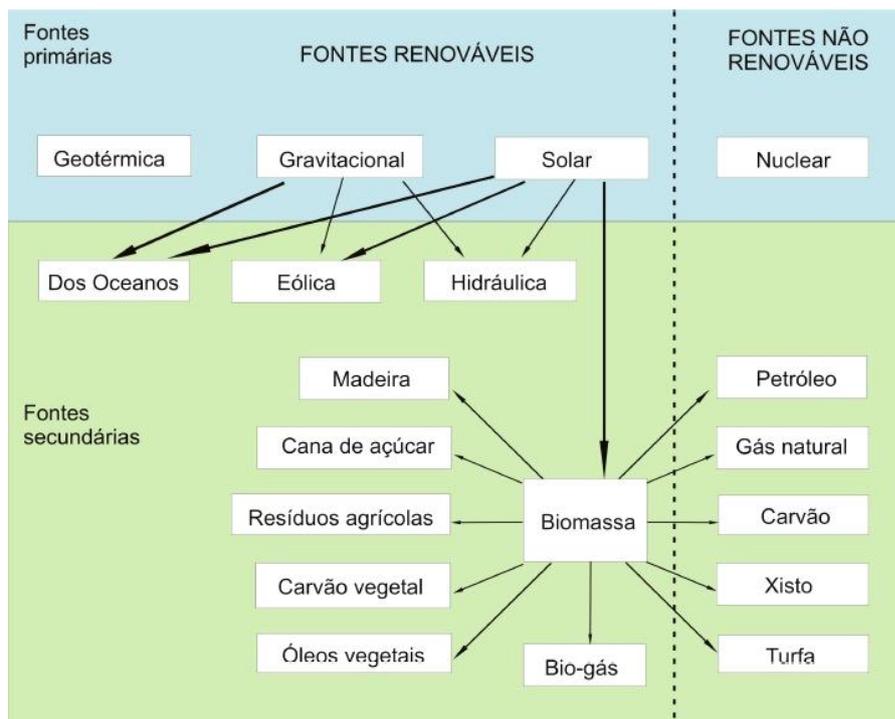


Figura 1 – Diagrama de Ennio

Fonte: IGNÁCIO (2007)

Existem três diferentes fontes primárias de energia: solar, geotérmica, e gravitacional, sendo que todas elas são consideradas fontes renováveis. Há ainda as chamadas fontes secundárias de energia renovável: energia dos oceanos, energia eólica, energia hidráulica e energia da biomassa. Logo, as fontes não renováveis de energia primárias como a nuclear; e fontes secundárias de energia não renovável como os derivados de petróleo, o gás natural, o carvão mineral, a turfa e o xisto, todos estes, são subprodutos da biomassa.

2.1.1 Biomassa

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. Dentre as renováveis, a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a conseqüente redução da dependência dos combustíveis fósseis (ANEEL, 2002).

No Brasil, no ano de 2007, a biomassa obteve participação de 31,1% na matriz energética, e foi a segunda principal fonte de energia, superada apenas por petróleo e derivados (ANEEL, 2008).

Atualmente, existem 438 usinas movidas a biomassa em operação no país, destas, 39 usinas estão no estado do Paraná. As mesmas são abastecidas por combustíveis como: licor negro (resíduo de celulose) (1 usina) ; resíduos de madeira (9 usinas); biogás (7 usinas); e bagaço de cana (22 usinas) (ANEEL, 2012).

Segundo Genovese; Udaeta e Galvao (2006) estudos recentes mostram quem em cenários futuros haverá muitas vantagens em produzir energia da biomassa, principalmente quando as fontes de energia renovável se tornarem competitivas em relação aos combustíveis fósseis, o que se espera que ocorra por volta de 2020. No Brasil, a biomassa como fonte de energia possui vantagens significativas, principalmente por:

- a) Diversificar a matriz energética brasileira face à dependência externa do país com relação aos combustíveis fósseis (petróleo e gás natural);
- b) Contribuir para um desenvolvimento sustentável do país, em particular com a utilização de mão de obra local, principalmente na zona rural, podendo colaborar na garantia de suprimento de energia a comunidades isoladas, principalmente nas regiões Norte e Centro Oeste do país;
- c) Apresentar vantagens ambientais quando comparada aos combustíveis fósseis, principalmente em termos de emissões de gases do efeito estufa.

No estado do Paraná, consolidado por uma economia fortemente movida a agricultura e pecuária, cujas atividades produtivas geram todos os meses enormes quantidades de biomassa, essas, se aproveitadas e utilizadas de forma correta, representam grande potencial energético para a indústria, e para os pequenos e grandes produtores rurais.

Por meio de sistemas de biodigestão, que podem ser dimensionados através de custos variáveis, é possível obter quantidades significativas de biogás gerado pela degradação de diversos tipos de biomassa residual, e com isso, obter retornos econômicos e ambientais.

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – RSU

2.2.1 Definição e classificação

Segundo a Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, no seu Art. 3º inciso XVI, define resíduos sólidos como:

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

Segundo a NBR 10004:2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), que classifica os resíduos sólidos de acordo com seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, divide-os por:

- a) Resíduos classe I – Perigosos: são aqueles que apresentam inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade; ou seja, são os resíduos que oferecem risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada;
- b) Resíduos classe II – Não Perigosos: estes, divididos em duas sub classes:
 - Resíduos classe II A – Não Inertes: são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos classe II B. Estes resíduos podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - Resíduos classe II B – Inertes: são aqueles resíduos que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tenham

nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2010), apresenta uma classificação dos resíduos sólidos segundo sua origem pelas diferentes atividades humanas, sendo eles:

- a) Resíduos sólidos urbanos: são os resíduos provenientes de residências, estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços (domiciliares), da varrição, de podas e da limpeza de vias, logradouros públicos e sistemas de drenagem urbana passíveis de contratação ou delegação a particular, nos termos de lei municipal.
- b) Resíduos de serviço de saúde: são os resíduos provenientes de qualquer unidade que execute atividades de natureza médico-assistencial humana ou animal; os provenientes de centros de pesquisa, desenvolvimento ou experimentação na área de farmacologia e saúde; medicamentos e imunoterápicos vencidos ou deteriorados; os provenientes de necrotérios, funerárias e serviços de medicina legal; e os provenientes de barreiras sanitárias.
- c) Resíduo sólidos industriais: são os resíduos provenientes de atividades de pesquisa e de transformação de matérias-primas e substâncias orgânicas ou inorgânicas em novos produtos, por processos específicos, bem como os provenientes das atividades de mineração e extração, de montagem e manipulação de produtos acabados e aqueles gerados em áreas de utilidade, apoio, depósito e de administração das indústrias e similares, inclusive resíduos provenientes de Estações de Tratamento de Água - ETAs e Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs.
- d) Resíduos de atividades rurais: Provenientes da atividade agropecuária, inclusive os resíduos dos insumos utilizados.
- e) Resíduos provenientes de portos, aeroportos, terminais rodoviários, e ferroviários, postos de fronteira e estruturas similares: são os resíduos

sólidos de qualquer natureza provenientes de embarcação, aeronave ou meios de transporte terrestre, incluindo os produzidos nas atividades de operação e manutenção, os associados às cargas e aqueles gerados nas instalações físicas ou áreas desses locais.

- f) Resíduos da construção civil: são os comumente chamados de entulhos de obras, provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, pavimento asfáltico, tubulações, entre outros.
- g) Resíduos especiais: são os resíduos gerados pelo descarte de eletrodomésticos e eletrônicos, além de lâmpadas, pilhas e baterias.

Os resíduos sólidos podem ser também classificados de acordo com seu grau de degradabilidade, podendo ser:

- a) Facilmente degradáveis: é a matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de origem urbana;
- b) Moderadamente degradáveis: papéis, papelão e material celulósico;
- c) Dificilmente degradáveis: pedaços de tecido, aparas e serragens de couro, borracha e madeira;
- d) Não-degradáveis: incluem-se os vidros, metais, plásticos, pedras, terra, entre outros (BIDONE; POVINELLI, 1999).

2.2.2 Origem e situação atual

A palavra “resíduo” deriva do latim “*residum*”, que traduz a diminuição do valor de uma matéria, de um objeto, e é definido como toda a substância que o produtor abandona, destinada ao abandono ou que se encontra forçado a abandonar (PICHAT, 1995).

A preocupação sobre qual destino dar ao “lixo”, resíduos das diversas atividades humanas, surgiu a cerca de dez mil anos quando o homem começou a

adquirir hábitos sedentários, fixando sua moradia em locais específicos. Antes disso, seus costumes nômades permitiam deixar seus resíduos para trás, conforme se mudava de local habitado (VIVEIROS, 2006).

A geração de resíduos sólidos urbanos está diretamente relacionada com a população urbana, seu padrão de vida e hábitos de consumo. A coleta, tratamento e disposição adequada destes resíduos refletem a qualidade de vida da população, a qualidade das águas dos rios e águas subterrâneas, atividade pesqueira e vetores patogênicos (GARCILASSO; VELÁZQUEZ; COELHO, 2010).

Somente no Estado do Paraná, durante o ano de 2011, com uma população total de 8.974.350 habitantes foram gerados por dia, cerca de 8.401 toneladas de resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2011).

Neste contexto, a disposição final dos resíduos sólidos urbanos é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos em todo o mundo e tende a agravar-se com o aumento do consumo de bens descartáveis, que passam cada vez mais a compor os grandes volumes de resíduos sólidos urbanos gerados pela população (GARCILASSO; VELÁZQUEZ; COELHO, 2010).

A composição gravimétrica do resíduo sólido urbano acompanha diretamente as modificações econômicas e as transformações tecnológicas, que vêm influenciando o modo de vida dos centros urbanos em um ritmo cada vez mais acelerado, gerando conseqüentemente mais resíduos (ENSINAS, 2003).

No Brasil, a composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados, são formados em sua maior parte de matéria orgânica, 51,4%, como observado na Tabela 1. A referida composição, porém, é bastante diversificada nas diferentes regiões, uma vez que está diretamente relacionada com características, hábitos e costumes de consumo e descarte da população local.

Tabela 1 - Participação dos Materiais no Total de RSU Coletado no Brasil

MATERIAL	PARTICIPAÇÃO (%)	QUANTIDADE (t/ano)
Metais	2,9	1.610.499
Papel, papelão, e TetraPak	13,1	7.275.012
Plástico	13,5	7.497.149
Vidro	2,4	1.332.827
Matéria Orgânica	51,4	28.544.702
Outros	16,7	9.274.251
TOTAL	100,0	55.534.440

Fonte: ABRELPE (2011); Ministério Do Meio Ambiente (2011).

2.3 ATERROS SANITÁRIOS

2.3.1 Definição e dados gerais

Dentre as várias alternativas conhecidas para disposição de resíduos sólidos, a prática de áreas para aterramento dos resíduos sólidos urbanos ainda é a mais comum, devido principalmente ao seu baixo custo, a facilidade de execução e a grande capacidade de absorção de resíduos quando comparado às outras formas de destinação final como a incineração, a compostagem e a reciclagem. Neste sistema de aterramento, diversos problemas ambientais devem ser considerados, sendo um deles a emissão de gases pela decomposição do material orgânico (ENSINAS, 2003).

Na figura 2 é apresentado o esquema de um de aterro, mostrando três diferentes momentos de sua operação, que coexistem: a preparação, a execução e a etapa já concluída, além dos componentes que compõem um aterro.

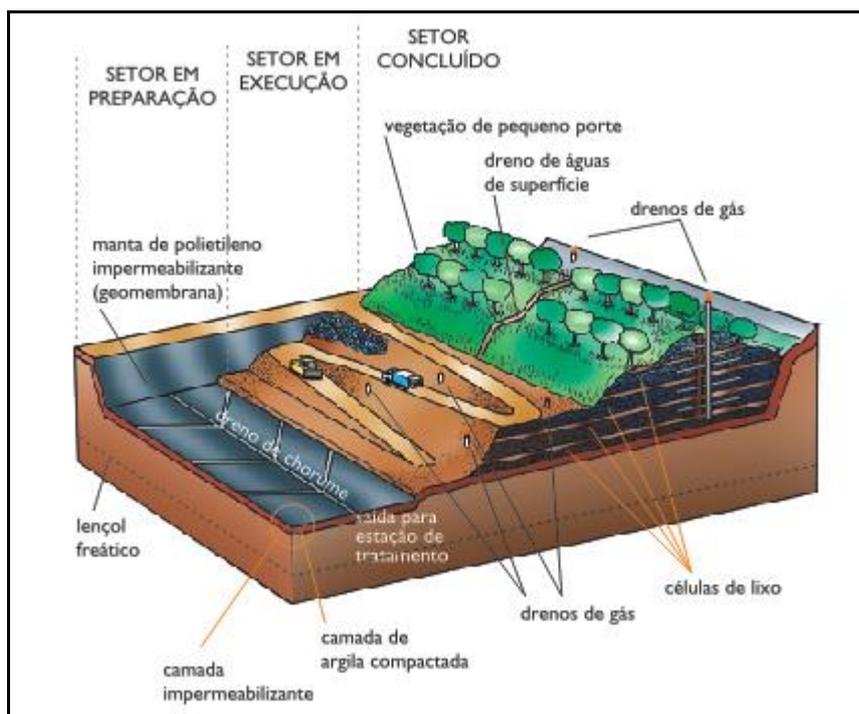


Figura 2 – Sistematização de um aterro sanitário

Fonte: Disponível em <<http://danieltha.com/>> Acesso em 29 jul. 2012

De acordo com o IBGE (2010b), pela Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do ano de 2008, são definidas as diferentes categorias de sistemas de disposição final de resíduos sólidos:

Lixão (vazadouro a céu aberto): local utilizado para disposição de resíduos sólidos, em estado bruto, sobre o terreno, sem qualquer cuidado ou técnica especial. O vazadouro a céu aberto caracteriza-se pela falta de medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.

Aterro controlado: local utilizado para despejo de resíduos sólidos, coletados em estado bruto, com cuidado de, diariamente, após a jornada de trabalho, cobrir os resíduos com uma camada de terra de modo a não causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, bem como minimizar os impactos ambientais

Aterro sanitário: instalação de destinação final dos resíduos sólidos urbanos através de sua adequada disposição no solo, sob controles técnico e operacional permanentes, de modo a que nem os resíduos, nem seus efluentes líquidos e gasosos, venham a causar danos à saúde pública e/ou ao meio ambiente. Para tanto, o aterro sanitário deverá ser localizado, projetado, instalado,

operado e monitorado em conformidade com a legislação ambiental vigente e com as normas técnicas oficiais que regem essa matéria.

Verifica-se que em 2002, segundo IBGE (2002), 63,6% dos municípios brasileiros utilizavam lixões como forma de disposição dos resíduos sólidos urbanos, 18,4% utilizavam aterros controlados e apenas 13,8% dispunham os resíduos em aterros sanitários, situação ambientalmente preocupante, que exigiu dos municípios providências urgentes para a reversão desse quadro.

Na figura 3 observa-se a situação atual em que se encontra a destinação final dos resíduos sólidos gerados no estado do Paraná, e na figura 4 a destinação dos RSU gerados em todo país.

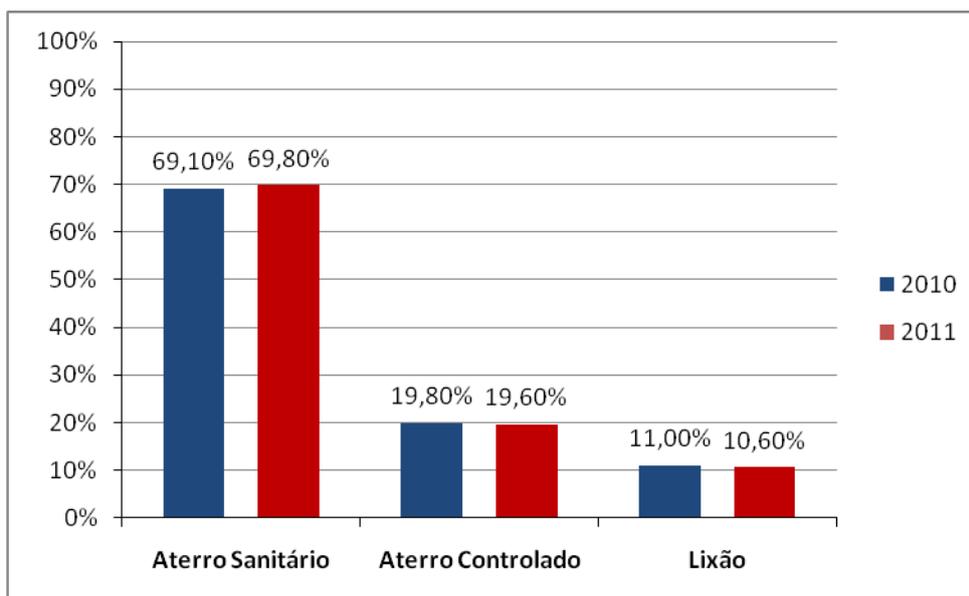


Figura 3 - Destinação final de RSU no Estado do Paraná

Fonte: Pesquisa ABRELPE 2010 e 2011

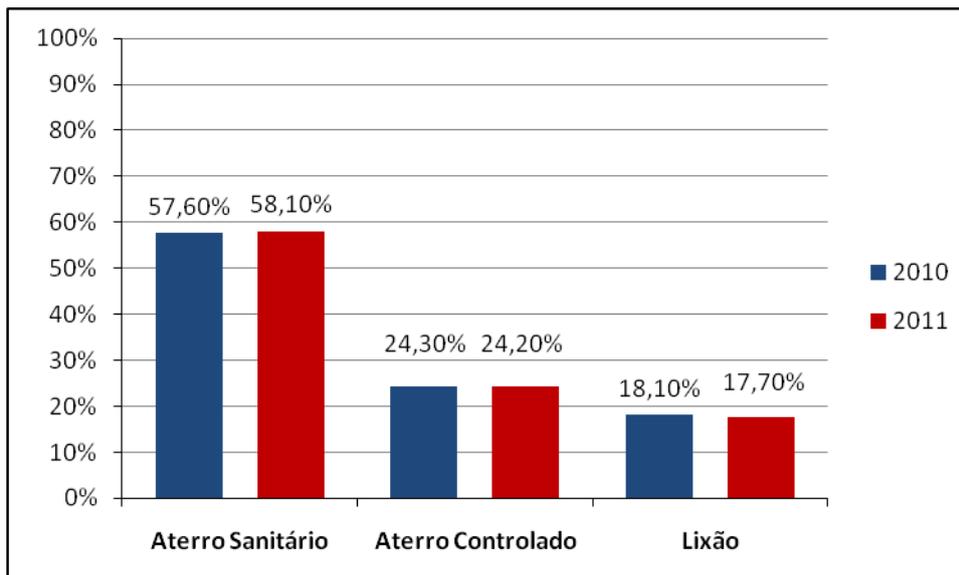


Figura 4 - Destinação final de RSU no Brasil

Fonte: Pesquisa ABRELPE 2010 e 2011

2.3.2 Processos de degradação de resíduos sólidos em aterros sanitários

As condições de armazenagem, bem como as influências de agentes naturais (chuva e microrganismos) ativam processos físico, químico e biológicos de transformação. Os elementos naturais são dissolvidos, a água desprende finas partículas e o principal responsável pela degradação dos resíduos é a bioconversão da matéria orgânica em formas solúveis e gasosas. Com isto, temos a formação de biogás e os lixiviados (CASTILHOS JR et al., 2003).

As comunidades microbianas presentes nos aterros incluem bactérias hidrolíticas e fermentativas, acidogênicas, acetogênicas e archeas metanogênicas, além de bactérias redutoras de sulfato e protozoários (CASTILHOS JUNIOR et al., 2003).

A formação e a taxa de geração dos principais constituintes do gás de um aterro são variáveis ao longo do tempo, e segue fases distintas, como observado na Figura 5.

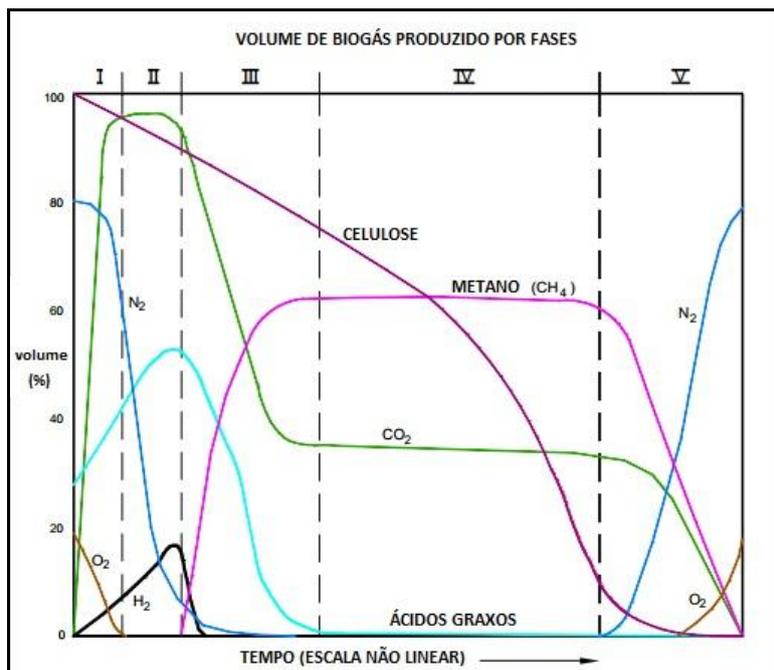


Figura 5 – Fases de um típico processo de degradação de RSU em aterros

Fonte: Adaptado de ESMAP (2004)

Para Tchobanoglous et al. (1993) e ESMAP (2004) o processo envolve as seguintes fases:

Fase I – Ajuste inicial: a decomposição biológica da matéria orgânica ocorre principalmente em condições aeróbias, devido a presença de certa quantidade de ar no interior do aterro. A principal fonte de microorganismos para a decomposição aeróbia e anaeróbia nessa fase é a terra que é usada como material de cobertura para divisão das células do aterro e como camada final.

Fase II – Anóxica: a quantidade de oxigênio decai e as reações anaeróbias se desenvolvem. Nitratos e sulfatos que podem servir como receptores de elétrons nas reações biológicas de conversão. Com a continuidade da queda do potencial de óxido-redução os microorganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em CH_4 e CO_2 iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários.

Fase III – Ácida: as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. Inicialmente ocorre a transformação enzimática (hidrólise) dos compostos de maior massa molecular (lipídeos, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos) em compostos apropriados para o uso como fonte de

energia pelos microrganismos. Em seguida, esses compostos são convertidos em compostos intermediários com massa molecular menor, como o ácido acético (CH_3COOH) e pequenas concentrações de outros ácidos mais complexos. O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante esta fase e os microrganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias estritas e facultativas.

Fase IV – Metanogênica: nesta etapa, predominam os microrganismos anaeróbios, denominados metanogênicos, que realizam o processo de conversão do ácido acético e gás hidrogênio (H_2) em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente.

Fase V – Maturação: Essa fase ocorre após grande quantidade de material orgânico ter sido biodegradado e convertido em CH_4 e CO_2 . Como a umidade continua a migrar pela massa de resíduos sólidos urbanos, porções de material biodegradável, ainda não convertidos, acabam reagindo. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Essa fase pode ter duração de 1 a 40 anos ou mais. Dependendo das medidas no fechamento do aterro, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas no biogás do aterro.

2.4 BIOGÁS

2.4.1 Caracterização

O Biogás é um gás inflamável produzido por microrganismos, quando matérias orgânicas são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez, em um ambiente impermeável ao ar (SALOMON; THIAGO FILHO, 2007).

A composição do biogás é dada por uma mistura de gases cujo tipo e percentagem variam de acordo com as características do tipo de biomassa degradada e as condições de funcionamento do processo de digestão (SOUZA; PEREIRA e PAVAN, 2004).

A produção de biogás é possível a partir de diversos resíduos orgânicos, como esterco de animais, lodo de esgoto, resíduos sólidos urbanos, resíduos agrícolas, efluentes industriais, plantas aquáticas, entre outros. Nesse caso, quando a digestão anaeróbia é realizada em biodigestores especialmente planejados, a mistura gasosa produzida pode ser usada como combustível, e seu efluente final, quando viável, utilizado como biofertilizante (PECORA, 2006).

Na Quadro 1 observa-se algumas diferenciações entre as características químicas do biogás produzido a partir de diferentes tipos de substratos.

Quadro 1 - Características do biogás gerado por diferentes substratos

COMPONENTE	Tchobanoglous et al. (1993) apud Van Elk (2007)	Persson et al. (2006)	Persson et al. (2006)	Castanón (2002)
	SUBSTRATO: resíduos sólidos urbanos (%)		SUBSTRATO: resíduos agropecuários (%)	
Metano (CH₄)	45 – 60	35 – 65	53 – 70	40 - 75
Dióxido de carbono (CO₂)	40 – 60	15 – 65	30 – 47	25 - 40
Nitrogênio (N)	2 – 5	5 – 40	-	0,5 – 2,5
Oxigênio (O₂)	0,1 – 1,0	-	-	0,1 – 1,0
Enxofre, mercaptanas	0 – 1,0	-	-	-
Gás sulfídrico (H₂S)	-	< 0,01	<0,1	0,1 – 0,5
Amônia (NH₄)	0,1 – 1,0	0,0005	<0,01	0,1 – 0,5
Hidrogênio (H)	0 – 0,2	-	-	1 - 3
Monóxido de carbono (CO)	0 – 0,2	-	-	0 – 0,1
Gases em menor concentração	0,01 – 0,6	-	-	-

Fonte: Tchobanoglous et al. (1993) apud Van Elk (2007); Castanón (2002); Persson et al. (2006)

2.4.2 Condições necessárias à produção de Biogás em aterros

Segundo Van Elk (2007); Christensen et al. (1992) e Brito Filho (2005), são vários os fatores que afetam a formação do metano: os relacionados com os ambientes externo e interno das células e os relacionados com a forma de construção e operação do aterro e as características iniciais dos resíduos. A seguir são apresentados os fatores mais relevantes, embora inúmeros tenham um papel importante no processo.

Umidade: a decomposição biológica da matéria orgânica é totalmente dependente da presença de umidade, necessária em uma determinada quantidade que permita uma atividade microbiana satisfatória.

Temperatura: a temperatura é altamente importante no processo de formação de metano. Quanto mais elevada, maior será a atividade bacteriana e, conseqüentemente, a produção de metano. Dois aspectos devem ser considerados com relação à temperatura: a temperatura desenvolvida dentro da massa de resíduos e a influência da temperatura externa sobre os processos que ocorrem internamente. A faixa ótima de temperatura para a geração de metano é de 30°C a 40°C, sendo que temperaturas abaixo dos 15°C propiciam severas limitações para a atividade metanogênica. Flutuações de temperatura são comuns na parte mais elevada do aterro, como resultado das mudanças na temperatura local.

pH: esse parâmetro influi na formação de metano, já que a atividade das bactérias metanogênicas é bastante sensível às suas variações. O pH ótimo para o desenvolvimento dessas bactérias está na faixa entre 6 e 8 (CHRISTENSEN et al., 1992).

Composição dos resíduos: a quantidade e o tipo de resíduos orgânicos são fatores que exercem importante influência na taxa de produção de gases: quanto maior a fração orgânica biodegradável, maior será o potencial de produção de gases.

Tamanho das partículas: há uma relação inversamente proporcional entre a superfície exposta dos resíduos e o tamanho dos mesmos, expressa pela superfície específica (área da superfície/volume). Sendo assim, observa-se um aumento da velocidade de degradação quando a massa é composta por resíduos menores, o que tem motivado o uso de trituradores, por exemplo, na compostagem

e nos processos mecânico-biológicos. Vale salientar que o tamanho das partículas tem influência na degradação dos resíduos tanto nos processos aeróbios quanto nos anaeróbios.

Idade do resíduo: a geração do biogás num aterro possui duas variáveis dependentes do tempo: tempo de atraso (período que vai da disposição do resíduo até o início da geração do metano) e tempo de conversão (período que vai da disposição do resíduo até o término da geração do metano) (BRITO FILHO, 2005).

Forma de construção e operação do aterro: o projeto específico do aterro e a forma de operação influenciam na produção de metano. Aterros com altura elevada e com um sistema eficiente de impermeabilização da camada de cobertura fomentarão o predomínio de atividade anaeróbia, que é a grande responsável pela formação do metano; da mesma forma, a compactação aumenta a densidade da massa de resíduos, o que propicia o encurtamento da fase aeróbia.

É importante ressaltar que o Brasil possui, na maior parte do seu território, condições favoráveis para a produção de biogás em aterros sanitários, pelas condições de umidade e temperatura e, principalmente, pela predominância de matéria orgânica na composição dos resíduos sólidos

2.5 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS

De acordo com Coelho et al. (2006) existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. A energia química contida nas moléculas do metano é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica.

O processo consiste em realizar a captação forçada do biogás gerado no interior dos aterros e, subseqüentemente, promover sua combustão, conforme demonstrado na reação abaixo:



Um sistema padrão de coleta do biogás de aterro possui três componentes centrais: poços de coleta e tubos condutores, compressor e sistema de purificação do biogás. O Sistema de coleta conta com tubos verticais perfurados ou canais e em alguns casos com membrana protetora. Além disto, a maioria dos aterros sanitários com sistema de recuperação energética possui "flare" para queima do excesso do biogás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos (MUYLAERT et al., 2000; WILLUMSEN, 2001).

Após captado, o biogás poderá ser utilizado para vários propósitos diferentes, a geração de energia elétrica, a geração de energia térmica, o uso em veículos, ou até para iluminação e utilização em fogões a gás (Figura 6). Qualquer que venha a ser o uso energético dado ao biogás, o mais importante para o sucesso de qualquer projeto de aproveitamento é um bom sistema de extração e de tratamento do biogás (SANTOS, 2011).

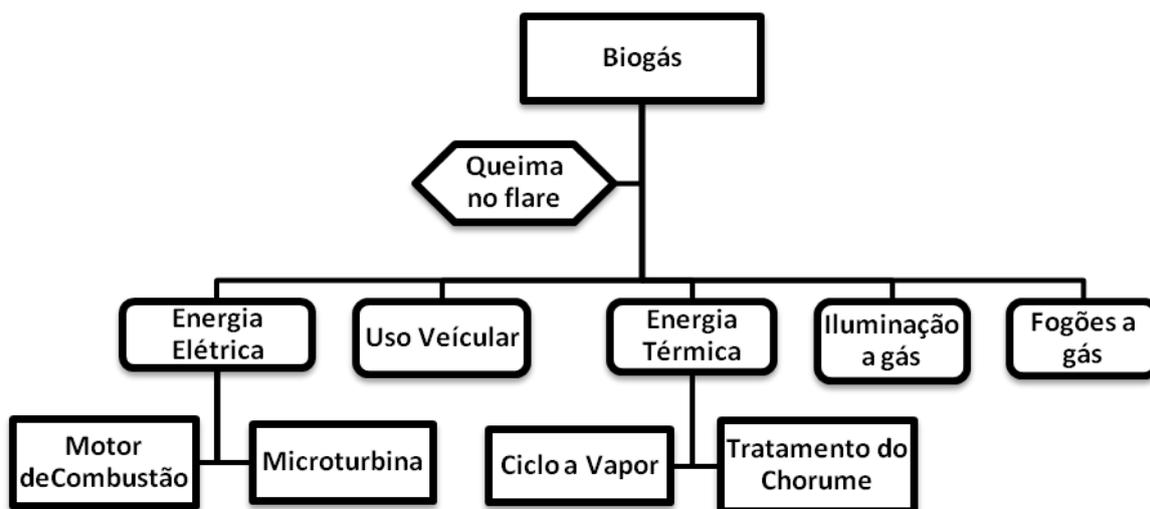


Figura 6 – Alternativas de Aproveitamento do biogás

Fonte: Adaptado de Instituto Agir Sustentável Apud ICLEI (2009).

2.5.1 Geração de energia elétrica com biogás

A energia elétrica gerada a partir do biogás pode ser consumida pelo próprio aterro ou, em caso de excedente de energia ela pode ser vendida para companhia de distribuição de energia elétrica. Além disso, há a possibilidade da comercialização dos créditos de carbono provenientes da transformação do metano

em dióxido de carbono durante a queima do biogás, tanto no *flare* quanto no sistema de conversão energética (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2010).

Segundo estudos de Junior et al. (2012) um projeto de usina geradora de energia elétrica a partir do biogás é técnica e economicamente viável, desde que sejam avaliadas várias condições do sistema, como: o volume e a vazão de gás do aterro, o tipo de tecnologia instalada para geração, os custos da planta de gás e de energia, e quando existir, as receitas da venda de energia e dos créditos de carbono.

Para a conversão energética do biogás, os motores de combustão interna possuem maior eficiência, além de serem mais baratos. Já as turbinas a gás possuem maior eficiência global de conversão, quando operadas em cogeração (calor e eletricidade), porém, por ser um equipamento importado, o seu valor e os custos de operação e manutenção são elevados. Além do custo do equipamento em si, a microturbina exige uma maior pureza do gás combustível do que os motores convencionais, isso é, é imprescindível a existência de um sistema eficiente de purificação do biogás, que garanta o bom funcionamento da microturbina (CENBIO, 2005).

Os motogeradores a gás possuem requisitos de qualidade do gás similares às caldeiras, com exceção de que a concentração de H_2S deve ser menor para garantir um tempo de operação razoável para o sistema. Motores Ciclo Otto projetados para funcionar com gasolina são bem mais suscetíveis a H_2S do que o sistema a diesel, mais robusto. Para aplicações em maior escala (>60 kW), portanto, predominam os sistemas a diesel (LANTZ, 2004 apud ZANETTE, 2009). Ocasionalmente, as siloxanas presentes no gás podem criar problemas abrasivos, devendo ser removidas caso estejam presentes.

Como observado na Tabela 2, as microturbinas possuem uma potência menor em relação as outras tecnologias, mas ao mesmo tempo, apresentam uma vantagem ambiental, emitindo uma quantidade muito menor de NO_x .

Tabela 2 – Comparação das emissões entre as tecnologias de conversão

TECNOLOGIA	EMISSÕES DE NO_x (ppm)
Motor de Combustão (Ciclo Otto)	250 - 3000
Turbina a gás (Médio Porte)	35 - 50
Microturbinas (Pequeno Porte)	< 9

Fonte: Adaptado de CENBIO (2005) Apud Figueiredo (2007).

De acordo com Bona e Ruppert Filho (2004), as baixas emissões atmosféricas da microturbina são devido à sua combustão contínua. O princípio de funcionamento da microturbina baseia-se no fato de que parte da energia gerada pela turbina é utilizada para mover o compressor, já que ambos estão conectados ao mesmo eixo girante. O compressor pressiona o ar para dentro da câmara de combustão na qual se forma uma mistura de ar comprimido e combustível que alimenta um processo de combustão contínua.

2.5.2 Geração de energia térmica com biogás

Na geração de energia térmica, qualquer que seja a tecnologia utilizada, a meta final é a produção de vapor d'água em altas temperaturas que poderá ser utilizado para diversas finalidades, tanto em processos industriais que demandem vapor, como para girar turbinas a vapor para a produção de energia elétrica. Considerando o caso dos aterros sanitários, podemos obter o vapor da queima do biogás através de basicamente 2 formas: através de uma caldeira, utilizando o ciclo a vapor Rankine, ou de um sistema de evaporação do chorume (SANTOS, 2011).

Pode-se citar como exemplo da utilização de energia térmica o aterro implementado na Alemanha, onde o calor produzido é transportado para a indústria de papel e celulose, localizada nas mediações do aterro (ICLEI, 2009).

Outro sistema passível de aproveitamento do biogás é o evaporador de chorume. Neste processo ocorre a redução de aproximadamente 70% do volume inicial do lixiviado tratado. O tratamento é realizado em um equipamento denominado evaporador. No evaporador, o processo de aquecimento é feito utilizando-se o biogás como combustível. Com o calor da queima do combustível a

fração líquida é evaporada, concentrando o teor de sólidos do chorume. O vapor então passa por sistemas de purificação para que possa ser lançado à atmosfera, ou então, é utilizado como fonte de energia térmica. O lodo mais denso, produto do processo de evaporação, retornará ao aterro para ser disposto normalmente como os outros resíduos. Essa tecnologia já é empregada nos Estados Unidos, Europa e Brasil, habilitando algumas dessas instalações para a obtenção de créditos de carbono. (BAHÉ et. al., 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este projeto foi realizado no Município de Toledo junto ao aterro sanitário municipal de resíduos sólidos. Foram executadas quatro etapas: 1 - Estudos descritivos de caracterização do sítio e dos resíduos sólidos urbanos gerados; 2 – Análise do biogás gerado pelo aterro em duas vias: biogás aproveitado; e biogás emitido pela superfície de cobertura do aterro. 3 – Avaliação da quantidade de produção de metano; 4 – Análise técnica dos sistemas de geração de energia implantados no aterro sanitário de Toledo-Pr.

3.1 ETAPA 1 – ESTUDOS DESCRITIVOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SÍTIO E DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS GERADOS

Nesta etapa, inicialmente, foi realizada uma abordagem resumida das características físicas e geográficas do município de Toledo e a caracterização do aterro sanitário em estudo. Seqüencialmente, foi descrito o resultado da caracterização e geração dos resíduos a partir de dados obtidos em estudos de censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

3.1.1 Município de Toledo-PR

O município de Toledo localiza-se na região Oeste do Estado do Paraná (Figura 6), nas coordenadas 24° 42' 49" S e 53° 44' 34" W, e está a uma distância de 536,60 Km da capital do Estado, seu território possui uma área total de 1.198,607 km², limitada por outros 10 municípios (IPARDES, 2012).



Figura 7 – Localização do Município de Toledo

Fonte: Abreu (2006)

De acordo com o censo demográfico de 2010, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, o Município de Toledo possui 119.313 habitantes, divididos em 108.259 na área urbana, e 11.054 habitantes na área rural, que é formada por 10 distritos.

Toledo possui sua economia baseada no agronegócio com a presença de grandes agroindústrias. Impulsionado pelo seu solo fértil e plano, está entre os maiores produtores de grãos do Estado, e é destaque na criação de suínos e aves do Paraná.

3.1.1.1 Hidrografia e relevo

O município de Toledo possui uma densa malha hidrográfica, composta por rios que correm no sentido leste-oeste, integrados a Bacia do Paraná III. Os principais rios do Município são: Rio São Francisco, e Arroio Marreco (ao centro); Rio Toledo (de leste a oeste); Arroio Guaçu, e Rio Dezoito de Abril (ao norte); e Rio Santa Quitéria (ao sul).

O rio Toledo é o mais importante e o principal manancial utilizado para o abastecimento de água potável do município. Sua microbacia hidrográfica abrange uma área de 97 km², inserida na sub-bacia do rio São Francisco, bacia do Paraná III. O curso do rio, distribuído em seus 26,5 Km, apresenta em seu

desenvolvimento, cotas máxima e mínima de 610 e 440 metros (SOUTO e RALISCH, 2007).

O município de Toledo apresenta um relevo levemente ondulado, com algumas poucas elevações mais pronunciadas (colinas de topos arredondados), vertentes curtas e declives que variam entre 8% e 15%. O solo da região é classificado como latossolo roxo distrófico (LRd6), apresentando solos profundos, com boa capacidade de retenção de água, aeração e permeabilidade. (FUNTEC, 1992).

3.1.1.2 *Clima*

Segundo a classificação de Köppen, o clima de Toledo é do tipo Cfa, definido como subtropical úmido mesotérmico, com verões quentes e geadas pouco frequentes, apresentando tendência de concentração de chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida. A temperatura média anual é de 21 à 22°C, com umidade relativa do ar variando entre 70 a 75%. Sua precipitação média anual está entre 1.600 à 1.800 mm, com evapotranspiração potencial anual de 1000 à 1100 mm (CAVIGLIONE et al., 2000).

3.1.2 *Descrição do Aterro Sanitário*

O Aterro Sanitário municipal de Toledo está localizado às margens da Rodovia PR-317, Km 10, estrada sentido ao município Ouro Verde do Oeste, nas coordenadas 24°44'52" Latitude Sul e 53°48'20" Longitude Oeste (Figura 8).

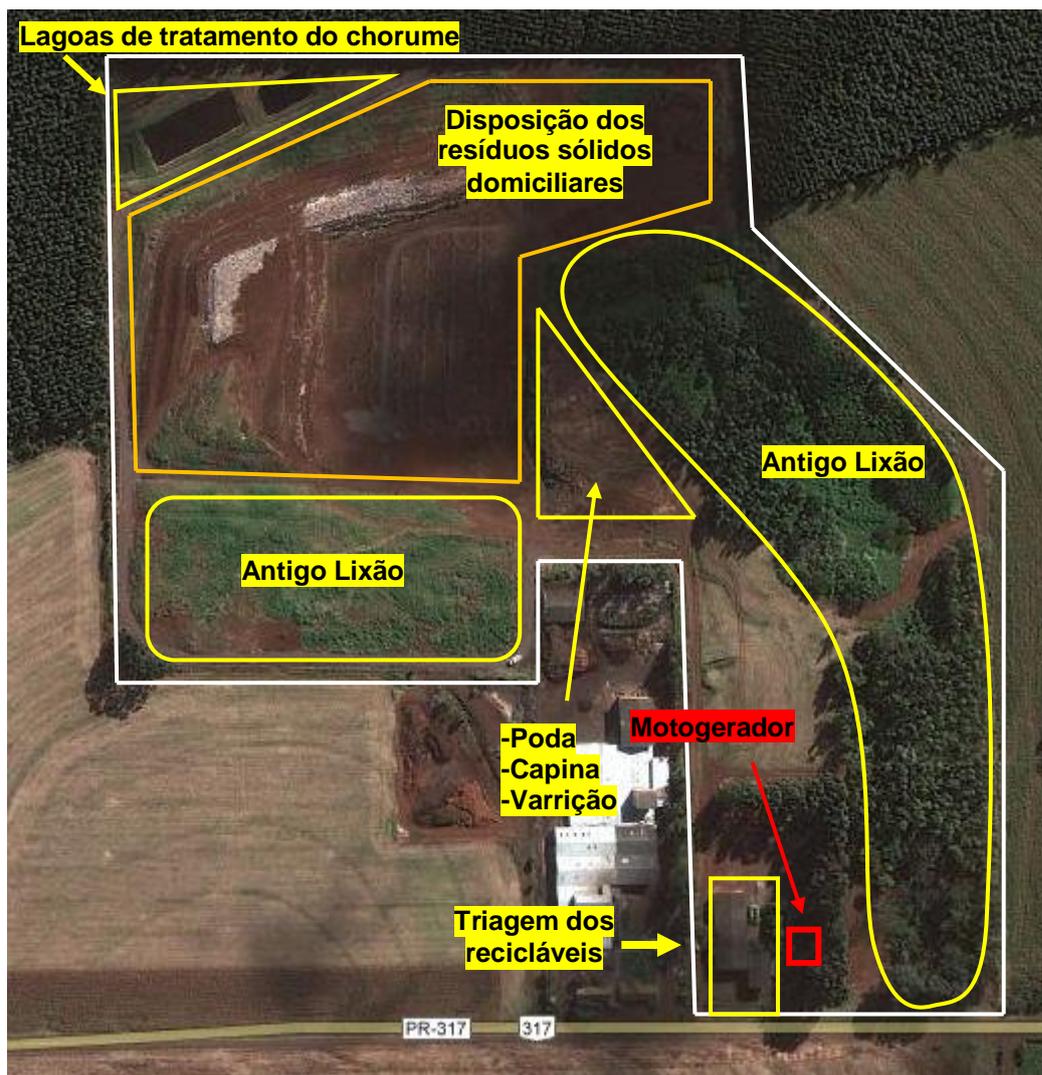


Figura 8 – Área do aterro sanitário de Toledo – PR

Fonte: Disponível no *Google Maps*, acesso em maio de 2012

O aterro possui uma área total de 159.961,40 metros quadrados e vida útil prevista de 16 anos e 1 mês. O início do seu funcionamento ocorreu em dezembro de 2002 e seu término foi previsto, segundo estudos de Ambiente (2001), para o ano de 2018. No entanto, existem grandes possibilidades de esgotamento da área antes do estimado.

As atividades do aterro iniciaram-se no terreno onde havia o antigo lixão municipal. Cabe a Secretaria Municipal do Meio Ambiente controlar as atividades de operação e realizar os investimentos necessários. Para controlar a quantidade de resíduos a serem dispostos no aterro sanitário, há uma balança rodoviária, com capacidade de 30 (trinta) toneladas. A quantidade diária de resíduos sólidos que

são dispostos atualmente no aterro sanitário é de 80 à 100 toneladas/dia. (TOLEDO, 2012).

O aterro está licenciado para receber exclusivamente os resíduos domiciliares, além dos resíduos de varrição urbana e de poda e capina. Os resíduos sólidos domiciliares e os de varrição urbana são transportados individualmente em caminhões coletores compactadores, realizados por uma empresa terceirizada. Já os resíduos de poda e capina são transportados em carrocerias de caminhões e caminhonetas de empresas terceirizadas, órgãos públicos, ou ainda por particulares (TOLEDO, 2012).

Resíduos de outras categorias como, de construção civil, resíduo industrial, resíduo perigoso, ou de serviços de saúde não são destinados ao aterro sanitário em estudo.

3.1.3 Análise quantitativa dos RSU

Para determinação da quantidade de resíduos gerados pela população destinados ao aterro sanitário de Toledo foram utilizados dados de:

- Número de habitantes em pesquisas do IBGE;
- Geração de resíduos sólidos em massa (ton) por ano de TOLEDO (2011).

A partir destes dados históricos foi realizada a estimativa populacional de resíduos sólidos gerados por habitante por dia ($\text{KgRS.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$) até o ano de 2020. Foram utilizadas análises estatísticas para gerar equações matemáticas de predição da geração de resíduos sólidos, além de análises de correlação, sendo utilizadas as equações nas quais a correlação fosse maior que 0,90 e próximas de 1,00.

3.1.4 Caracterização dos RSU

Para determinação da composição da biomassa (Resíduos Sólidos Urbanos Orgânicos) inserida no aterro sanitário foram utilizados dados de estudos realizados pela Prefeitura Municipal de Toledo. Estes dados estão presentes no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Toledo-PR (TOLEDO, 2011).

A caracterização dos resíduos foi determinada por Ensaio de Composição Gravimétrica e Determinação do Peso Específico dos resíduos domiciliares, regulamentados pela NBR 10.007/2004 – Amostragem de Resíduos Sólidos (ABNT, 2004b).

Para análise da amostra a ser utilizada na caracterização dos resíduos sólidos foi utilizada a metodologia do quarteamento (Figura 9) conforme descrito em IBAM (2001) e, complementada pela ABNT (2004b).

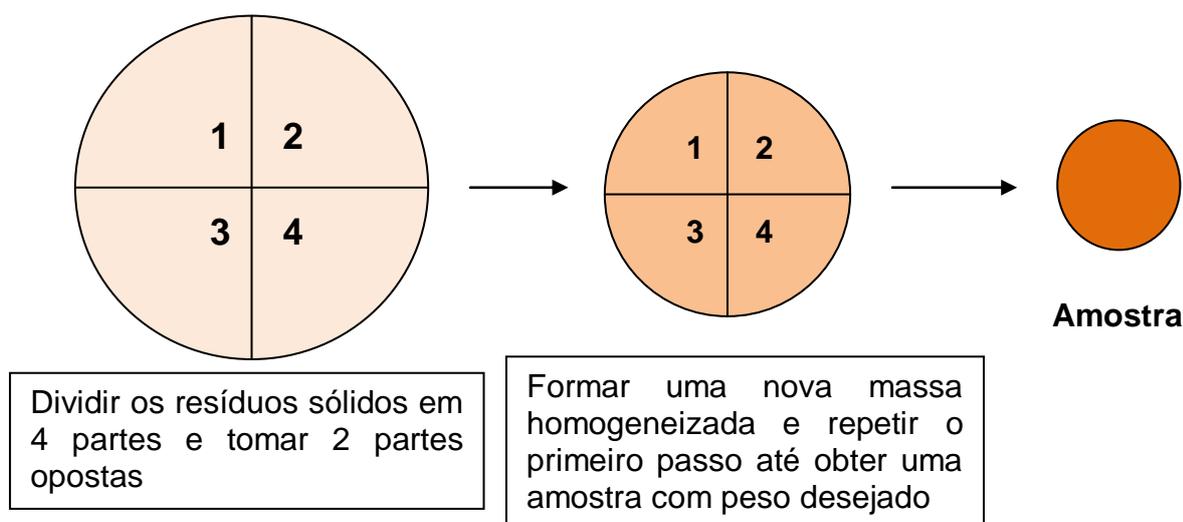


Figura 9 – Ensaio de Composição Gravimétrica

Fonte: Toledo (2011)

Para a obtenção do peso específico dos resíduos sólidos domiciliares foram utilizados cinco tambores, enumerados, pesados e preenchidos aleatoriamente com a amostra de resíduos obtida da última seleção de quadrantes. O total volumétrico obtido foi de aproximadamente 1,0 (um) metro cúbico com o preenchimento dos tambores. Neste procedimento, o peso dos resíduos domiciliares foi determinado por método gravimétrico, descontando-se o peso dos respectivos tambores vazios.

Os procedimentos para determinação da composição gravimétrica foram:

1. Despejar o conteúdo dos tambores sobre uma área revestida com geomembrana;
2. Realizar a triagem (separação por tipo de resíduo) dos resíduos de cada amostra separadamente.

3. Determinar a composição gravimétrica dos resíduos sólidos de cada setor em termos percentuais.

Desta forma, foi determinado o peso específico (kg.m^3) pela relação do peso da amostra analisada e volume do recipiente utilizado.

A composição dos resíduos foi classificada em:

- plásticos;
- papel e papelão;
- vidro;
- materiais orgânicos;
- metais;
- outros (resíduos especiais sem destinação ou sem classificação).

Para este estudo foram avaliados os resíduos que são depositados no aterro sanitário, principalmente, os de origem e/ou composição orgânica (biomassa), passíveis ao processo de decomposição biológica.

3.2 ETAPA 2 - ANÁLISE DO BIOGÁS GERADO PELO ATERRO EM DUAS VIAS: BIOGÁS APROVEITADO; E BIOGÁS EMITIDO PELA SUPERFÍCIE DE COBERTURA.

3.2.1 Amostragem do biogás captado pelo aterro

Para determinação da composição do biogás gerado no aterro, foram realizadas medições *in loco* do biogás, visando determinar a concentração de metano produzido no aterro sanitário de Toledo-PR, para determinação do potencial de geração do metano, posteriormente calculado na ETAPA 3.

Além da quantificação da fração de metano, determinaram-se as concentrações de dióxido de carbono (CO_2), gás sulfídrico (H_2S), e amônia (NH_4).

Foram utilizados 3 pontos de amostragem:

- 1 – Saída do queimador (figura 10);



Figura 10 – Ponto 1 de coleta de biogás – Saída do queimador (célula 1)

2 – Ponto localizado antes do filtro de limalha de ferro, instalado junto ao gerador (figura 11);



Figura 11 – Ponto 2 de coleta de biogás – Antes do Filtro de limalha de ferro

3 - Após o filtro, na entrada do gerador (figura 12).



Figura 12 – Ponto 3 de coleta de biogás – Entrada do Gerador

O procedimento para a coleta no Ponto 1 de amostragem, foi realizado pela captura do gás com o uso de seringas descartáveis com agulha com volume total de 1 mL.

O procedimento para coleta nos Pontos 2 e 3, foi realizado pela inserção do biogás em um sistema tipo bóia acoplada a uma bomba movida à bateria.

Iniciou-se o procedimento com o enchimento e esvaziamento da bóia por 3 vezes com o biogás de amostra. Após este processo, foi coletada a amostra definitiva para análise; por fim, vedou-se a entrada evitando riscos de contaminação.

Os procedimentos de análise laboratorial dos gases coletados nos 3 pontos de amostragem são descritos nos itens 4.2.3.1 e 4.2.3.2.

3.2.2 Avaliação da emissão de metano pela superfície de cobertura do aterro sanitário

Para determinação da emissão/vazamento de biogás pela camada de cobertura do aterro, realizaram-se ensaios com uma placa de fluxo do tipo estática (que permanece fechada), com dimensões de 60 cm x 60 cm x 12 cm, unida a uma

estrutura com dimensões de 80 cm x 80 cm x 10 cm, totalizando um volume interno de 107,2 Litros.

A placa constitui-se de aço galvanizado com um painel superficial de acrílico, com 2 conectores de saída do tipo encaixe rápido, para a amostragem do biogás armazenado e medição de temperatura interna.

O esquema de funcionamento da placa de fluxo utilizada pode ser observado na figura 13.

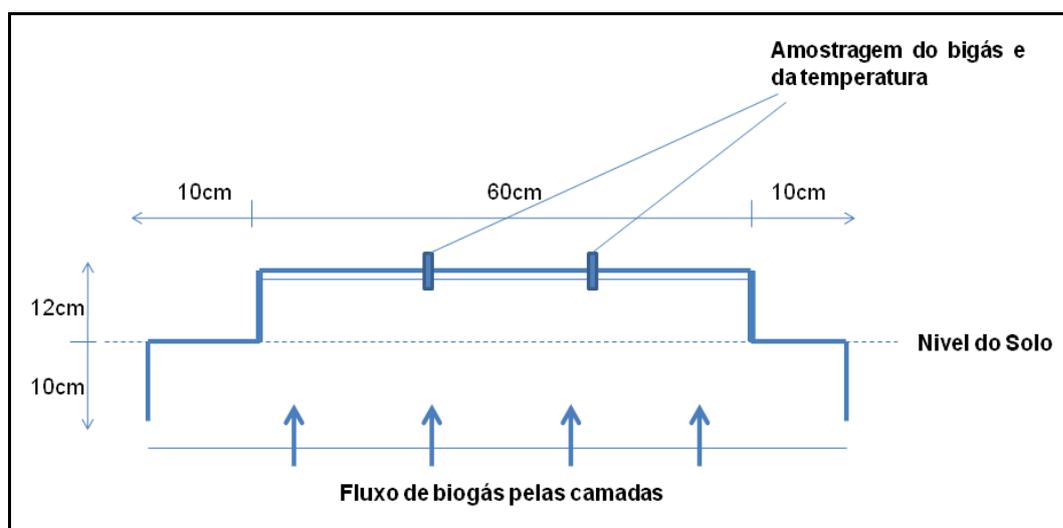


Figura 13 – Funcionamento da placa de fluxo

Fonte: Autora (2012)

Para a identificação da quantidade de metano difundida pela superfície, cravou-se a placa no solo em 10 pontos diferentes da célula nº 1 do aterro, que no momento encontra-se concluída desde 2011, e possui um total de 10 poços de captação do biogás produzido.

A imagem de satélite da célula de estudo, com o seu mapeamento e os pontos de ensaio realizados, podem ser observadas na figura 14.

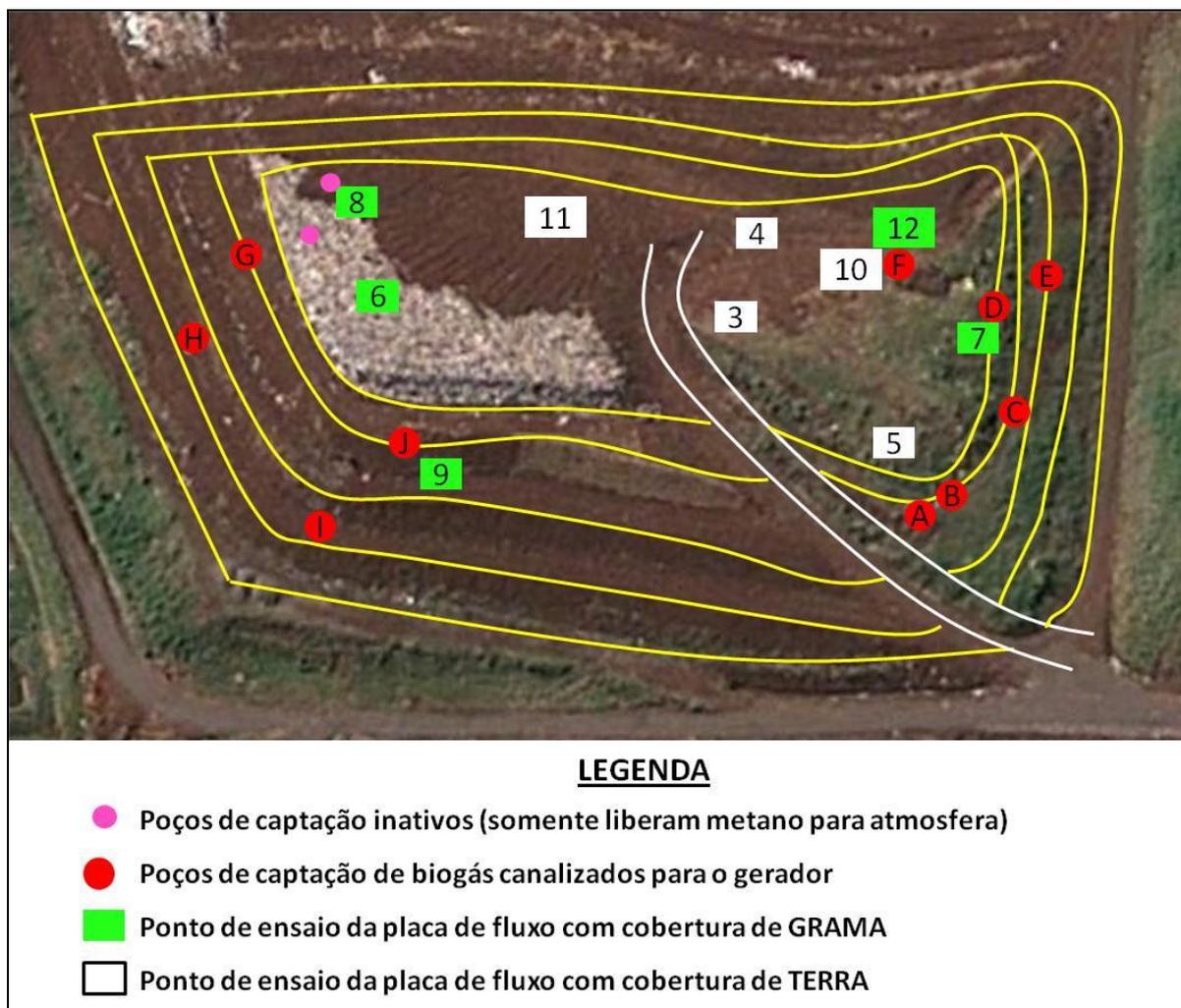


Figura 14 – Vista aérea da célula de estudo

Fonte: Disponível em *Google Maps*, acesso em janeiro de 2013

Foram escolhidos 5 pontos com cobertura de grama sobre a camada superficial, e 5 pontos sem cobertura de grama (terra nua), alguns dos pontos eram próximos aos dutos de saída do biogás, e outros mais distantes. Assim, pode-se analisar as possíveis diferenças de emissão pelo tipo de cobertura e posicionamento na célula.

As linhas na cor branca delimitam a estrada de acesso até a parte superior da célula, as amarelas delimitam aproximadamente a área das camadas de cobertura formadas acima do nível do solo, sendo que a área da 6ª e última camada superficial possui aproximadamente 3.500 m². Abaixo delas ainda existe outra camada disposta inicialmente sobre a geomembrana protetora, formando um total de 6 camadas, cada uma delas possui 285 cm de resíduos sólidos, cobertos

separadamente por 15 cm de solo argiloso, totalizando uma altura aproximada da célula concluída de 18 metros.

O processo de cravamento da placa de fluxo é demonstrado na figura 15.



Figura 15 – Processo de cravamento da placa de fluxo nos pontos de amostragem

Fonte: Autora (2012)

A metodologia de cravamento da placa nos pontos de amostragem foi baseada por estudos de Maciel (2003).

Para a colocação da placa, após a escolha do ponto de ensaio, cujo mesmo deveria obter o maior nivelamento possível, uma vala era feita no mesmo perímetro de largura da placa, para facilitar o cravamento da mesma. Para o processo de colocação, os 4 vértices da placa eram martelados até que ela permanecesse nivelada ao solo, após, enterrava-se toda lateral externa para evitar ao máximo a entrada e saída de gases.

Logo após o cravamento da placa no ponto de amostragem desejado, ligava-se a uma das saídas uma bomba de 12 volts, durante 10 minutos, com o intuito de retirar o ar existente no interior da placa durante o processo de cravamento, de forma a evitar a contaminação da amostra a ser coletada após o ensaio.

Em cada ensaio, a placa permaneceu cravada e fechada, durante aproximadamente 6 horas, com o objetivo de que o biogás emitido no ponto de amostragem permanecesse no interior da placa de fluxo.

Para a amostragem, abria-se uma das saídas, e com ajuda da bomba, enchia-se 1 bóia com o biogás ali armazenado. Após, coletava-se a temperatura do interior da placa de fluxo e a temperatura ambiente, ambas no momento da coleta.

O gás coletado nos ensaios foi analisado por cromatografia gasosa, para determinação das concentrações de CH_4 e CO_2 , descritos no item 4.2.3.1. Para determinação da quantidade de H_2S e NH_3 , utilizou-se o Método do Alfakit e posteriormente análise por espectrofotometria UV-Vis, descrita nos itens 3.2.3.2 e 3.2.3.3.

3.2.3 Análises das amostras coletadas no sistema gerador e na placa de fluxo

3.2.3.1 Análise no Cromatógrafo à gás

As amostras coletadas no ponto 1 (saída do queimador), e as 10 amostras coletadas nos ensaios da placa de fluxo, foram encaminhadas ao Laboratório de Química Instrumental da Unioeste, *campus* Toledo, para análise da fração de gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), realizado por Cromatógrafo à gás Construmaq modelo U-13.

A temperatura da coluna foi de 30°C , do injetor 50°C e do detector foi de 65°C . A coluna utilizada foi uma empacotada com recheio de HayeSep-D, com capacidade de separação de ar, metano, e dióxido de carbono.

Para a calibração do equipamento, foi feita a injeção dos padrões CO_2 e CH_4 , com pureza de 99,995%. O Cromatograma dos padrões pode ser observado no Gráfico 1.

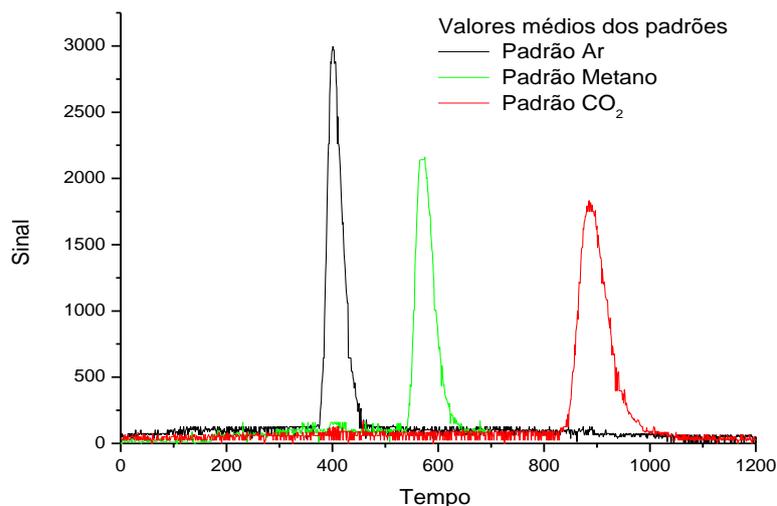


Gráfico 1 – Cromatograma injetando 0,3 mL dos padrões de ar, CH₄ e CO₂

Após a injeção dos padrões, tem-se o tempo emitido em cada sinal, para cada composto específico, sendo assim, é possível identificar o sinal referente a cada composto na amostra, pois é emitido no mesmo tempo do padrão.

3.2.3.2 Análises com Alfakit

O biogás coletado nos Pontos de amostragem 2 (antes do filtro de limalha de ferro, instalado junto ao gerador) e 3 (após o filtro, na entrada do gerador), e as 10 amostras coletadas nos ensaios da placa de fluxo foram armazenados em bóias, e em seguida analisados utilizando-se o Kit Biogás com Biofoto Microprocessado (Figura 16).



Figura 16 – Kit Biogás com Biofoto Microprocessado

Fonte: Alfakit. Disponível em: < <http://www.alfakit.com.br/>>

Para a análise das amostras dos pontos 2 e 3, foram avaliadas as concentrações de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), ambos em percentagem; e gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_4), ambos em ppm.

Para a análise dos ensaios da placa de fluxo, foram avaliadas as concentrações de gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_4). Neste caso, as amostras reagidas em meio líquido, foram armazenadas para posterior análise em Espectrofotômetro UV-Vis.

A metodologia utilizada para as análises do Alfakit foi a disponível no Manual de Equipamentos do Alfakit.

3.2.3.3 Análises por Espectrofotometria UV-Vis

Para a avaliação da concentração de amônia e gás sulfídrico presente nas amostras da placa de fluxo, reagidas pela análise do Alfakit, foram realizadas análises utilizando Espectrofotômetro UV-Visível SHIMADZU, modelo 1601 PC, com cubeta de Poliestireno de 10mm de caminho óptico, e espectro de varredura delimitado de 400 à 800 nm.

3.2.3.4 Análise instantânea por medidor portátil

Por vias de comparação de resultados, realizou-se uma análise do biogás com utilização de um medidor de gás instantâneo, nos Pontos 1, e 3 de coleta no sistema, além de um 4º ponto, na saída do gerador, após a combustão do biogás.

Para a análise instantânea do gás, utilizou-se o Analisador de gases de combustão Madur, modelo GA-21 plus, com potência de 50W (figura 17).



Figura 17 – Analisador instantâneo de gases de combustão Madur

Fonte: Disponível em: <http://www.madurusa.com/Sites/products/ec_analyzers/ga21p/ga21p.html>

O equipamento fornece informações de temperatura do gás e temperatura ambiente; além das concentrações de CO, CO₂, O₂ e CH₄.

3.3 ETAPA 3 - AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE DE PRODUÇÃO DE METANO

3.3.1 Quantificação dos resíduos sólidos degradáveis

Para determinação da quantidade de produção de metano durante a vida útil do aterro foi utilizada a metodologia do IPCC (2006). Foram utilizados: Capítulo 2: “Dados de Geração, Composição e Gestão de Resíduos Sólidos” e o Capítulo 3: “Disposição de Resíduos Sólidos”; ambos retirados do Volume 5: “Resíduos”. Esta metodologia é baseada na reação do decaimento de primeira ordem da matéria orgânica em processos anaeróbios com produção de metano e gás carbônico.

O metano pode ser estimado com base na quantidade de resíduos sólidos dispostos no aterro sanitário e nas condições de degradação. A capacidade média de decomposição do carbono orgânico degradável pode ser calculada pela equação 01.

$$DDOC_m = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF \quad (01)$$

No qual:

$DDOC_m$ = massa de carbono orgânico degradável de DOC depositado (Gg)*

W = massa de resíduos sólidos depositados (Gg)*

DOC = fração de carbono orgânico degradável contida nos resíduos (Gg)*

DOC_f = fração de DOC que pode ser decomposto de forma anaeróbia (fração)

MCF = fator de correção de CH₄ - fração do resíduo que se decompõe em condições aeróbias (fração)

*Gg (gigagrama) = 1000 ton

Fonte: IPCC (2006)

A massa de resíduos depositada no aterro foi estimada ao longo do tempo (vide item 3.1.4). O carbono orgânico degradável (DOC) que pode sofrer decomposição bioquímica depende da composição dos materiais que são dispostos no aterro sanitário (vide item 4.1.4 e Anexo B).

A forma de disposição dos resíduos sólidos no solo pode modificar a cinética de degradação e formação de metano. Em locais/sistemas de disposição de resíduos sem o correto manejo, pode ocorrer a existência de zonas aeróbias na superfície do aterro. Isto pode diminuir a degradação anaeróbia e a geração de metano. Assim, para esse fator de manejo, chamado de MCF (fator de correção de metano) utiliza-se uma tabela de cálculo (vide ANEXO C) de acordo com a classificação do sistema de disposição de resíduos sólidos.

3.3.2 Estimativa da produção de metano pelo método FOD

Vários modelos podem ser utilizados para determinar a geração de metano em sistema de disposição de resíduos sólidos (IPCC, 2006). Neste trabalho foi utilizado modelo de decaimento de primeira ordem (método FOD, do inglês *First Order Decay*) no qual o fluxo de entrada de resíduos no aterro é considerado ao longo do tempo, bem como o início da degradação do carbono contido nestes resíduos.

Desta forma, neste modelo utilizado existe um tempo inicial estipulado para o início da degradação e formação de gás metano. A equação 02 descreve o modelo explicitado.

$$CH_4 \text{ gen } (i) = q \cdot [a' \cdot DDOCma(i) - b' \cdot DDOCmd(i - 1) + c' \cdot DDOCmd(i)] \quad (02)$$

No qual:

$$CH_4 \text{ gen } (i) = \text{CH}_4 \text{ gerado durante o ano } i \text{ (Gg de C)*}$$

$$DDOCma(i) = \text{existencia de DDOCm no início do ano } i \text{ (Gg C)*}$$

$$DDOCmd(i) = \text{DDOCm disposto do aterro durante o ano } i \text{ (Gg C)*}$$

$$q = MCF \cdot F \cdot 16/12$$

$$a' = 1 - e^{-k} = 1 - a \text{ (constante)}$$

$$b' = 1/k \cdot (e^{-k(1-\Delta)} - e^{-k}) - \Delta \cdot e^{-k} = b \text{ (constante)}$$

$$c' = 1 - \Delta - 1/k \cdot (1 - e^{-k(1-\Delta)}) = 1 - c \text{ (constante)}$$

*Gg de C (gigagrama de carbono) = 1000 ton de carbono

Fonte: IPCC (2006)

3.4 ETAPA 4 - ANÁLISE TÉCNICA DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA IMPLANTADOS NO ATERRO SANITARIO DE TOLEDO-PR

3.4.1 Análise e descrição dos sistemas de aproveitamento energético

Este projeto utilizará como estudo de caso a instalação e funcionamento de sistemas de aproveitamento de biogás instalados no aterro sanitário de Toledo-PR.

Nesta etapa descreveu-se a estrutura, funcionamento e operacionalização dos dois sistemas que realizam o aproveitamento energético do biogás no aterro sanitário para suas atividades internas, 1 – Sistema de Motor de combustão para geração de energia elétrica; 2 – Moto bomba para recirculação do chorume.

Para uma avaliação do funcionamento do sistema 1, realizou-se uma medição de vazão do biogás que entra no sistema do motogerador de energia elétrica. A mesma foi realizada com o uso do medidor Endress+Hauser modelo IP66/NEMA 4x, conectado ao Painel de monitoramento de dados HI Tecnologia modelo ZAP900, movido a eletricidade, com capacidade máxima de $41,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

A vazão foi medida durante 1(uma) hora e posteriormente foi medida durante 1 (um) dia de funcionamento do conjunto motogerador, a fim de se avaliar a quantidade de biogás utilizada pelo sistema, e o comportamento do mesmo.

A metodologia utilizada na medição foi seguida segundo o manual de instruções do equipamento utilizado.

A instalação dos equipamentos e sistemas descreveu-se neste trabalho com os conceitos e princípios, segundo princípios de engenharia, e coleta de informações *in loco*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ETAPA 1 – GERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS GERADOS

4.1.1 Crescimento populacional do município de Toledo

Segundo o IBGE (2010a), o primeiro registro populacional de Toledo ocorreu no ano de 1956 e o último no ano de 2010. Os dados referentes aos anos de 1956, 1960, 1970, 1980, 1991, 1996, 2000, 2007 e 2010 foram oficialmente medidos pelo censo, os demais dados utilizados foram estimados pelo próprio IBGE e por métodos estatísticos de correlação utilizados no presente trabalho.

Os dados populacionais registrados encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados populacionais registrados pelo IBGE no município de Toledo

Ano	População
1956	9.945
1960	24959
1970	68.885
1980	81.282
1991	94.879
1996	90.417
2000	98.200
2007	109857
2010	119.313

Fonte: IBGE (2010).

Uma análise simplificada de demografia associada à projeção do crescimento populacional pode ser realizada pela taxa de crescimento entre os dados observados. A Tabela 4 apresenta as taxas médias de crescimento populacional durante o período analisado.

Tabela 4 – Variação da taxa de crescimento média anual de dados observados.

Ano	Taxa de Crescimento por ano (%)
1956	--
1960	37,74
1970	17,60
1980	1,80
1991	1,52
1996	-0,94
2000	2,15
2007	1,70
2010	2,87

Pode-se observar que entre o ano de 1991 e 1996 a taxa de crescimento populacional do município de Toledo-Pr foi negativa. Este dado é atípico e pode representar algum fato específico ocorrido nesta época que acarretou em um êxodo nesta região. Este fato, aparentemente não foi resultado de erro de medição, pois se estendermos a análise de crescimento para o período de 1991 a 2000, suprimindo o dado observado do ano de 1996, ainda assim, o crescimento populacional é atípico e próximo de 0,39% ao ano.

O gráfico 2 apresenta diferentes linhas de tendência para a escolha do método de estimativa dos valores populacionais futuros do município, após o ano de 2010, e de valores passados, anos nos quais o censo não foi realizado. Este gráfico foi obtido a partir dos dados reais da Tabela 3. Os anos apresentados no gráfico 2 foram subtraídos do ano inicial de observação (1956).

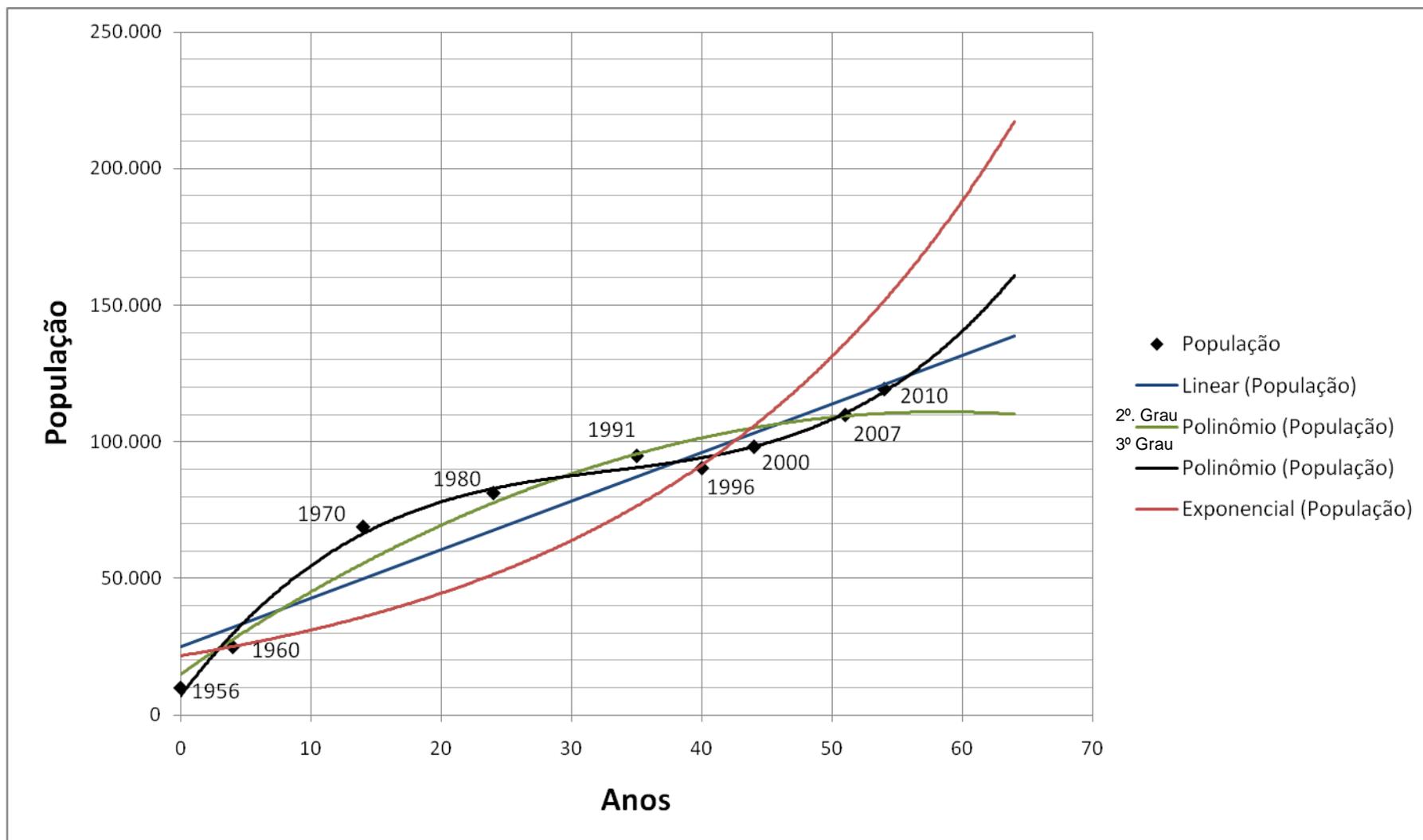


Gráfico 2 – Inserção das linhas de tendência a partir dos dados populacionais

Cada linha gerada pelos pontos apresenta um modelo matemático e um fator de correlação (r^2). Isto possibilita representar a característica de cada estimativa e suas proximidades com os dados de crescimento real da população do município observados em aproximadamente 55 anos.

As equações geradas em cada linha de tendência são descritas posteriormente. A equação 3 representa a linha de tendência linear; a equação 4 a linha de tendência exponencial; a equação 5 a linha de tendência polinomial quadrática; e a equação 6 a linha de tendência polinomial cúbica.

$$y = 1777,9x + 24979 \quad (3)$$

$$R^2 = 0,912$$

$$y = 21692e^{0,036x} \quad (4)$$

$$R^2 = 0,7484$$

$$y = -28,107x^2 + 3284,5x + 15012 \quad (5)$$

$$R^2 = 0,9573$$

$$y = 1,7714x^3 - 174,7718x^2 + 6333,2702x + 7060,0820 \quad (6)$$

$$R^2 = 0,9934$$

A análise exponencial apresentou fator de correlação r^2 menor que 0,9, portanto não foi utilizada. Também foi verificada curva do tipo potencial que apresentou fator de correlação r^2 menor que 0,9.

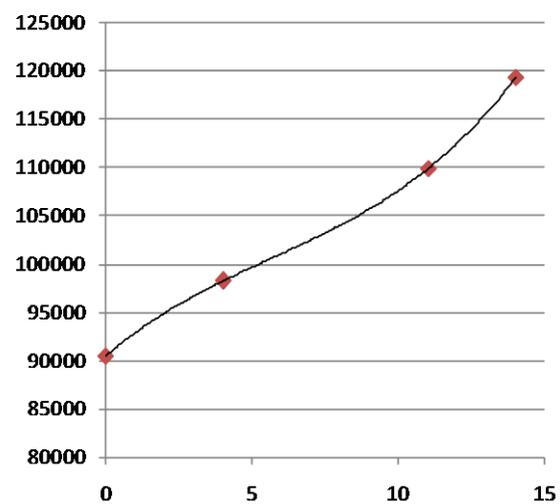
Outros métodos de projeção que podem ser utilizados para o crescimento populacional são a função hiperbólica, exponencial assintótica e logística. Porém, estas curvas devem ser utilizadas para projeções futuras com intervalo de tempo relativamente grande. Neste trabalho foi realizada estimativa até o ano de 2020, que pode ser considerada pequena, portanto, foi descartada a utilização destes métodos.

Desta forma, as curvas geradas por modelos matemáticos das equações (3), (5) e (6) poderão ser utilizadas.

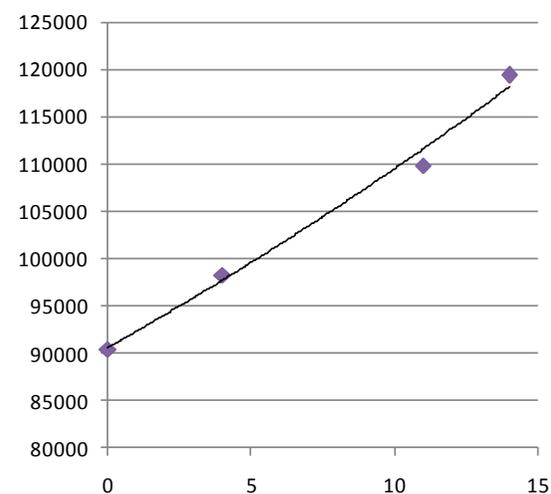
Outro aspecto importante é a necessidade de utilização de dados recentes a partir da abertura do aterro sanitário, que ocorreu no ano de 2002, com previsão para fechamento em 2015. Isto remete a análise da Tabela 4 de crescimento populacional anual, ao intervalo no qual o crescimento é negativo.

Até o ano de 1996 a taxa de crescimento é decrescente, ou seja, ela diminui ao longo do tempo em termos de valores. Porém, a partir deste ano, aparentemente ocorre um aumento seguido de uma variação em torno da média de crescimento populacional de 2,24%. Ou seja, próximo do crescimento que ocorreu de 1970 a 1991.

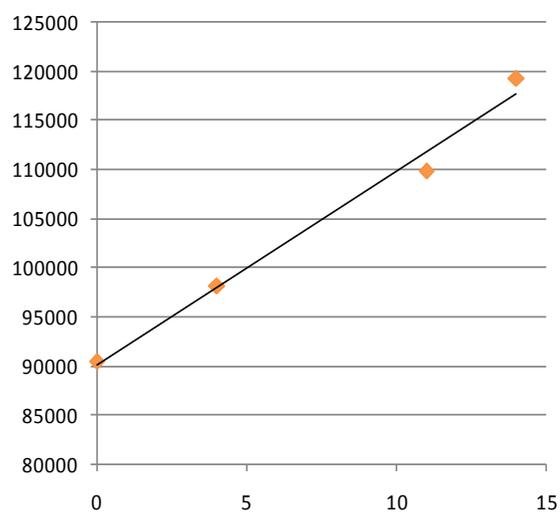
Essa inflexão na curva populacional divide o gráfico 2 em duas partes distintas: 1ª fase) de 1956 a 1991 e 2ª fase) 1996 a 2010. Para efeito de análise, pode-se analisar os dados mais recentes da 2ª fase, apresentados no gráfico 3.



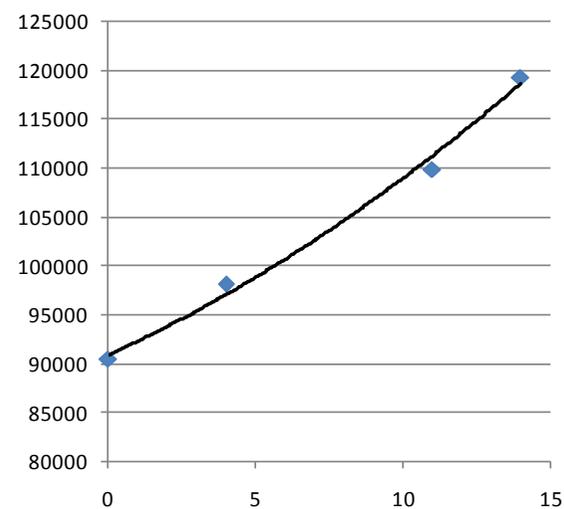
◆ População
— Polinômio (População)
(3º Grau)



◆ População
— Exponencial (População)



◆ População
— Linear (População)



◆ População
— Polinômio (População)
(2º Grau)

Gráfico 3 – Linhas de tendência para a 2ª fase de crescimento populacional de Toledo-Pr, dos anos de 1996, 2000, 2007 e 2010.

As equações que representam as curvas geradas são: equação (7) para modelo linear, equação (8) para modelo polinomial de 2º. Grau, equação (9) para modelo polinomial de 3º. Grau, e equação (10) para modelo exponencial.

$$y = 1976x + 90115 \quad (r^2 = 0,986) \quad (7)$$

$$y = 43,47x^2 + 1365,1x + 90924 \quad (r^2 = 0,992) \quad (8)$$

$$y = 12,441x^3 - 212,106x^2 + 2.595,123x + 90.417 \quad (r^2 = 1,00) \quad (9)$$

$$y = 90491e^{0,019x} \quad (r^2 = 0,991) \quad (10)$$

Todos os modelos gerados para a 2ª. Fase de crescimento populacional de Toledo-Pr apresentam valor de correlação (r^2) maiores que 0,9, sendo que para o modelo polinomial de 3º Grau a correlação é de valor igual a 1,00.

Através do Quadro 8 (vide Anexo D) verifica-se que a curva de 2º. Grau do modelo matemático da 1ª. Fase apresenta valores finais de projeção populacional muito pequenos com taxa média de crescimento anual de 0,217% para o período. A curva de 3º. Grau do modelo matemático da 2ª. Fase apresenta valores finais de projeção populacional muito grandes com taxa média de crescimento anual de 5,31% para o mesmo período. Portanto, estes dois modelos podem ser descartados como estimativas de projeção

Assim, o Gráfico 4, apresenta os valores gerados pelos modelos da 1ª e 2ª fase a serem pré-selecionados como escolha para a projeção dos dados.

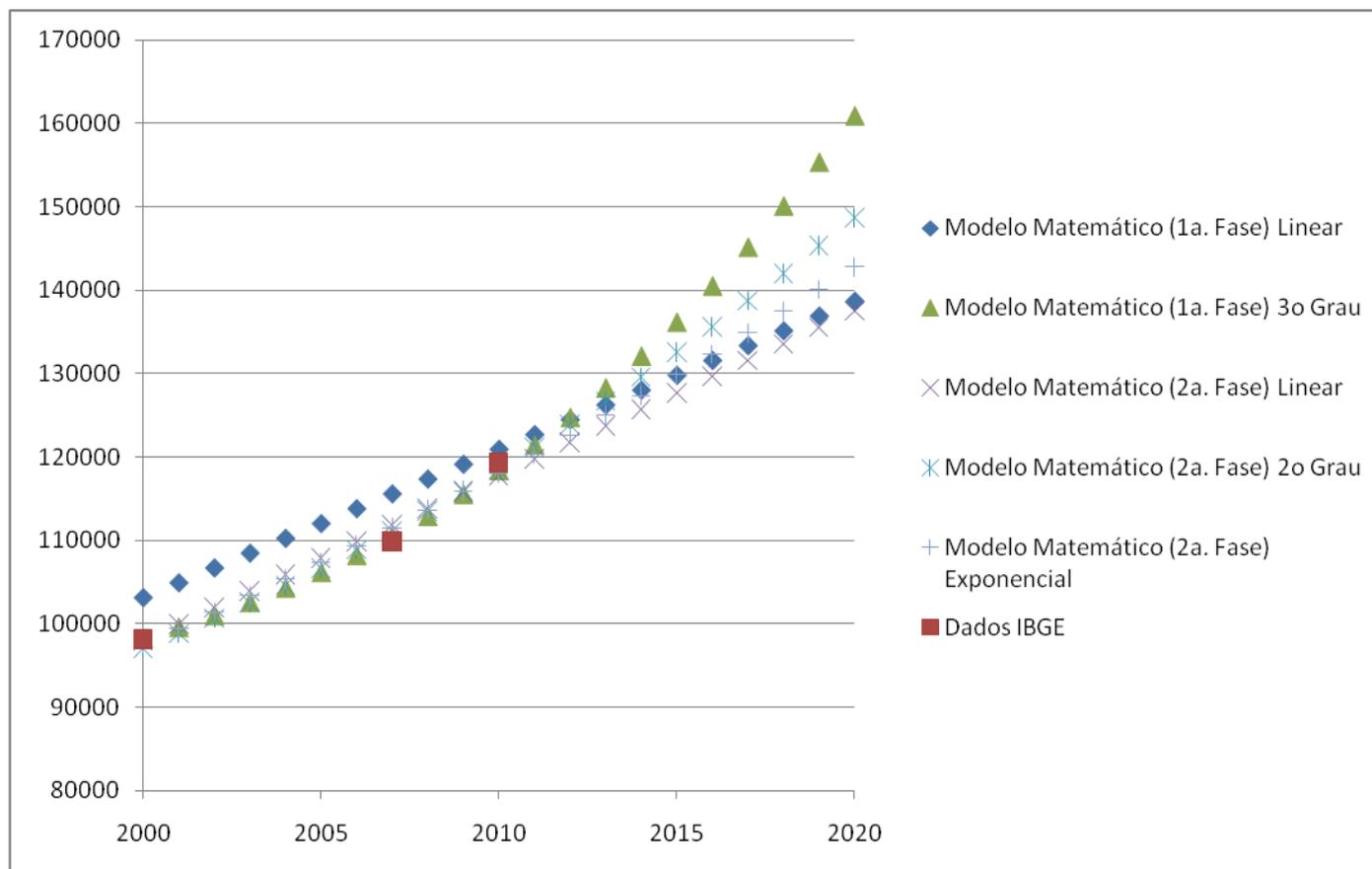


Gráfico 4 – Modelos matemáticos de projeção populacional

Aparentemente, pode ser adotado como critério para a melhor curva de projeção de crescimento populacional o fator de correlação (r^2). Neste caso, o modelo matemático de 3º. grau da 1ª. Fase apresentaria os melhores resultados. Porém, modelos de polinomiais de 2º e 3º graus podem representar muito bem valores entre dados observados, o que não ocorre para dados nas extremidades como os valores relativos a projeção demográfica. Desta forma, é importante verificar a taxa média aritmética de crescimento anual entre os intervalos conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Taxa de crescimento média anual calculada ano a ano para as projeções demográficas

Ano	Modelo Matemático (1a. Fase)		Modelo Matemático (2a. Fase)		
	Linear	3º Grau	Linear	2º Grau	Exponencial
2000	-	-	-	-	-
2001	1,72	1,33	2,02	1,81	1,92
2002	1,69	1,44	1,98	1,86	1,92
2003	1,67	1,56	1,94	1,92	1,92
2004	1,64	1,68	1,90	1,97	1,92
2005	1,61	1,80	1,87	2,01	1,92
2006	1,59	1,93	1,83	2,05	1,92
2007	1,56	2,06	1,80	2,09	1,92
2008	1,54	2,20	1,77	2,13	1,92
2009	1,51	2,33	1,74	2,16	1,92
2010	1,49	2,46	1,71	2,19	1,92
2011	1,47	2,59	1,68	2,21	1,92
2012	1,45	2,72	1,65	2,24	1,92
2013	1,43	2,85	1,62	2,26	1,92
2014	1,41	2,97	1,60	2,28	1,92
2015	1,39	3,08	1,57	2,29	1,92
2016	1,37	3,19	1,55	2,31	1,92
2017	1,35	3,30	1,52	2,32	1,92
2018	1,33	3,40	1,50	2,33	1,92
2019	1,31	3,50	1,48	2,34	1,92
2020	1,30	3,58	1,46	2,35	1,92

Verifica-se que a curva polinomial de 3º. grau apresenta taxas de crescimento muito altas a partir de 2010, maiores que 2,46, em comparação com taxas descritas anteriormente, mesmo que estas tenham sido calculadas

em intervalos de tempo maiores. Portanto, está inadequada para ser utilizada como projeção populacional de Toledo-Pr.

A curva linear da 1ª Fase apresenta o menor r^2 dentre os modelos restantes, portanto, também, pode ser desconsiderada como modelo de projeção populacional. A curva 2º Grau da 2ª. Fase apresenta maior valor de correlação, porém conforme descrito anteriormente, curvas polinomiais podem induzir a erros no momento de sua projeção.

Desta forma, tem-se o modelo linear da 2ª fase e o exponencial como possibilidade de adoção para geração de dados de crescimento populacional. Como a curva exponencial apresenta um fator de correlação maior e a projeção é relativamente pequena, adotou-se a curva exponencial da 2ª. Fase (equação 10) para projeção demográfica de Toledo-Pr com valor r^2 de correlação igual a 0,991.

$$y = 90491e^{0,019x} \quad (r^2 = 0,991) \quad (10)$$

A população para o ano de 2020 é de 142.772 habitantes.

4.1.2 Geração de resíduos sólidos no município de Toledo-Pr

Para obter as quantidades de resíduos sólidos produzidos durante a vida útil do aterro, utilizaram-se os dados reais já existentes coletados por Toledo (2011), descritos na Tabela 6, e a população foi gerada pela curva exponencial, exceto os dados reais.

Tabela 6 – Resíduos Domiciliares Gerados no Município de Toledo

ANO	População	Kg RS.ano⁻¹	Kg RS.hab⁻¹ano⁻¹	Kg RS.hab⁻¹dia⁻¹
2003	103.363	14.456.365	139,86	0,3885
2004	105.346	14.916.875	141,60	0,3933
2005	107.367	15.382.040	143,27	0,3980
2006	109.426	18.161.360	165,97	0,4610
2007	109.857	19.950.090	181,60	0,5044
2008	113.664	20.714.665	182,24	0,5062
2009	115.845	22.081.000	190,61	0,5295
2010	119.313	22.729.410	190,50	0,5292

Fonte: Toledo (2011)

Observa-se que o aumento populacional é proporcional ao aumento no índice de geração de resíduos sólidos per capita no município. Sendo que o mesmo aumento, além do crescimento populacional, também pode estar relacionado ao possível aumento da renda média desta mesma população, acarretando assim, um provável aumento na quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados.

Contador (2000) argumenta que o crescimento populacional possui impacto notável na geração de resíduos, e que o efeito observado pelo crescimento da renda populacional também influencia neste impacto: “pesquisas indicam que cada 1% de aumento na renda per capita está associado com o aumento de 0,34% na geração de resíduos sólidos, enquanto cada 1% de aumento na população expande a geração de resíduos em 1,04%.

Nota-se que no ano de 2003 com uma população de 103.363 habitantes, produzia-se 388,5 gramas de resíduos domiciliares por habitante ao dia no município de Toledo. Já em 2010 a geração per capita diária de resíduos subiu para 529,2 gramas. Isso significa um aumento populacional de 13,37% que repercutiu no aumento de 26,59% na geração de resíduos sólidos por habitante ao dia. Estas mudanças ocorreram num período de 7 anos.

Houve um pequeno decréscimo no valor de geração per capita de resíduos do ano de 2009 para o ano de 2010, o decréscimo pode ter ocorrido, aparentemente, em razão do aumento populacional durante o ano de 2010 estar dissociado do aumento da geração de resíduos sólidos naquele ano. Outra probabilidade é de um possível erro na quantificação dos resíduos pesados no aterro sanitário durante o ano de 2010.

A composição e a taxa de geração dos resíduos sólidos é em função de uma série de variáveis, dentre elas, a condição sócio-econômica da população, o grau de industrialização da região, a sua localização geográfica, as fontes de energia e o clima.

A partir dos dados reais dos resíduos já dispostos no aterro, estimou-se a geração de resíduos dos anos seguintes, através de duas diferentes estimativas, observadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Geração de Resíduos Sólidos Dispostos e Estimados, no Aterro Sanitário de Toledo

ANO	Tempo (anos)	RS Dispostos (Kg.ano ⁻¹)	<i>Linha Alta</i>	<i>Linha Baixa</i>
			(<i>Linear</i> ₁)	(<i>Linear</i> ₂)
			RS Estimados (Kg.ano ⁻¹)	RS Estimados (Kg.ano ⁻¹)
2003	1	14456365		
2004	2	14916875		
2005	3	15382040		
2006	4	18161360		
2007	5	19950090		
2008	6	20714665		
2009	7	22081000		
2010	8	22729410		
2011	9		24523183	23461874
2012	10		25850785	24342009
2013	11		27178387	25247276
2014	12		28505989	26178316
2015	13		29833590	27135784
2016	14		31161192	28120352
2017	15		32488794	29132707
2018	16		33816396	30173553
2019	17		35143997	31243610
2020	18		36471599	32343616

Fonte: Autora (2013)

Dentre as estimativas testadas, utilizaram-se as duas estimativas que apresentaram os dados mais condizentes com a realidade. Sendo que, dentre todas, a equação Linear apresentou os melhores resultados.

A estimativa da Linha Alta (linear 1) foi gerada através da aplicação da equação linear utilizando os dados de produção de resíduos em Kg.ano⁻¹ gerados entre os anos de 2003 à 2010, e a partir destes, obteve-se a produção anual pela geração per capita estimada.

Já para a Linha Baixa (linear 2) as estimativas foram feitas diretamente através dos dados de geração per capita já existentes dos anos de 2007, 2008, 2009 e 2010.

Observa-se no Gráfico 5 os dados estimados utilizados para a avaliação da geração de metano no aterro.

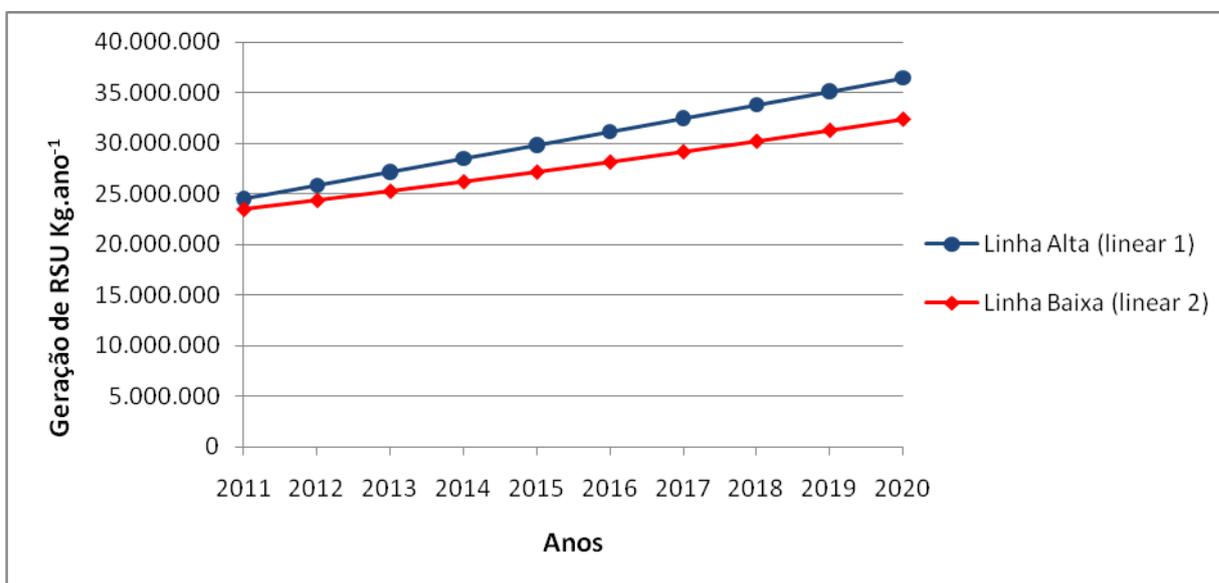


Gráfico 5 – Estimativa de geração de resíduos sólidos no município de Toledo

Trabalhou-se com duas linhas de estimativa de geração de resíduos, a fim de se obter um alcance maior em relação aos dados obtidos durante os 10 anos de projeção, e assim, mais segurança nos resultados obtidos.

Sendo assim, a geração de resíduos sólidos urbanos no município representou um crescimento estimado de 42,30%(mínimo) à 60,46% (máximo) no período entre 2010 à 2020.

4.1.3 Caracterização dos resíduos sólidos do município

Para o ensaio de composição gravimétrica e determinação do peso específico dos resíduos domiciliares, foram feitas amostragens por setor de coleta de resíduos, como divididos na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Divisão de setores de coleta de resíduos sólidos domiciliares no município de Toledo

SETOR	PERÍODO DE COLETA	FREQÜÊNCIA	LOCAIS
01	Noturno	Diário	• Centro
02	Noturno	3ª, 5ª, Sábado	• Jd. La Salle; Vila Becker; Recanto; Jd. Filadélfia
03	Noturno	2ª, 4ª, 6ª	• Parte do Centro; BNH Rossoni; BNH Parizotto; Jd. Pancera
04	Noturno	2ª, 4ª, 6ª	• Parte do Centro; parte Jd. La Salle; parte Jd. Sta. Maria; parte do Jd. Porto Alegre
05	Noturno	3ª, 5ª, Sábado	• Tocantins; V. Industrial; Jd. Gisele; Jd. Pasquale
06	Diurno	2ª, 4ª, 6ª	• Jd. Anápolis; V. Industrial; Coopagro
07	Diurno	3ª, 5ª, Sábado	• Jd. Porto Alegre; Jd. Concórdia; e Jd. Independência
08	Diurno	2ª, 4ª, 6ª	• Pioneiro
09	Diurno	3ª, 5ª, Sábado	• Jd. Bressan; Jd. César Park; V. Panorama
10	Diurno	2ª, 4ª, 6ª	• Jd. Europa/América
11	Diurno	3ª, 5ª, Sábado	• Parte da V. Operária; V. Paulista; Tancredo Neves; parte do Centro
Interior	Diurno	3ª	• Concórdia do Oeste; Dez de Maio; Vila Ipiranga; Dois Irmãos; Novo Sarandi; Vila Nova
	Diurno	6ª	• Bom Princípio; Dez de Maio; Vila Ipiranga; Dois Irmãos; Novo Sarandi; Vila Nova

Fonte: TOLEDO (2011)

O ensaio de caracterização dos resíduos do município foi realizado no ano de 2006 por Toledo (2011), a Tabela 8 apresenta a divisão dos 11 setores de coleta de resíduos na área urbana do município e o último setor nomeado como Interior, corresponde a coleta total de resíduos que pertencem a área rural, incluindo Distritos e Vilas.

As informações contidas na Tabela 8 são correspondentes ao ano de 2006, porém, durante os cinco últimos anos, o mapeamento da coleta foi modificado, em decorrência de novos programas de coleta de resíduos, além

do crescimento e surgimento de novos bairros, no entanto, um novo teste de caracterização de resíduos sólidos ainda não foi realizado.

A Tabela 9 apresenta a determinação do peso específico das amostras coletadas em cada setor do município

Tabela 9 – Peso específico dos resíduos sólidos de cada setor de coleta no município de Toledo

Setor de Coleta	Peso da Carga (kg)	Peso Específico (kg/m ³)	Matéria Orgânica (kg)	Plástico (kg)	Vidro (kg)	Metal / Alumínio (kg)	Papel (kg)	Outros (kg)	Perda (kg)
01	4.740	238,9	161,4	23,3	5,6	1,8	30,3	9,5	7
02	5.000	304,8	243,7	21,9	4,3	1,8	19,3	5,6	8,2
03	6.190	275,2	189,9	17,5	4	2,3	29,6	21,4	10,5
04	7.520	257	140	23,3	6	2,7	40	43,4	1,6
05	9.090	282,6	170,4	25,9	2	2,9	34	34,5	12,9
06	6.780	255,6	182	28,1	1,8	3,3	15,9	22,7	1,8
07	6.530	290,9	206,6	24	6,3	2,3	18	29,6	4,1
08	3.770	272,8	175	23,3	1,6	4,1	22,3	39,9	6,6
09	5.420	305,9	232,6	20,6	3,9	3	17	23,7	5,1
10	7.430	284,4	211	17,9	3,8	3,2	23,3	17,3	7,9
11	7.860	282,2	207,3	29,6	2,6	2,8	21,9	13,6	4,4
Interior	4.780	245,05	152,25	27,3	2,95	4,25	24,4	27,5	6,4

Fonte: TOLEDO (2011)

Dentro do peso específico de cada amostra, foi estabelecido o peso específico de cada tipo de resíduo separadamente, considerando também os resíduos sem classificação padrão, nomeados como “outros”, constituídos de materiais têxteis, couro, borrachas em geral, resíduos infectantes descartados irregularmente junto ao resíduo comum, além de outros resíduos.

A fração denominada de perda, também foi considerada no processo de análise, ela significou a diferença final obtida entre o somatório de todas as frações de resíduos de cada ensaio e o peso específico total de cada amostra.

Esta sobra de peso ou diferença pode ser justificada por vários fatores como: ineficácia da recuperação dos resíduos após a separação sobre a geomembrana; a possível descalibragem da balança utilizada no ensaio; ou líquidos provenientes dos resíduos que foram perdidos no processo de separação das frações entre os tambores.

A variação de unidade foi considerada desprezível, pois os ensaios realizaram-se no mesmo dia em que a carga foi disposta no aterro, e nunca em dias chuvosos.

Nas Figuras 18 e 19 observa-se o processo de separação e pesagem dos tipos de resíduos encontrados nas amostras.



Figura 18 – Obtenção do peso específico da amostra

Fonte: TOLEDO (2011)



Figura 19 – Triagem dos resíduos da amostra em tambores

Fonte: TOLEDO (2011)

Após a obtenção do peso específico dos resíduos e peso específico de cada fração classificada, foi possível avaliar a proporção de cada tipo de resíduo na amostra, e obter o valor médio de cada material. Estes dados podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 – Composição Gravimétrica dos resíduos sólidos no município de Toledo

Setor de Coleta	Matéria Orgânica (%)	Plástico (%)	Vidro (%)	Metal / Alumínio (%)	Papel (%)	Outros (%)	Perda (%)
01	67,60	9,80	2,30	0,70	12,70	4,00	2,90
02	80,00	7,20	1,40	0,60	6,30	1,80	2,70
03	69,00	6,40	1,40	0,80	10,80	7,80	3,80
04	54,50	9,10	2,30	0,60	15,60	16,90	1,00
05	60,30	9,20	0,70	1,00	12,00	12,20	4,60
06	71,20	11,00	0,70	1,30	6,20	8,90	0,70
07	71,00	8,20	2,20	0,80	6,20	10,20	1,40
08	64,10	8,50	0,60	1,50	8,20	14,60	2,50
09	76,00	6,70	1,30	1,00	5,60	7,70	1,70
10	74,20	6,30	1,30	1,10	8,20	6,10	2,80
11	73,40	10,50	0,90	1,00	7,80	4,80	1,60
Interior	62,2	11,1	1,2	1,7	10,0	11,2	2,7
MÉDIA	68,63	8,67	1,36	1,01	9,13	8,85	2,37

O setor de coleta 02, representado pelos bairros Jardim La Salle, Vila Becker, Recanto, e Jardim Filadélfia, apresentaram a maior quantidade de material orgânico, apesar destes bairros representarem, na sua maioria, moradores de classe alta e média. Seguidos pelos setores de coleta 09, 10 e 11 representados pelos bairros de menor poder aquisitivo do município, com a sua maioria composta por moradores de classe baixa.

Para Hoornweg (2000) quanto maior o poder econômico e maior a porcentagem urbana da população, maior a quantidade de resíduos sólidos produzidos e quanto menor a renda da população, maior o percentual de matéria orgânica na composição dos resíduos.

Observou-se que o setor de coleta 04 apresentou 3 das maiores porcentagens de resíduos como, vidro, papel e outros resíduos. Este setor é representado pelos bairros: Centro, Jardim La Salle, Jardim Santa Maria e Jardim Porto Alegre, sendo que, estes são os bairros de maior poder aquisitivo do município de Toledo.

A visão geral da composição média dos resíduos no município de Toledo pode ser observada no Gráfico 6 a seguir.

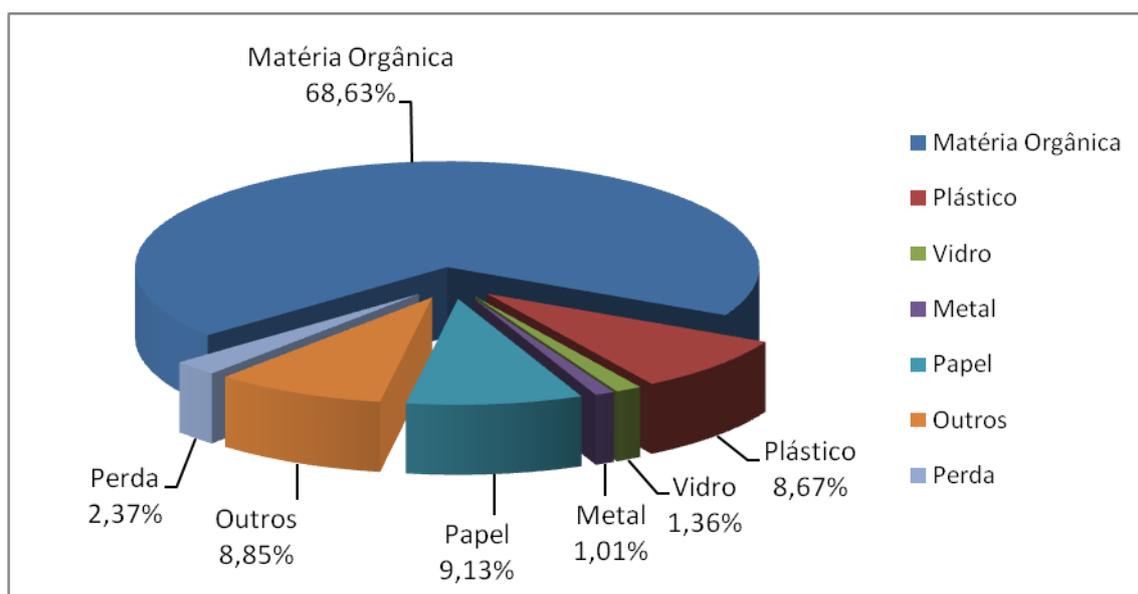


Gráfico 6 – Composição gravimétrica dos resíduos gerados no município de Toledo

Os resíduos dispostos no aterro sanitário de Toledo, na área onde existe sistema de captação do biogás, são de característica domiciliar, por isso, a sua maioria é composta por material orgânico, plástico, papel, e outros resíduos não passíveis de classificação.

A tabela 11, apresenta uma comparação dos dados da composição gravimétrica dos resíduos do município de Toledo, com os resíduos brasileiros, e a média dos países da América do Sul.

Tabela 11 – Composição dos resíduos sólidos na América do Sul, Brasil e Toledo

TIPO DE RESÍDUO	Matéria Orgânica (%)	Plástico (%)	Vidro (%)	Metal / Alumínio (%)	Papel (%)	Outros (%)	Perda (%)
América do Sul - 2006	49,6	10,8	3,3	2,9	17,1	16,3	---
Brasil - 2006	57,41	16,49	2,34	2,07	13,16	8,54	---
Toledo - 2006	68,63	8,67	1,36	1,01	9,13	8,85	2,37

Fonte: Adaptado de IPCC (2006); Abrelpe (2006); Toledo (2011);

A composição dos resíduos sólidos do município de Toledo apresenta valores menores de plástico, vidro, metal/alumínio, e papel, resíduos estes, com tempo de decomposição muito superior ao resíduo orgânico, cujo valor é maior no município de Toledo, em relação à média dos resíduos brasileiros e a média dos resíduos dos países da América do Sul.

Pode-se dizer que é provável que a população do município de Toledo, tenha um consumo menor de embalagens ou produtos industrializados, em comparação aos hábitos de consumo dos brasileiros e dos sul-americanos em geral.

4.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS GERADO PELO ATERRO EM DUAS VIAS: BIOGÁS APROVEITADO; E BIOGÁS EMITIDO PELA SUPERFÍCIE DE COBERTURA.

4.2.1 Características do biogás aproveitado pelo aterro

4.2.1.1 Resultados do Ponto 1 de coleta

As amostras iniciais coletadas no Ponto 1 foram as primeiras amostragens realizadas no trabalho. Por isso, realizou-se como teste inicial a utilização de seringas com agulha de volume de 1mL. Este Procedimento não demonstrava praticidade e o volume da amostra era muito pequeno em comparação a possibilidade do uso de bóias. Sendo assim, adotou-se nas coletas seguintes a amostragem com uso de bóias.

O gráfico 7 ilustra os resultados apresentados na análise das amostras do biogás coletado no Ponto 1.

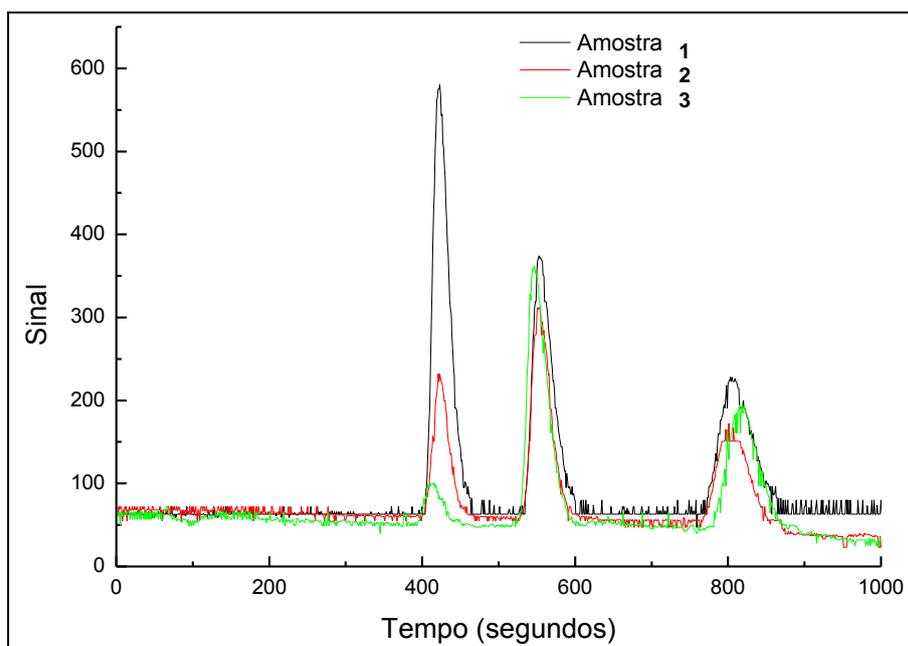


Gráfico 7 – Cromatograma das amostras de biogás do Ponto 1

Todas as amostras constituíam os 3 compostos identificáveis. O que ocasionou uma variação maior foram as quantidades de ar existentes nas amostras injetadas. As proporções de metano e dióxido de carbono apresentaram-se com teores semelhantes.

Obtendo a altura dos picos do cromatograma do Gráfico 7 podemos calcular o volume parcial do ar, CH₄ e CO₂ para amostras 1, 2 e 3.

Tabela 12 - Volume parcial de cada substância nas amostras

Substância	Amostra1 Volume parcial (mL)	Amostra 2 Volume parcial (mL)	Amostra 3 Volume parcial (mL)
Ar	0,0518	0,0201	0,0039
Metano	0,0429	0,0350	0,0429
CO₂	0,0253	0,0184	0,0243
Vol. Total	0,1200	0,0735	0,0711

Considerando que o ar é proveniente de contaminação e não é de processos biológicos, podemos recalcular a proporção das frações considerando apenas o CO₂ e CH₄, originando a Tabela 13.

Tabela 13 – Proporção de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) no biogás amostrado

Substância	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Amostra 3 (%)	MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO (%)
Metano	62,88	65,57	63,81	64,087	1,37
CO ₂	37,12	34,43	36,19	35,913	1,37

Assim, teríamos os seguintes valores médios e seus respectivos desvios padrões de $64,09 \pm 1.37$ para o metano, e $35,91 \pm 1.37$ para o dióxido de carbono.

De acordo com estudos de Silva e Campos (2008) a análise geral da caracterização do biogás do aterro sanitário de Bandeirantes-SP, mostrou que os poços apresentaram uma porcentagem de metano média de 47,68%, com desvio padrão de +/- 2,45%.

4.2.1.2 Resultados dos Pontos 2 e 3 de coleta

As amostragens foram realizadas nos Pontos 2 e 3, a fim de se avaliar o funcionamento do filtro de limalha de ferro no decorrer da sua utilização pelo sistema.

A tabela 14 representa os resultados das análises realizadas pelo Kit Biogás, durante os meses de julho, agosto e setembro.

Tabela 14 – Caracterização do biogás nos Pontos 2 e 3 do sistema

DIA DA COLETA	RESULTADOS		
	PARÂMETRO	PONTO 2	PONTO 3
28/07/2012 Coleta 1	Metano	65%	65%
	Dióxido de carbono	35%	35%
	Amônia	0,00 ppm	0,00 ppm
	Gás sulfídrico	12,71 ppm	0,00 ppm
18/08/2012 Coleta 2	Metano	60%	60%
	Dióxido de carbono	30%	30%
	Amônia	0,00ppm	0,00ppm
	Gás sulfídrico	17,97ppm	0,00ppm
05/09/2012 Coleta 3	Metano	50%	50%
	Dióxido de carbono	50%	50%
	Amônia	0,00ppm	0,25ppm
	Gás sulfídrico	34,41 ppm	21,92ppm
20/09/2012 Coleta 4	Metano	50%	50%
	Dióxido de carbono	50%	50%
	Amônia	0,00ppm	0,00ppm
	Gás sulfídrico	78,38ppm	6,72ppm

Observa-se que os valores de gás sulfídrico encontrados no Ponto 3, são menores em relação aos valores encontrados no Ponto 2. Apontando assim, um eficiente funcionamento do filtro composto de limalha de ferro. Porém, após aproximadamente 3 meses de uso, o biogás já apresentou sinais de gás sulfídrico no Ponto 3, devido ao início do processo de saturação do material reagente do filtro.

De acordo com Muche e Zimmerman (1985) a presença de H_2S no biogás o torna corrosivo para as peças de metal. Peças galvanizadas são igualmente sujeitas à corrosão da superfície. O efeito do H_2S sobre metais não-ferrosos em componentes de equipamentos tais como reguladores de pressão, medidores de gás e válvulas, é muito relevante. Eles são rapidamente corroídos também em motores a gás (selos e válvulas).

Sendo assim, é recomendável que seja realizada a troca do material saturado periodicamente, a fim de se preservar a vida útil do motor de combustão.

Em relação às concentrações de amônia, é possível notar que foram somente encontrados vestígios muito baixos no Ponto 3 da coleta 3.

Em geral as concentrações de amônia no biogás de aterros sanitários são baixas, em comparação ao biogás produzido a partir de outros subprodutos como, dejetos de animais.

A amônia é um gás incolor, mais leve do que o ar. É facilmente liquefeito devido a formação de pontes de hidrogênio entre as suas moléculas (FELIX; CARDOSO, 2004). Justificando assim, o fato da amônia, mesmo que existente no biogás, possivelmente pôde ser dissipada nas tubulações canalizadas desde a saída dos queimadores, até o moto gerador, representada por uma distância de 550 metros, sem sistema eficiente de vedação e drenagem de condensado.

4.2.1.3 Resultados da análise instantânea do biogás

Para fins de comparação de dados e metodologias, foi realizado a análise do biogás nos mesmos pontos realizados pelo método do Kit Biogás e por cromatografia gasosa.

Foi possível obter um conhecimento elementar sobre o funcionamento do motogerador no processo de queima do biogás pela análise do gás na sua saída.

Os valores encontrados nas análises podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15 – Características do biogás por análise do medidor portátil

PONTO DA AMOSTRA	Temp. Ambiente	Temp. Gás	O₂	CO₂	CH₄	CO
Poço de Captação (Celula1)	26,9°C	29,3°C	0,25%	1156 ppm	58,00%	3 ppm
Entrada do Gerador	27,5°C	34,1°C	5,77%	848 ppm	43,00%	10 ppm
Saída do Gerador	28,5°C	310,8°C	6,52%	806 ppm	0,70%	1163 ppm

As três análises foram realizadas no mesmo momento, do dia 06 de dezembro de 2012, o qual apresentou temperaturas relativamente elevadas com média de 27 °C.

Comparando os valores obtidos no poço de captação (localizado na célula 1 do aterro), e na entrada do gerador, observa-se uma diferenciação muito significativa nas características do biogás (diferença de 15% de metano entre os dois pontos).

A temperatura do biogás, também, é modificada ao passar pela tubulação de aproximadamente 550 metros, da sua geração na célula até o moto gerador. Este fato pode ser explicado parcialmente pela existência de um soprador antes do moto gerador, o qual possui um pequeno motor que transfere calor para o gás, aquecendo-o.

Porém, a maior contribuição para variação da temperatura do gás e concentração de oxigênio na entrada do gerador ocorre pelo fato da tubulação de arraste do biogás ser formada por encanamento externo, exposto as intempéries como calor e frio, e construído de material de PVC, sem a necessária estanqueidade para evitar a entrada de oxigênio atmosférico. Outro fator para a maior porcentagem de oxigênio pode ser justificado pelo comportamento do moto gerador, pois no momento em que o biogás é aspirado pelo soprador e pelo motor, ocorre a inserção de ar (oxigênio e nitrogênio), diminuindo a concentração de metano no biogás que entra no motor de combustão.

A diminuição do dióxido de carbono (CO_2) e aumento da concentração do monóxido de carbono (CO), na amostragem da entrada do gerador em comparação ao poço de captação na célula 1, não representam mudanças significativas em relação ao funcionamento do sistema.

Já a diferença de concentração de metano (CH_4) entre os dois pontos pode apresentar importância significativa quanto ao funcionamento e rendimento do moto gerador. Para um melhor rendimento do motor e aproveitamento do potencial energético do biogás produzido, representado este pela concentração de metano, sugere-se que sejam reavaliados os pontos de vazamento e contaminação do biogás pelo ar atmosférico, além do tipo de material utilizado para a tubulação.

O ponto de análise de saída do gás após o processo de queima pelo moto gerador (Figura 20) foi caracterizado instantaneamente por valores de 1163 ppm de monóxido de carbono (CO) e 806 ppm de dióxido de carbono (CO₂), provenientes da combustão incompleta e completa do gás combustível, além de 0,70% de metano (CH₄), não aproveitado pelo motor e 6,52% de oxigênio (O₂).



Figura 20 – Análise do gás após queima pelo moto gerador.

Segundo estudos de Coelho et al. (2006), onde foram analisados os gases de combustão de um motor Ciclo Otto alimentado com biogás, similar ao sistema instalado no aterro sanitário de Toledo-Pr, apresentaram valores de 929 à 641 ppm de CO; 84.000 à 88.000 ppm de CO₂; 0,19 à 3,10% de CH₄ e 3,70 à 5,70% de O₂

Gases de exaustão provenientes de microturbinas alimentadas a biogás, também foram analisados segundo estudos de Coelho et. al. (2005), e obtiveram concentrações médias de 80,8 ppm de CO; 21.000 ppm de CO₂; 0,004% de CH₄; e 18,20% de O₂.

Comparando-se os valores de CO₂ apresentados na Tabela 12, aos dados citados por Coelho et al. (2006) e Coelho et al. (2005), nota-se que houve erro de medição do equipamento, sendo que os valores obtidos foram muito baixos em relação aos valores encontrados na literatura.

4.2.2 Características do biogás emitido pela camada de cobertura do aterro

4.2.2.1 Testes iniciais de tentativa de medição de vazão

Os dois primeiros ensaios teste com a placa de fluxo foram realizados com o intuito de medir a vazão do gás emitido pela camada de cobertura. Para tanto, foram utilizadas as mesmas técnicas de cravamento da placa, descritas na metodologia.

No primeiro ensaio teste, foi acoplado a uma das conexões de saída, permanecendo a outra fechada, um medidor de gás modelo G0.6 fabricado pela LAO, com capacidade de vazão mínima de $0,002 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Ele permaneceu conectado durante 2 horas na placa e não apresentou nenhuma mudança em seu painel. Sendo assim, repetiu-se o teste em outro ponto escolhido no aterro, e o mesmo ensaio teve duração de 07 horas, também não apresentando nenhum resultado de vazão no equipamento (figura 21).

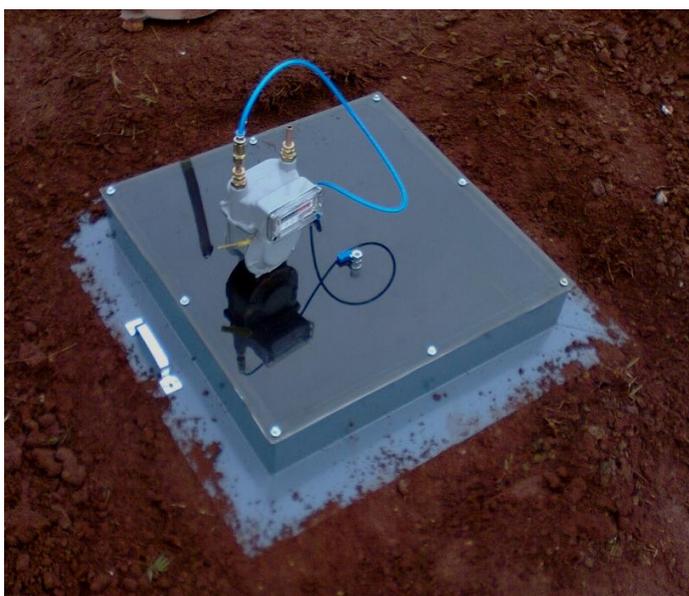


Figura 21 – Tentativa de ensaio com medidor de vazão na placa de fluxo

Um fato que pode explicar o ocorrido é a baixa vazão relativa ao tipo de medidor instalado e a pressão insuficiente no interior da placa para que o medidor de gás funcionasse adequadamente. Sendo assim, instalou-se na placa um medidor de vazão do tipo bolhômetro, fabricado no laboratório de Química da Unioeste, *campus* Toledo. Porém, o mesmo permaneceu durante 1

hora, conectado a uma das saídas da placa de fluxo, e também não apresentou nenhum sinal de vazão.

Guedes (2007) realizou uma série de ensaios com placa de fluxo para determinação da fuga de gases pela cobertura do aterro. Neste estudo foi verificado que ao registrar uma baixa pressão atmosférica (1011mBar), o fluxo anotado pela placa foi o mais intenso (53,1 ml/min.m²) e com maior concentração de metano (55%). Em comparação com o registro de maior pressão (1026 mBar) o fluxo medido foi de apenas 8,90 ml/min.m². Sendo assim, a pressão atmosférica é um parâmetro a ser considerado na alteração do fluxo de gases pela camada superficial do aterro.

Não obtendo nenhum resultado com as tentativas de medição da vazão do gás, adotou-se o método de permanecer a placa fechada, e amostrar o gás após algumas horas, para assim obter suas características, e por elas, apontar os teores de gases em vazamentos de biogás nos pontos de ensaio, descritos na metodologia de estudo.

4.2.2.2 Resultados das análises do biogás em ensaios com a placa de fluxo

Foram obtidos as seguintes informações e características do biogás coletado e analisado por cromatografia gasosa e por análise do Kit Biogás na Tabela 16.

Através das informações obtidas na Tabela 16, calculou-se a média dos valores nos ensaios com cobertura de terra e com cobertura de grama, a fim de se observar o ocorrido em cada tipo de cobertura. Para uma análise global do experimento, a média geral de todos os ensaios realizados.

Tabela 17 – Valores médios oriundos dos dados da tabela 16

Parâmetros	MÉDIA (TERRA)	MÉDIA (GRAMA)	MÉDIA GERAL
Tempo de ensaio	06h19min	05h54min	06h06min
Temperatura Ambiente (°C)	36,44	31,58	34,01
Temperatura Interna da placa(°C)	45,6	39,92	42,76
Metano (%)	11,52**	0,42**	5,97**
Dióxido de carbono (%)	19,91**	1,28**	7,49**
Amônia (ppm)	0,03*	38,00*	19,02*
Gás Sulfídrico (ppm)	1,88*	0,00*	0,94*

* Faixa de erro de análise do Kit Biogás foi determinado em 5,00%

** Desvio padrão de análise do Cromatógrafo à gás foi determinado em 0,53%

Como os ensaios foram realizados no mês de novembro, e o aterro sanitário possui um microclima com temperaturas elevadas durante o verão, a temperatura média ambiente foi de 34,01°C na célula de estudo, durante os dias de experimento, caracterizando um ambiente com temperaturas propícias para a ação dos microorganismos anaeróbios, e produção de biogás.

A temperatura interna da placa, medida no momento da amostragem do gás, apresentou elevação em comparação a temperatura ambiente, em todos os ensaios realizados. Fato ocorrido devido ao material da placa ser composto de aço galvanizado, um bom condutor de calor, somado a forte radiação solar incidente.

4.2.2.3 Resultados das análises da composição de metano e dióxido de carbono em cada ponto de ensaio

As amostras de gás coletadas na placa de fluxo apresentaram características distintas de composição de metano e dióxido de carbono entre si.

Os valores de CH₄ identificados nos pontos 3, 4, 5 e 6 variaram de 2,99 à 1,70%. O CO₂ não foi identificado nas primeiras 4 análises, pois o objetivo inicial era de somente identificar o metano, porém, passou-se posteriormente a identificar também a concentração de CO₂, como observado no restante das análises.

No Gráfico 8, observa-se o cromatograma proveniente da amostra do ponto 7, no qual houve somente a identificação do ar, sem nenhuma concentração de CO₂ e CH₄.

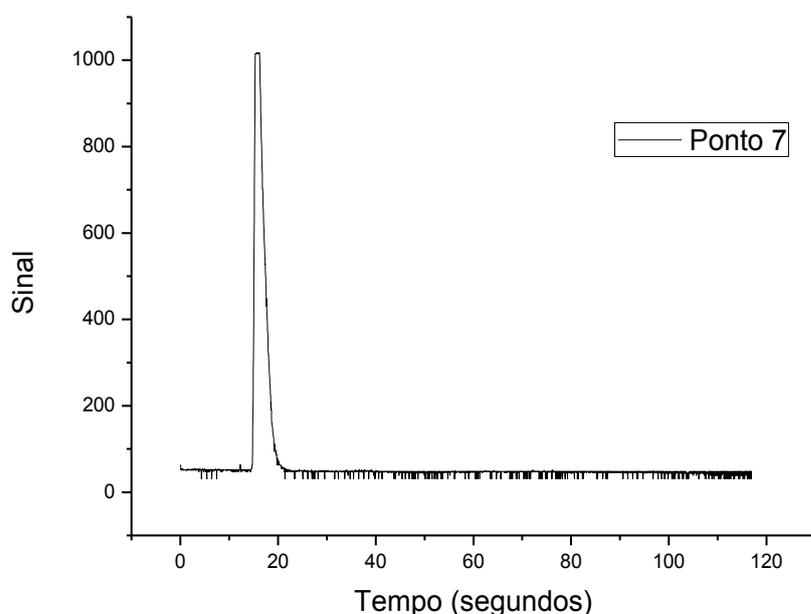


Gráfico 8 - Cromatograma do biogás no ensaio do ponto 7, com cobertura de grama

Nos pontos 7, 8, 9 e 12, com cobertura de grama, não foram identificadas concentrações de metano nas amostras. Pequenas concentrações de dióxido de carbono foram encontradas nos pontos 8, 9 e 12 de 0,39; 3,28 e 1,46% respectivamente.

Frente ao fato de que nos pontos com cobertura de grama, foram encontrados vestígios de CH_4 somente no ponto 6 (2,08%), representando uma média de 0,42% em todos os pontos com grama, e a concentração média de CO_2 nestes pontos foi de 1,28%, pode-se argumentar uma primeira hipótese de que na maioria dos pontos, o CO_2 pode não derivar do biogás emitido pela decomposição da massa de resíduos, e sim da atividade respiratória das células vegetais da grama aprisionada no interior da placa de fluxo.

Uma segunda hipótese pode ser justificada pelo fato de que a vegetação gramínea auxilia na contenção da emissão de metano pela célula. Fator indicativo para as ações de redução de emissões de gases do efeito estufa (GEEs) em aterros sanitários.

Esta hipótese pode ser corroborada por estudos de Teixeira et al. (2007), que avaliou o desenvolvimento de camada vegetal superficial, em termos de evolução das raízes e produção de biomassa, relacionado aos níveis de oxidação de metano no solo pelas bactérias metanotróficas. Os resultados demonstraram que, o metano foi oxidado em todos os casos em uma camada de 10 a 15 cm, mas sempre esta camada se formou logo abaixo da zona de raízes. Isto porque esta zona favorece a transferência de oxigênio que é fundamental para a oxidação do metano, reação esta, que fornece água e nutrientes para os vegetais.

Dentre todos os ensaios, o ponto 10 (Figura 22 e Gráfico 9) apresentou a maior concentração de metano, 48,94% e também a maior concentração de dióxido de carbono, 35,19%.



Figura 22 – Ensaio com placa de fluxo no Ponto 10 – cobertura de terra

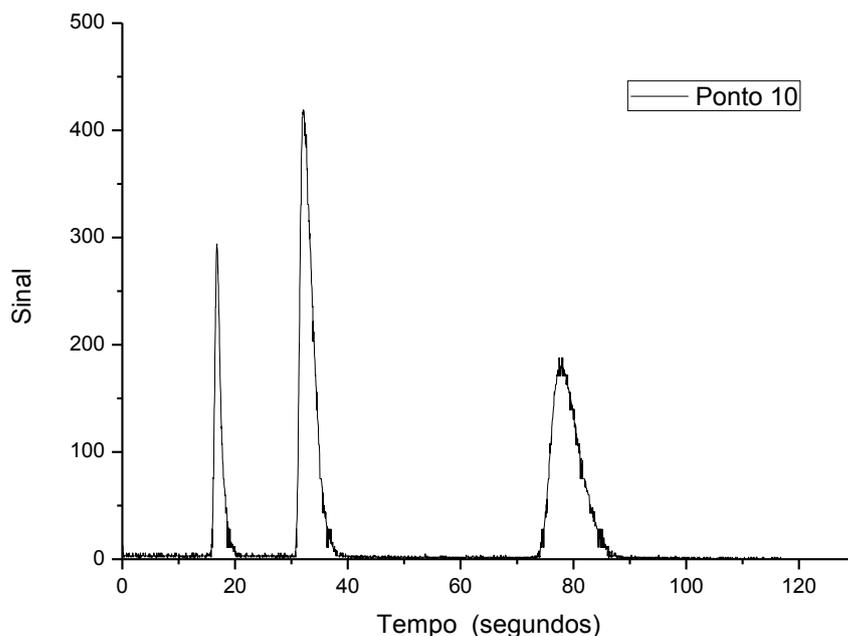


Gráfico 9 – Cromatograma do biogás no ensaio do ponto 10, com cobertura de terra

Os dados podem ser justificados por duas hipóteses. Uma delas é a aproximação do duto “F” de biogás (vide Figura 14), a qual permite a existência de fluxo, e conseqüentemente maior quantidade de biogás nessa área específica, o qual contribui com a perda de metano pela camada de cobertura neste ponto.

Fato este, que associado à ausência de vegetação gramínea neste ponto, facilita a emissão de metano para a atmosfera.

Este último fato é demonstrado pelo resultado da análise feita no ponto 12 (Figura 23 e Gráfico 10), cujo ensaio foi realizado à mesma distância do duto F, porém, com cobertura de grama, apresentando 0,00% de CH_4 e 1,46% de CO_2 na amostra coletada.



Figura 23 - Ensaio com placa de fluxo no Ponto 12 – cobertura de grama

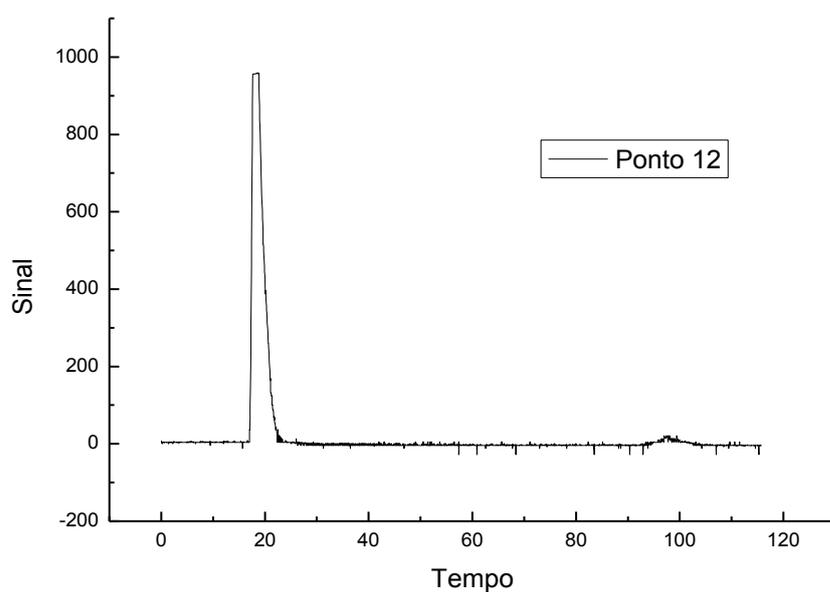


Gráfico 10 – Cromatograma do biogás no ensaio do ponto 12, com cobertura de grama

O aterro sanitário de Toledo também apresentou várias pontos com rachaduras nos períodos de seca (Figura 24), o que representou maior suscetibilidade de ocorrência de vazamentos/emissões de biogás pela camada de cobertura, comprovado pela formação visível de inúmeras bolhas, nas poças de chorume recirculado sobre a célula.



Figura 24 – Pontos de emissão de metano pela camada de cobertura da célula experimental do aterro sanitário de Toledo - PR

Durante os meses de setembro e outubro de 2012, devido ao longo período de baixa pluviosidade, houve dias em que não foi possível o funcionamento do moto gerador por falta de biogás nas tubulações. Fato ocorrido devido a grande quantidade de rachaduras no solo, principalmente nas laterais dos dutos.

4.2.2.4 Resultados das análises de gás sulfídrico e amônia por espectrofotometria das amostras obtidas pelo Kit Biogás

As amostras analisadas por espectrofotometria para determinação da concentração de gás sulfídrico são observadas no Gráfico 11.

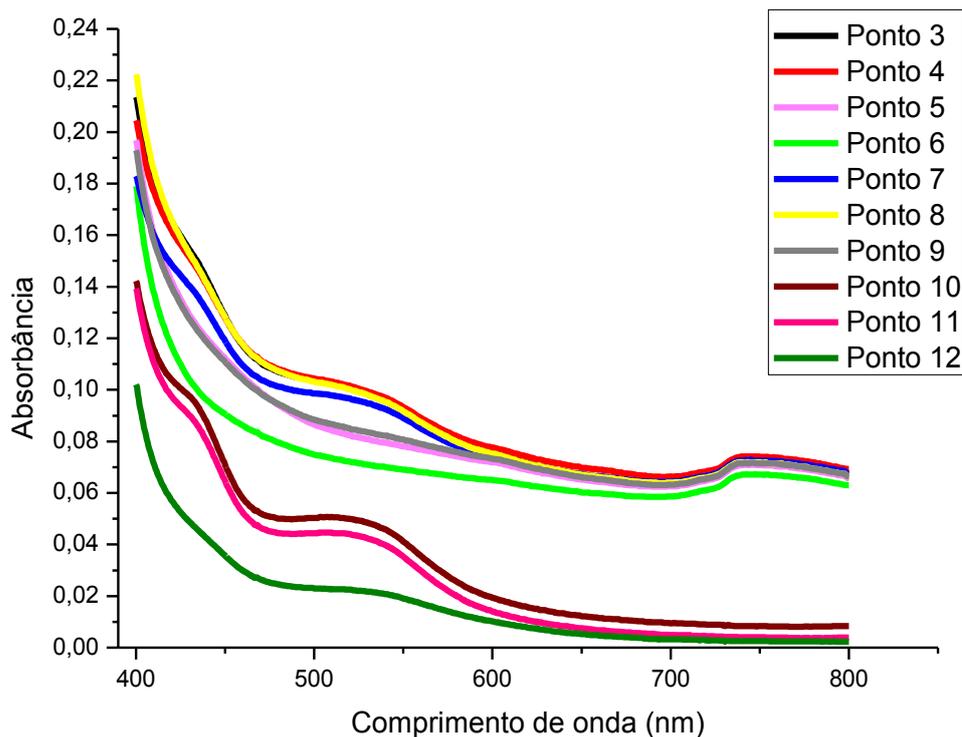


Gráfico 11 – Absorbância das amostras para determinação da concentração de gás sulfídrico

Para a identificação do sulfeto nas amostras analisadas, foi utilizado o corante azul de metileno, que tem seu pico de absorbância, segundo estudos de Neumann et al. (2002), em 670 nm, gerando cor conforme a concentração de sulfeto presente no biogás, diluído em água.

Observa-se no Gráfico 11, que na faixa de absorção do corante, não existe nenhum ponto analisado com formação de pico, constatando-se que a concentração foi de 0,00 ppm na maioria dos pontos, com exceção dos pontos 3 e 5, nos quais foram identificadas pelo Biofoto Microprocessado do Kit Biogás, concentrações de 8,14 e 1,28 ppm respectivamente.

Assim, comprova-se com a análise por espectrofotometria de que o biogás emitido pela camada de cobertura do aterro sanitário, sendo com cobertura ou não de grama, não apresentou concentrações significativas de gás sulfídrico no biogás amostrado, representando uma média de concentração de 1,88 ppm nas amostras com cobertura de terra, e 0,00 ppm na média das amostras com cobertura de grama.

Este fato pode ser explicado com base em estudos de Meinerz et al. (2009), que analisou a composição do solo da camada superficial (0-20cm) da

célula concluída do aterro sanitário de Toledo. O estudo caracterizou os macro e micronutrientes presentes no solo, e dentre todos, o ferro (Fe) obteve uma concentração de 574,8 mg.dm³, sendo esta, 15 vezes superior a de todos os outros componentes identificados no experimento.

O ferro (Fe⁺²), existente no solo, quando em contato com o gás sulfídrico (H₂S), reage formando o sulfeto ferroso. Ao estabelecer as condições de aeração do solo, imediatamente há formação de sulfeto elementar e sua oxidação em sulfato.

Sendo assim, o ferro presente no solo da camada de cobertura do aterro sanitário, reage com as moléculas de gás sulfídrico, funcionando assim, como uma espécie de filtro, que impede a saída do gás sulfídrico pela superfície. Diferente da concentração na saída das tubulações, onde são encontrados teores significativos de gás sulfídrico.

Além do ferro, uma grande quantidade de outros componentes minerais estão presentes naturalmente no solo dos aterros, como os minerais oriundos da decomposição de resíduos metálicos, pilhas, baterias e outros, estes, são facilmente reagidos com o gás sulfídrico, o eliminando do biogás emitido pela superfície de cobertura.

A concentração de amônia identificada pela absorvância das amostras analisadas nos Pontos 3 à 12 dos ensaios (Gráfico 12) representaram concentrações maiores em comparação as concentrações de gás sulfídrico.

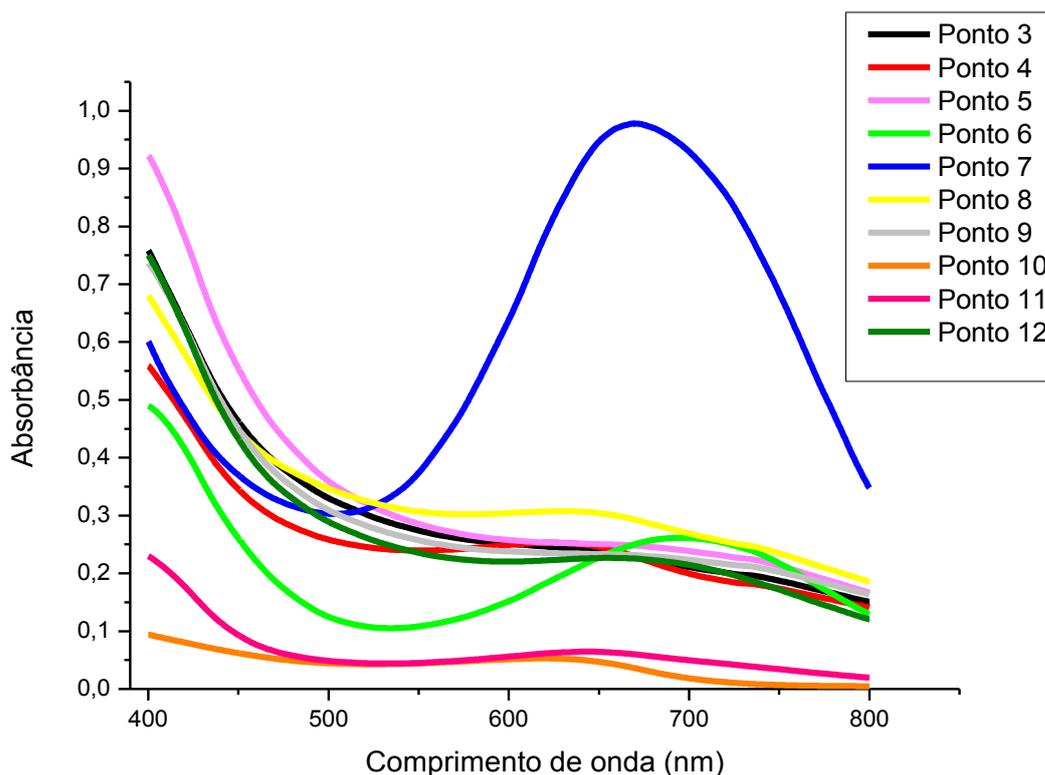


Gráfico 12 – Absorbância das amostras para determinação da concentração de amônia

O indicador de cor utilizado na reação foi o azul de indofenol, gerando cor conforme a concentração de amônia presente no biogás diluído em água. De acordo com Korn et al. (2005) e Rocha et al. (1989), o pico de absorbância do azul de indofenol é de 645 nm.

No ponto 7 é possível observar com clareza a absorbância do corante utilizado, formando um pico. Em comparação com os outros pontos, a amônia no Ponto 7 excedeu muitas vezes a concentração das demais amostras, sendo representada pela análise do Biofoto Microprocessado, com concentração de 157,92 ppm, seguido do ponto 6, que obteve uma concentração de 24,68 ppm.

Os outros pontos (12 e 11), também apresentaram concentrações de amônia de 7,39 ppm e 0,16 ppm respectivamente.

Os pontos 7 e 12 que possuem cobertura de grama obtiveram teores de 0,00% de CH₄, em vista disto, o fato da alta concentração de amônia nestes dois pontos se deve à possível perda de amônia por evaporação do chorume presente no solo onde foi realizado o ensaio.

Segundo estudos de Bidone (2007), o controle das características dos lixiviados (chorume) dos aterros brasileiros que recebem resíduos de origem

doméstica têm mostrado que, para aterros operando a menos de cinco anos, a concentração de nitrogênio amoniacal variam entre 1.500 mg.L^{-1} e 3.000 mg.L^{-1} . Sendo que, o principal objetivo dos processos de tratamento do lixiviado é a redução das concentrações de matéria orgânica e de nitrogênio amoniacal, pois normalmente são esses os constituintes que se apresentam mais concentrados.

No ponto 7 é possível observar visualmente a concentração maior de chorume, esta é uma área da célula onde é observado um vazamento de chorume, principalmente nos dias mais chuvosos. Além do maior desenvolvimento da grama plantada no local, fator indicativo de maior presença de nitrogênio/amônia no solo.

Através de um ensaio físico-químico do lixiviado gerado no Aterro Sanitário de Toledo, por laboratório contratado pela Prefeitura Municipal, apresentou os seguintes resultados: pH de 8,22, e concentração de nitrogênio amoniacal de $668,92 \text{ mg.L}^{-1}$ de N-NH_4 . Este dado comprova o fato de que a amônia está se volatilizando em decorrência do pH alcalino do chorume.

A volatilização da amônia é baixa, quando o pH é menor que 7, e aumenta, à medida que o pH se eleva (REECE et al., 1979).

4.3 ETAPA 3 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO DO ATERRO SANITÁRIO DE TOLEDO

4.3.1 Variáveis do aterro utilizadas nas equações

Para a realização dos cálculos necessários até a obtenção do potencial de geração de metano, as equações utilizadas foram baseadas em várias características individuais do aterro sanitário de Toledo e do resíduo depositado.

4.3.1.1 Constante de reação (k)

O valor da constante de reação (k) pode ser calculado através da Quadro 5, retirada do IPCC (2006), (vide Anexo A). Essa constante varia conforme a zona climática do local do aterro em estudo. Os diferentes valores

para o cálculo do valor da constante (k), se baseiam nas características climáticas das 3 divisões mundiais: zona Boreal, zona Temperada; e zona Tropical.

O município de Toledo mais especificamente possui um clima subtropical úmido mesotérmico (Cfa), sendo assim, a região sul onde o município se localiza, enquadra-se no clima temperado superúmido tabelado. Em razão destas características o valor de k baseou-se nos seguintes dados:

Quadro 2 - Dados para o cálculo do valor da constante de reação (k)

TIPO DE RESÍDUO		VALOR PADRÃO DE k	Composição RS (%)
Degradação Lenta	Papel e tecido	0,06	9,13
	Madeira e palha	0,03	0 *
Degradação Moderada	Poda e capina	0,1	0 *
Degradação Rápida	Restos de alimento	0,185	68,63
Constante (k) no aterro de Toledo		0,17032	

Fonte: Adaptado de IPCC (2006)

* Não existem dados disponíveis das quantidades depositadas no aterro deste tipo de resíduo.

4.3.1.2 Carbono orgânico degradável (DOC)

O valor de COD (DOC do inglês, *Degradable Organic Carbon*) representa a fração orgânica presente nos resíduos depositados no seu local de destinação final, que são quimicamente assimiláveis pelos microorganismos decompositores.

Para obtenção do valor de DOC utilizou-se os dados padrões estabelecidos no Manual do IPCC (2006).

O valor de DOC envolve características como, nível de umidade do resíduo depositado, tipo de resíduo e porcentagem, além de classificação domiciliar, industrial, e/ou outros resíduos perigosos e de serviço de saúde.

Para Toledo, optou-se pela tabela de valores referentes aos resíduos de característica domiciliar, e os valores referentes ao tipo de resíduo úmido depositado. No Quadro 03 são apresentados os valores referentes aos cálculos do valor de DOC para Toledo. O Quadro completo pode ser observado em Anexo B.

Quadro 3 – Valor de DOC para Toledo

Tipo de Resíduo	Valor Padrão DOC	Composição RS (%)
Papel e papelão	0,4	9,13
Borracha	0,39	0***
Resto de Alimentos	0,15	68,63
Tecidos	0,24	0*
Madeira	0,43	0*
Construção Civil	0,04	0**
Resíduos de Banheiro	0,24	0*
Borracha e Couro	0,39	0***

Fonte: Adaptado de IPCC (2006)

* Não existem dados disponíveis das quantidades dispostas no aterro deste tipo de resíduo.

** Este tipo de resíduos não é disposto no aterro sanitário em estudo.

*** Este tipo de resíduo não está presente em quantidades significativas.

Portanto, DOC para Toledo = 0,139465

4.3.1.3 Fração de carbono orgânico degradável passível de ser decomposto anaerobicamente (DOCf)

O carbono existente nos resíduos sólidos pode ser recalcitrante ou degradar lentamente em condições anaeróbias. Para determinar esta fração de carbono orgânico degradável (DOCf) existem valores recomendados (IPCC, 2006).

Segundo Birgemer e Crutzen (1987), o valor de DOCf (do inglês, *Degradable Organic Carbon*) indica a fração de carbono no resíduo que é disponível para a decomposição bioquímica no aterro.

O valor de DOCf depende de muitos fatores, como a temperatura, a umidade, o pH, a composição dos resíduos, etc. Os valores nacionais de DOCf ou os valores de países similares podem ser utilizados, mas devem se basear em pesquisas bem elaboradas (IPCC, 2006).

O valor padrão estipulado para DOCf é de 0,5 para aterros considerados bem gerenciados (aterros sanitários) com decomposição em ambiente anaeróbio.

Portanto, DOCf para Toledo = 0,5

4.3.1.4 Tempo de retardo (Δ)

Na grande maioria dos locais de destinação de resíduos sólidos, a sua frequência de deposição é realizada de forma continuada ao decorrer do ano, geralmente em dias já programados. No decorrer deste processo, uma cadeia de reações são necessárias, até que a produção de CH_4 se inicie. Portanto, podemos afirmar que o biogás proveniente da decomposição anaeróbia não começa a ser gerado logo após a sua deposição.

Segundo o modelo do IPCC (2006), é possível que cada aterro tenha um tempo específico de retardo, que pode variar entre 0 e 6 meses. Caso não existam dados suficientemente seguros para essa estimativa, o valor padrão sugerido é de 6 meses.

Portanto, Δ para Toledo = 0,5 anos

4.3.1.5 Fração de metano do gás gerado no aterro (F)

O método do IPCC (2006) sugere a utilização de um valor padrão de 0,5 (50%) que representa a média de composição do CH_4 no biogás gerado em aterros sanitários.

No entanto, foram realizadas análises do biogás produzido, com o uso de 3 metodologias diferentes. Os valores encontrados são descritos na Tabela 18

Tabela 18 – Valores de metano encontrados no biogás do aterro

METODOLOGIA	Ponto de Coleta	METANO (%)
Cromatografia gasosa	Queimador	64,09
	Gerador	65,00
Kit Biogás	Gerador	60,00
	Gerador	50,00
	Gerador	50,00
	Gerador	50,00
Analizador Instantâneo	Queimador	58,00
Analizador Instantâneo	Gerador	43,00
MÉDIA		55,72
DESVIO PADRÃO		8,23

Portanto, F para Toledo = 0,5572

4.3.1.6 Fator de correção de metano (MCF)

O fator de correção de metano é estipulado pelo Quadro 3.1 do IPCC (2006), apresentado em Anexo C. Esse fator é classificado pelo nível de gestão do aterro sanitário em questão. Quanto melhor a gestão do mesmo, maior é o valor de MCF (do inglês, *Methane Correction Factor*).

As classificações podem ser observadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Valores de MCF para cada tipo de local de deposição de resíduos

Tipo de local de deposição	MCF padrão
Aterro bem gestionado (decomposição anaeróbia)	1,0
Aterro gestionado (decomposição semi-anaeróbia)	0,5
Não gestionado (>5m de resíduos e/ou próximo ao lençol freático)	0,8
Não gestionado (<5m de resíduos)	0,4
Sem categoria	0,6

Fonte: Adaptado de IPCC (2000); Matsufuji et al. (1996)

Pelas características do aterro sanitário de Toledo, é possível classificá-lo como um Aterro bem gestionado, com um ambiente de decomposição de resíduos anaeróbio.

Portanto, MCF para Toledo = 1,0

4.3.2 Utilização do método FOD para estimativa de geração de metano

O método FOD (do inglês, *First Order Decay*), parte da hipótese de que o componente orgânico degradável (carbono orgânico degradável, “DOC”) dos resíduos se decompõe lentamente ao decorrer de algumas décadas, durante as quais se formam o CH₄ e o CO₂. Caso as condições permaneçam constantes, o índice de produção de CH₄ depende unicamente da quantidade de carbono restante nos resíduos

Segundo o IPCC (2006), o guia atual publicado, não recomenda a utilização do método de balanço de massa, utilizado nos antigos métodos do IPCC (1996) e IPCC (2000), pois ele produz resultados que são comparáveis aos do método de decomposição de primeira ordem, (FOD, do inglês: *First Order Decay*) que oferece estimativas mais precisas das emissões anuais. Em razão disto, as estimativas do trabalho foram baseadas nas equações do método publicado em 2006.

Conclui-se assim, que as emissões de CH₄ geradas pelos resíduos depositados no aterro são mais altas durante os primeiros anos seguidos, após o momento da sua deposição e que, logo, elas decaem a medida que o carbono degradável dos resíduos é consumido pelas bactérias responsáveis pela decomposição (IPCC, 2006).

A transformação da matéria orgânica disposta nos aterros em CH₄ e CO₂ acontece através de uma cadeia de reações principais e paralelas. Um modelo completo que envolva todos os pequenos fatores envolvidos nessas reações, tende a ser muito complexo, além de variar suas características em cada tipo de aterro ou lixão. Contudo, os dados observados em laboratório e à campo em relação a geração de CH₄, sugerem que o processo global de decomposição aproxima-se de uma cinética de primeira ordem (HOEKS, 1983), e esta teoria tem sido amplamente aceita (IPCC, 2006).

4.3.2.1 Cálculo do DDOCm

Para estimar o potencial de geração de metano, é importante saber além da quantidade de carbono orgânico degradável (DOC), quanto deste carbono foi consumido pelos microorganismos anaeróbios. Por isso, existe a Equação 3.2 do Método do IPCC (2006), que envolve as variáveis passíveis de levantamento, para a estimativa da quantidade de DDOCm (do inglês, *Decomposable Degradable Organic Carbon*).

Sabendo que:

W = massa de resíduos depositados no ano (T) (dados disponíveis na Tabela 8)

$DOC = 0,139465$

$DOC_f = 0,5$

$MCF = 1,0$

Portanto, DDOCm foi calculado individualmente para cada ano de deposição de resíduos no aterro.

4.3.2.2 Cálculo do carbono orgânico degradável acumulado em cada ano (DDOCma)

Através da Equação 3A1.24 do Método do IPCC (2006) foi possível estimar a quantidade de DDOCm degradado a cada ano da vida útil do aterro sanitário, agora nomeado de DDOCma ($i + 1$) para assim, obter a quantidade de biogás gerado a cada ano.

Sabendo que:

Constante **a** = 0,84339

Constante **b** = 0,01848

Constante **c** = 0,97930

As constantes são relacionadas na equação com as quantidades de carbono depositadas no aterro em um dado ano i [DDOCma (i)], com o

depósito de carbono do ano anterior [DDOCmd (i-1)] , e com a quantidade de DOC que se deposita durante o ano [DDOCmd (i)].

Portanto, os resultados dos cálculos prevê a quantidade de carbono orgânico degradado pela ação dos microorganismos anaeróbios, em cada ano da vida útil e após o fechamento do aterro.

4.3.2.3 Cálculo da quantidade de metano gerado acumulado no aterro sanitário a cada ano [CH₄ gen (i)]

Sabendo a quantidade total de carbono orgânico degradado pelos processos anaeróbios de decomposição dos resíduos dispostos a cada ano no aterro sanitário, é possível determinar a quantidade estimada de metano produzido no biogás gerado pela decomposição através da equação 3A1.25 do IPCC (2006).

Sabendo que:

$$q = MCF \times F \times 16/12$$

$$MFC = 1,0$$

$$F = 55,72$$

$$\text{Então, } q = 0,743$$

$$\text{Constante } a' = 0,1566$$

$$\text{Constante } b' = 0,0185$$

$$\text{Constante } c' = 0,0207$$

As constantes da equação são relacionadas com as quantidades de carbono depositadas no aterro em um dado ano i [DDOCma (i)], subtraindo a quantidade de carbono do ano anterior [DDOCmd (i-1)] , somado a quantidade de DOC que se deposita durante o ano calculado [DDOCmd (i)]. Obtendo assim, o metano produzido durante cada ano da vida útil do aterro, e após o seu fechamento. Os dados referentes a equação estão na Tabela 19 em Anexo

E e na Tabela 20 em Anexo F. Elas representam a utilização dos dados referentes as duas curvas de estimativa de produção de resíduos utilizadas apresentadas na Tabela 8.

No Gráfico 13 é possível observar a produção total de biogás durante 37 anos de produção ativa.

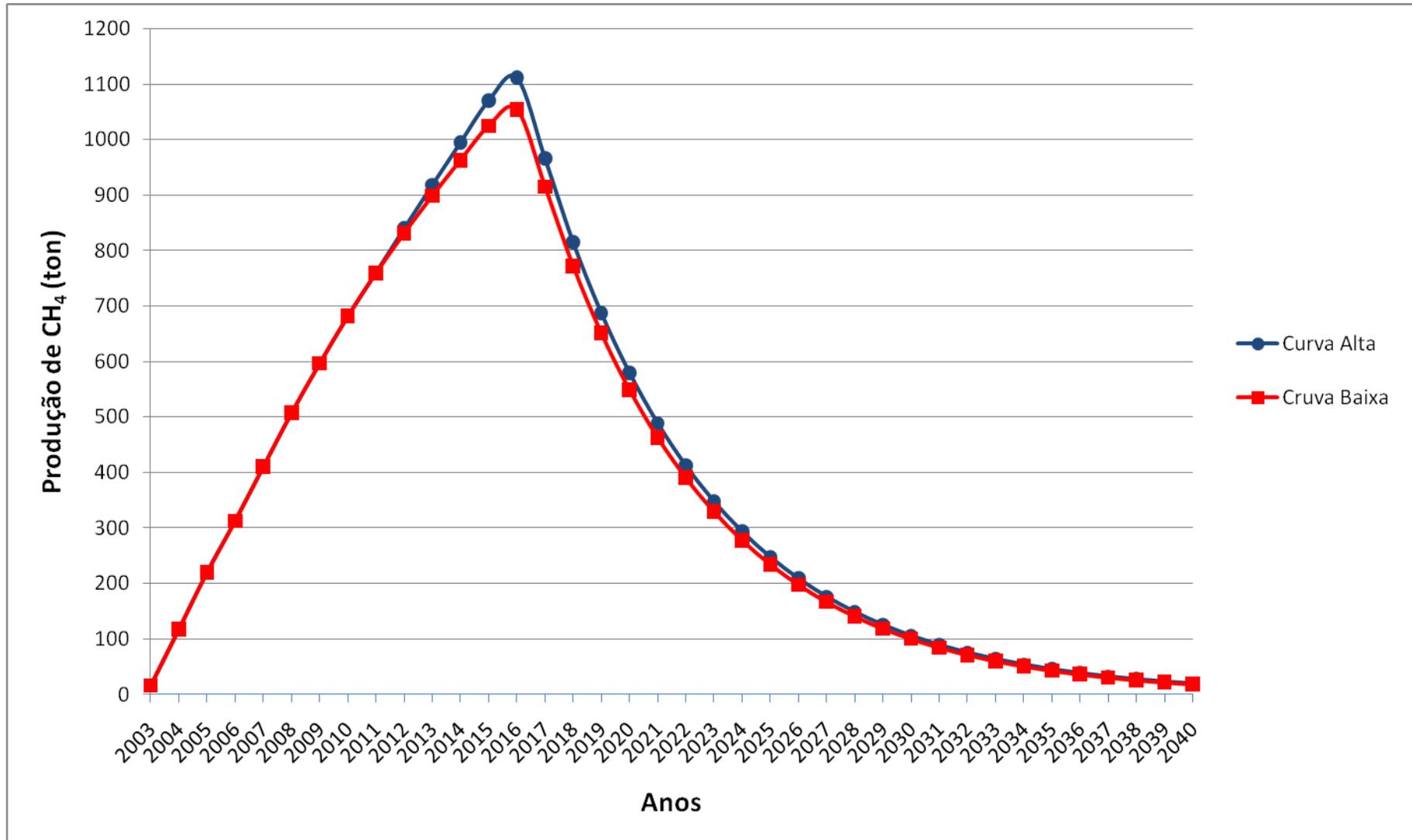


Gráfico 13 – Estimativas de produção de metano (CH₄) durante e após a vida útil do aterro sanitário

O Gráfico representa um crescimento equivalente de metano produzido ano a ano. O pico máximo de produção ocorrerá no ano de 2016, pois o fechamento previsível do aterro ocorrerá em 2015, sendo que os resíduos depositados no ano, produzirão suas maiores taxas de metano 1 ano após a sua deposição.

A queda da produção ocorre no ano de 2017, pelo fato de que em 2016, não são mais depositados resíduos no aterro sanitário, sendo assim, sem entrada de material orgânico no processo de decomposição, a taxa de metano só tende a cair, chegando próxima de 0 (zero) em 2040.

4.4 ETAPA 4 - ANÁLISE TÉCNICA DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA IMPLANTADOS NO ATERRO SANITARIO DE TOLEDO-PR

4.4.1 Sistema de captação do biogás e chorume

No momento, o Aterro sanitário capta o biogás produzido de 10 dutos localizados na célula 1 do aterro, que se encontra concluída e gramada. Cada duto de biogás possui aproximadamente 18 metros de altura, os quais são construídos conforme o andamento da célula. Eles são constituídos de uma tubulação vertical de concreto perfurado de 30 cm de diâmetro, envolto por uma estrutura de mais 70 cm de diâmetro de pedra basáltica, envolto por uma tela galvanizada para manter a estrutura.

Para o início da construção da célula, a proteção do solo é realizada com a cobertura de toda área de deposição com geomembrana de PEAD, sobreposta ao solo previamente compactado. Após uma camada de solo, são construídos os sistemas de captação do chorume e do biogás (Figura 25 e 26).



Figura 25 - Cobertura da área com a geomembrana protetora



Figura 26 – Sistema de captação de chorume e biogás

O sistema de captação do chorume é composto de um dreno principal e drenos secundários, formando sistema de espinha de peixe. Os drenos principais são constituídos de tubulação de Polietileno reticulado de 170 mm, envolto com uma manta geotêxtil de 250 g.m² de densidade. Os drenos

secundários são formados de tubulação de polietileno reticulado de 100 mm, também envoltos com manta geotêxtil de 250 g.m² de densidade, a fim de filtrar o material particulado, evitando entupimento das tubulação e acúmulo de material nas lagoas de tratamento de chorume.

Todo o lixiviado produzido nas células do aterro é canalizado até o sistema de tratamento de percolados. O sistema é constituído de 3 lagoas de tratamento, seguidas da seguinte ordem:

1ª - Lagoa anaeróbia – as lagoas anaeróbias são projetadas sempre que possível, em associação com lagoas facultativas ou aeradas mecanicamente. Têm a finalidade de oxidar compostos orgânicos complexos antes do tratamento através desses tipos de lagoas. As lagoas anaeróbias possuem profundidades maiores do que outras lagoas, com variação de 2,00 a 5,00 metros. A matéria orgânica depositada na parte inferior das lagoas passa pelas seguintes fases: liquefação e gasificação. A grande vantagem das lagoas anaeróbias é poder oxidar altas cargas orgânicas com áreas bastante reduzidas. A principal desvantagem é o odor produzido principalmente pela liberação de gás sulfídrico (MENDONÇA, 1990).

2ª – Lagoa facultativa - as lagoas facultativas têm profundidade que variam de 1,0 a 2,5 metros e áreas relativamente grandes. Funcionam através da ação de algas e bactérias sob a influência da luz solar (fotossíntese). A matéria orgânica contida nos despejos é estabilizada, parte transformando-se em matéria mais estável na forma de células de algas e parte transformando-se em produtos inorgânicos finais que saem com o efluente. Essas lagoas são chamadas de facultativa devido às condições aeróbias mantidas na superfície, liberando oxigênio e às condições anaeróbias mantidas na parte inferior onde a matéria orgânica é sedimentada. A redução de DBO₅ das lagoas facultativas é da ordem de 70 a 90%. (MENDONÇA, 1990).

3ª – Lagoa de maturação - as lagoas de maturação tem a principal finalidade a destruição de organismos patogênicos em particular coliformes termoresistentes contidos nos despejos. Diversos fatores contribuem para tal, como temperatura, insolação, pH, escassez de alimento, organismos predadores, competição, compostos tóxicos, etc. As lagoas de maturação são mais rasas, comparadas aos demais tipos de lagoas. Dentre os mecanismos associados a profundidade da lagoa, pode-se citar: a radiação solar (radiação

ultra-violeta), elevado pH ($\text{pH} > 8,5$), elevada concentração de OD (favorecendo uma comunidade aeróbia, mais eficiente na competição por alimento e na eliminação de patogênicos). São construídas sempre, depois do tratamento completo em uma lagoa facultativa, e com adequado dimensionamento pode-se conseguir remoções de coliformes maiores que 99,99% (MENDONÇA, 1990).

4.4.2 Funcionamento do sistema de moto bomba de recirculação do chorume

Após o tratamento do chorume nas lagoas, o mesmo é recirculado novamente para a camada superficial de célula 1 concluída.

O procedimento é realizado a fim de se acelerar a decomposição dos resíduos na célula, e diminuir a quantidade de lixiviado gerado nas lagoas e o transbordamento das mesmas, principalmente em períodos de pluviosidade alta.

O sistema é composto de uma moto bomba, alimentada com biogás, com motor 1.8, com potência mínima de 80 CV, número e disposição dos cilindros: 4 em linha, Ciclo Otto 4 tempos. Bomba com altura máxima 63 mca, vazão máxima de $52 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

O acionamento inicial da moto bomba é realizado com gás de cozinha, e posteriormente, ela é alimentada com o biogás canalizado de 3 à 4 dutos, dependendo do potencial de produção. A frequência de uso da moto bomba depende da quantidade de chorume produzido e armazenado nas lagoas de tratamento.

O sistema de recirculação do chorume é ilustrado na Figura 27.



Figura 27 – Moto bomba de recirculação de chorume alimentada a biogás

De acordo com Mehta et al. (2002), os dados mostram que a prática de recirculação de chorume aumenta a produção de metano e conseqüentemente a decomposição dos resíduos sólidos depositados. A análise realizada no trabalho mostrou que houve aumento significativo mais de CH_4 em ambas as células testadas. O resíduo na maior célula não foi uniformemente umedecido, o que contribuiu para que sua decomposição não fosse completa. Sendo assim, acredita-se que a concepção do sistema de recirculação de lixiviados, é similar ao funcionamento de um biorreator agindo nas células do aterro sanitário.

4.4.3 Sistema de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica

A finalização dos 10 dutos de biogás foi realizada com uma estrutura de cimento para vedação do biogás, e acima uma tubulação de ferro, com válvula para queima do biogás acionado com chama. O biogás inicialmente era queimado, para evitar a liberação de metano na atmosfera.

Após a instalação do sistema de aproveitamento, todos os queimadores cessaram. Para isto, foi instalado em cada *flare* uma válvula ligada a uma tubulação lateral de PEAD (figura 28).



Figura 28 – Canalização do biogás do *flare* para o sistema de aproveitamento

Para o transporte do biogás até o motor gerador, foi instalado uma tubulação de PVC, que recebe o biogás de todos os dutos da célula, com diâmetro de 100 mm com comprimento com 20 metros iniciais, sendo que o restante da tubulação é de 60 mm de diâmetro, totalizando aproximadamente 600 metros de tubulação até o motor de combustão.

O sistema gerador faz a captação do biogás com o auxílio de um soprador com potência de 1,0 CV, vazão de $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, e pressão positiva de 1.600 mmca (Figura 29).



Figura 29 – Soprador do sistema

Após a passagem pelo soprador, o biogás é canalizado à um filtro composto de limalha de ferro (Figura 30), com o objetivo de remover o gás

sulfídrico presente no biogás captado, evitando possíveis corrosões no moto gerador por conta do sulfeto, aumentando sua vida útil.



Figura 30 – Filtro para remoção do gás sulfídrico

O sistema não é provido de filtro para remoção de condensado, apesar da grande quantidade produzida nas tubulações externas de transporte do biogás. O operador do sistema faz a remoção do condensado através da reversão do soprador, empurrando a água presente na tubulação, de volta para o aterro, liberando assim a passagem e chegada do biogás até o motor.

Para um melhor aproveitamento do biogás gerado, e praticidade de funcionamento do sistema, seria necessária a instalação de um desumificador, junto ao filtro de limalha de ferro, antes da entrada do motor.

De acordo com ICLEI (2009), o gás extraído do aterro é um gás 100% saturado, o que em outras palavras significa que este gás encontra-se no seu limite para condensação, no caso específico do biogás, a cada 1 m³ contém aproximadamente de 60 a 100 ml de condensado. Na saída dos drenos do biogás a temperatura do gás estará entre 40°C e 50°C. O resfriamento que ocorre ao longo da tubulação instalada sobre o aterro gera um condensado em grande quantidade (por exemplo, a redução da temperatura de 50° para 25°C gera cerca de 60 g de condensado por m³).

O grupo gerador de energia elétrica movida a biogás é composto por um motor convertido com 6 cilindros em linha, ciclo de 4 tempos, marca Mercedes Benz, modelo OM 352, com potência de 50 kva, grau de frequência 60Hz, rotação 1.800 RPM (Figura 31).



Figura 31 – Moto gerador movido à biogás

Para a partida inicial do motor é utilizado o gás de cozinha, posteriormente o motor é alimentado exclusivamente com o biogás do aterro.

Após o processo de queima do biogás, a energia gerada em moto-gerador é transformada em energia elétrica para uma chave reversora trifásica de 250 A., montada em painel com voltímetro, frequencímetro e amperímetro. Caso ocorra falta de energia provinda do moto gerador, a chave é revertida para a utilização da energia elétrica proveniente da companhia de distribuição.

No sistema de alimentação de energia elétrica alimentada a biogás, estão ligados os seguintes itens:

- Tomadas e iluminação da Central de Reciclagem, banheiros e escritório administrativo do aterro sanitário. No total destes itens são contemplados aproximadamente 2,5 kW de iluminação, além de outros eletrônicos ligados nas tomadas, que somam junto a iluminação, um total consumo de aproximadamente 4,5 kW.

- Esteiras de triagem do resíduo reciclável na Central de Triagem. São duas esteiras que trabalham durante o dia todo, e representam um consumo de 3 kW de energia no total (Figura 32).



Figura 32 – Esteiras de triagem alimentadas pelo aproveitamento energético do biogás

- Prensas para compactação dos resíduos triados, e obtenção dos fardos (Figura 33), que são posteriormente vendidos para indústria de reciclagem. São 3 prensas utilizadas no total, uma prensa menor com potencia de 3,7 kW, uma prensa maior e mais antiga com 7,5 kW, e a terceira prensa, mais nova, com 3 kW de potencia, totalizando 14,2 kW.

Sendo assim, todo o sistema consome em média 22 kW. Considerando que o sistema permanece em funcionamento durante 7 horas diárias, seu gasto energético diário é 154 kWh em média.



Figura 33 – Prensa de compactação dos resíduos, e fardos depois de prensados

Através de um painel central de distribuição, é possível controlar o acionamento de todos os itens receptores da energia elétrica provinda do motor gerador à biogás.

O sistema de geração de energia consegue atualmente suprir as necessidades energéticas do aterro, porém, em períodos de seca (cuja produção de biogás diminui), ou em dias em que a Central de Triagem de Recicláveis aumenta sua produção e velocidade das esteiras, e todas as prensas funcionam ao mesmo tempo, ocorrem quedas de energia, ou falta da mesma para o funcionamento de toda Central em horários de pico. Nestes casos, a energia da companhia de distribuição é utilizada.

Sendo assim, acredita-se que em breve, com a conclusão da 2ª célula do aterro, e a ligação das demais tubulações ao sistema gerador, estas necessidades serão totalmente supridas, além de uma provável sobra de energia elétrica gerada pelo sistema de aproveitamento.

4.4.4 Medição de vazão do sistema de captação do biogás no grupo gerador de energia

A medição da vazão é uma informação essencial para avaliação de um sistema. Ela foi realizada a fim de se obter a quantidade de biogás gerada pelos 10 dutos de extração captados pelo grupo moto gerador.

Inicialmente a vazão foi medida durante aproximadamente 01 hora de funcionamento do gerador, no dia 06 de dezembro de 2012, das 18:32 às 19:23 horas. A média de vazão de biogás calculada nesta medição foi de $9,28 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (DP $\pm 3,5$)

A variação da vazão registrada pode ser observada no Gráfico 14.

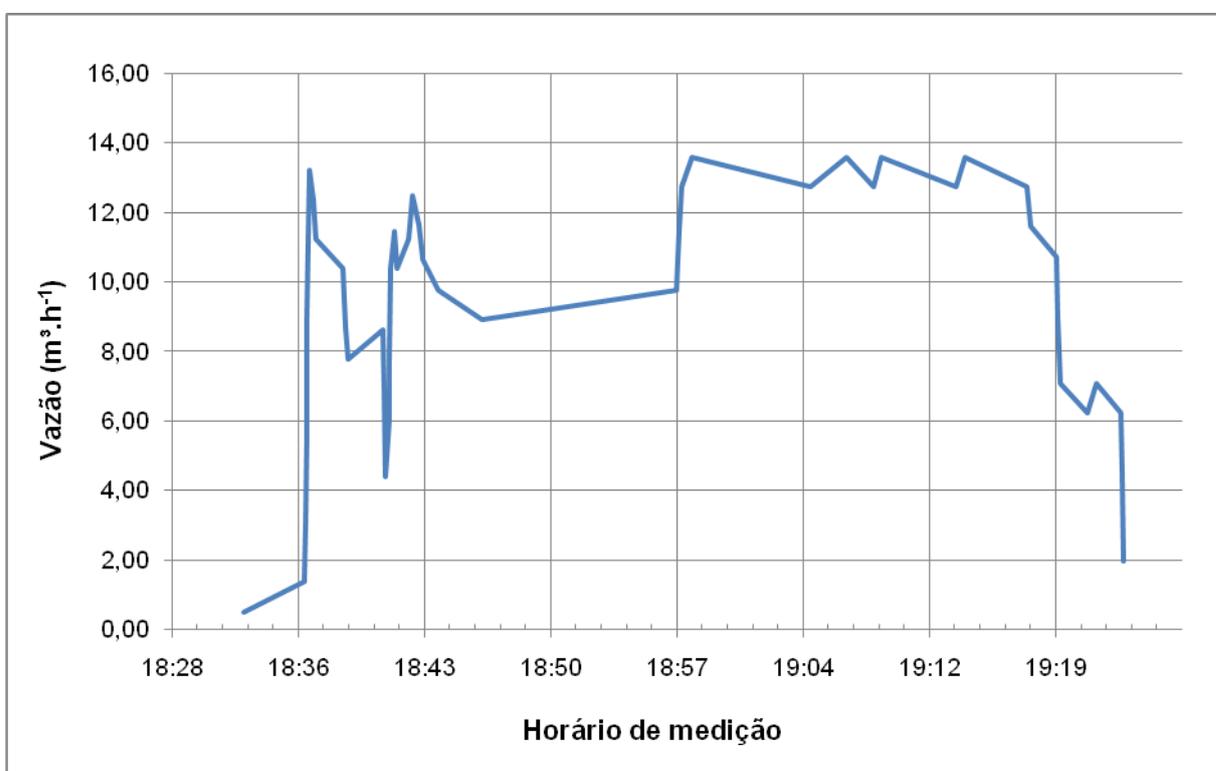


Gráfico 14 – Comportamento da vazão durante 01 hora de funcionamento do moto gerador

Para obtenção de dados mais próximos ao funcionamento real do moto gerador, foi realizada a medição durante 1 dia de trabalho do sistema. A vazão foi avaliada no dia 07 de dezembro de 2012, das 08:26 às 11:32 horas, com intervalo de almoço dos funcionários de 01:30 horas, e retorno das 13:28 às 16:25 horas.

A vazão média calculada do biogás captado neste dia foi de $17,43 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (DP $\pm 5,00$).

A variação da vazão registrada pode ser observada no Gráfico 15.

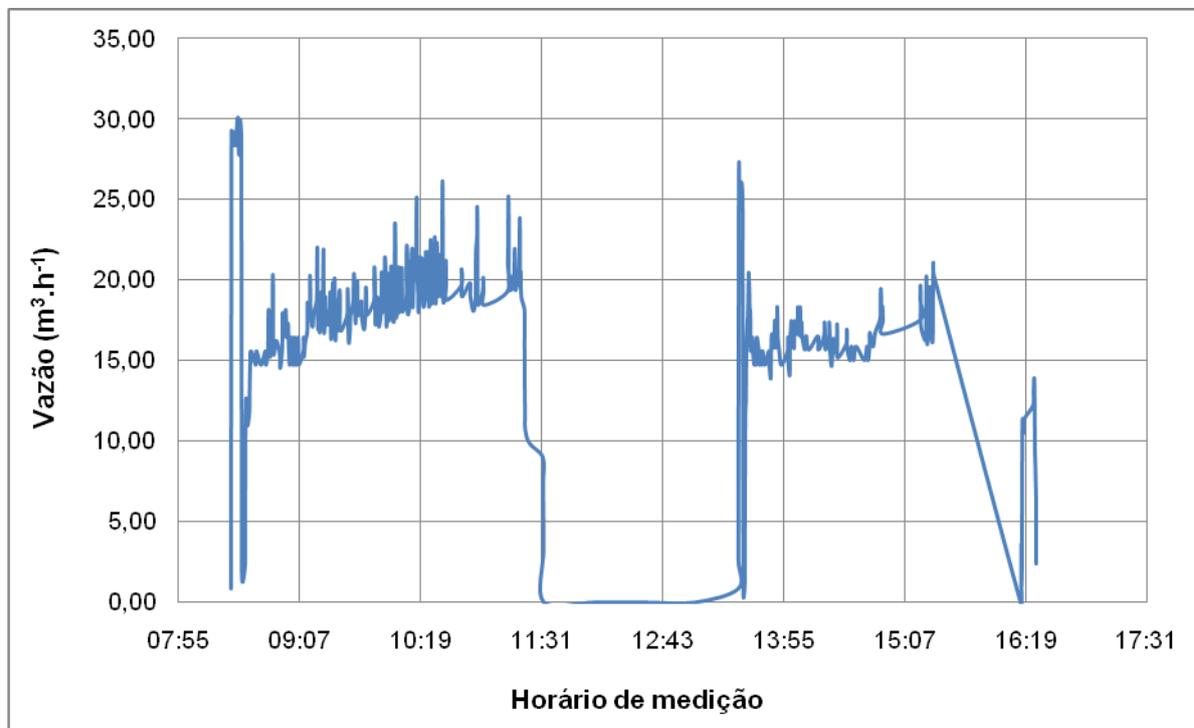


Gráfico 15 – Comportamento da vazão do biogás durante 01 dia de funcionamento do moto gerador

Avaliando o sistema de uma forma global, nota-se que são necessários cerca de 20 kW de potencia para o funcionamento de todo sistema de alimentação. Sabendo que a vazão de biogás é de $17,43 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e o seu funcionamento dura cerca de 7 horas diárias, temos:

- $122,01 \text{ m}^3$ de biogás utilizados por dia na geração de energia elétrica;
- $122,01 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ de biogás com concentração média de metano de 55,72%
- Vazão diária de metano (24h) = $233,09 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
- Vazão diária de metano (7h de funcionamento) = $67,98 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
- Vazão horária de metano (7h de funcionamento) = $9,71 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Sabendo que 1 m^3 de metano gera aproximadamente 9,43 kWh de energia elétrica, então:

São gerados pelo aproveitamento do biogás produzido no aterro, um valor de aproximadamente 641,05 kWh, considerando as 7 horas de funcionamento diário do sistema gerador.

De acordo com CCE (2000) *apud* Souza et al. (2004) a eficiência de conversão do biogás em energia elétrica com grupos geradores (motores ciclo Otto) é de aproximadamente 25%.

Sabendo que o conjunto gerador utilizado consiste de um motor do tipo ciclo Otto, o total da energia calculada através das características do sistema e do biogás, de 641,05 kWh, inserindo o fator de eficiência do motor utilizado para a conversão, o total energético produzido pelo sistema gerador via biogás do Aterro Sanitário de Toledo é de:

ENERGIA GERADA = 160,26 kWh.

Sendo assim, são muito próximos os valores de consumo (154 kWh) e de geração de energia elétrica (160,26 kWh) do Aterro Sanitário, justificando assim os momentos em que ocorre a carência de energia do sistema, devido as oscilações tanto da produção de metano, quanto do consumo elétrico do sistema. Contudo, é possível afirmar que pratica e teoricamente o biogás produzido no Aterro Sanitário de Toledo, convertido em energia elétrica, supre suas necessidades de consumo elétrico.

Caso fosse implantado no local um sistema de geração distribuída, com funcionamento de 12 horas diárias, considerando-se as 7 horas diárias de uso da energia pela Central de Triagem, com 5 horas de paralisação do sistema, através de um cálculo de simulação, o Aterro Sanitário produziria aproximadamente 32,94 MWh de energia ao mês, considerando a captação atual de biogás.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A composição gravimétrica do resíduo sólido urbano gerado pelo município de Toledo-Pr possui concentração média de 68,63% de matéria orgânica, e 9,13% de papel, totalizando 77,76% de material orgânico, passível de decomposição anaeróbia e formação de biogás.

A geração de resíduos sólidos urbanos no município representou um crescimento estimado de 42,30%(mínimo) à 60,46%(máximo) no período de 2010 à 2020. Acompanhando o crescimento populacional estimado em 19,66% no mesmo período.

A composição média de metano no biogás produzido no aterro sanitário de Toledo é de 55,72% (DP±8,23), condizente com as características do biogás gerado através da decomposição de resíduos sólidos urbanos.

Os dados obtidos a respeito da emissão de biogás pela camada de cobertura do aterro sanitário apresentaram valores de 11,52% de CH₄ (DP±0,53) nos pontos sem cobertura de grama, e de 0,42% de CH₄ (DP±0,53) nos pontos com cobertura de grama. Demonstrando que a cobertura das células com vegetação gramínea auxilia na oxidação do metano, e evita que ele seja emitido para a atmosfera, representando assim, uma prática a ser seguida no decorrer do encerramento das próximas células, e em outros aterros sanitários.

A estimativa do potencial de produção de metano do aterro sanitário de Toledo apresentou números máximos de 1.111,91 toneladas de metano produzidas no ano de 2016, representando deste modo, uma fonte de energia renovável e disponível para ser aproveitada, evitando assim a sua emissão e contribuição no processo de aquecimento global.

A vazão do biogás medida no sistema moto gerador de energia elétrica foi de 17,43 m³.h⁻¹. Através deste valor, sua concentração média de metano, e eficiência do sistema em funcionamento, são gerados em média 160,26 kWh de energia elétrica durante o período de 7 horas de funcionamento do sistema no aterro sanitário. Estes valores representam um aproveitamento aproximado de 16.315,2 m³CH₄.ano⁻¹ não liberados para atmosfera.

Espera-se que o funcionamento eficiente da central de reciclagem no aterro, que evita a disposição de materiais não orgânicos, auxilie na otimização

da degradação dos resíduos sólidos orgânicos, e geração de metano no aterro sanitário.

Os sistemas de aproveitamento de biogás para geração de energia podem ser uma solução ambiental e energética adequada para aterros sanitários. Esta mudança de paradigma quanto à geração de energia a partir de resíduos sólidos deve ser analisada na implantação de novos aterros sanitários e na readequação de lixões e aterros controlados. Também deve ser considerada a possibilidade de inserção de sistemas de geração distribuída, principalmente em aterros sanitários de médio e grande porte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007**. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**. Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004b.

AMBIENGE – Engenharia Sanitária e Ambiental Ltda. **Projeto Executivo Aterro Sanitário do Município de Toledo-PR**. Caderno 1 – Relatório. Curitiba, 2001.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2006. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/2363213/Panorama-dos-Residuos-Solidos-no-Brasil-2006-ABRELPE-2007>> Acesso em: 09 jun. 2012.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2011. Disponível em: http://www.abrelpe.org.br/imagens_intranet/files/Panorama%20dos%20Res%3ADduos%20S%C3%B3lidos%20no%20Brasil%202011.pdf 20
Acesso em: 26 jul. 2012.

ABREU, R. L. **Mapa do Estado do Paraná**. jun 2006. Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parana_Municip_Toledo.svg> Acesso em: 01 jul. 2012.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 1. ed. Brasília, 2002.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, 2008.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz Energética do Brasil: Usinas do tipo biomassa em operação**. 2012 Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp?tipo=5&ger=Combustivel&principal=Biomassa>> Acesso em 14 de jul. 2012.

BAHÉ, J. M. C. F.; VERÓL, A. P.; ALVES, L. V.; CANTANHEDE, A.; FIGUEIREDO, I. C. Estudo do desempenho de evaporador unitário como opção de tratamento de lixiviados produzidos em aterros sanitários do Rio de Janeiro. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 24. **Anais...**Belo Horizonte, 2007.

BARLAZ, M. A. et al. Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 18, p. 4891-4899, 2004.

BIDONE, R. F. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por um sistema composto por filtros anaeróbios seguidos de banhados construídos: estudo de caso – central de resíduos do recreio, em Minhas do Leão – RS**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2007.

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

BIRGEMER, H. G.; CRUTZEN, P. J. The Production of Methane from Solid Wastes. **Journal of Geophysical Research**, Washington, D.C., v. 92, n. D2, p.2181-2187, 1987.

BOGNER, J. AND MATTHEWS, E. Global methane emissions from landfills: New methodology and annual estimates 1980 – 1996. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, n. 2.

BONA, F. S. de.; RUPPERT FILHO, E. As microturbinas e a geração distribuída. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5. **Anais...** Campinas, 2004.

BRASIL. **Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em: 02 de jul. 2012.

BRITO FILHO, L. F., **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

CASTANÓN, N. J. B. **Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais**. Material do Curso: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização, Universidade de São Paulo, São Paulo, dez. 2002.

CASTILHOS JR, A. B.; ZANTA, V. M.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES - RIMA, 2003.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná, 2000. CD-ROM.

CCE - Centro para Conservação de Energia. **Guia Técnico do Biogás**. Ed. JE92 Projectos de Marketing Ltda, Algés, Junho, 2000.

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENERBIOG**. Relatório Técnico Final. São Paulo, 2005.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Câmara ambiental do setor de resíduos: caracterização e classificação de resíduos**. São Paulo, 2010.

COELHO, S. T.; VELÁSQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6. **Anais...** Rio de Janeiro: PIPGE, 2006, 5p.

COELHO, S. T.; COSTA, D. F.; MARTINS, O. S.; VELÁSQUEZ, S. M. S. G. **Sewer Biogas Conversion into Electricity**. In: Rio 5- World Climate and Energy Event, Rio de Janeiro, 2005 Book of Proceedings - Renewables for a sustainable Supply. Rio de Janeiro: Imprinta Express Ltda, 2005. p. 319-324.

CONTADOR, Cláudio R. **Projetos Sociais: Avaliação e Prática**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

CHRISTENSEN, T. H.; KJELDSEN, P.; LINDHART, B. **Landfilling of waste: biogas**. London: E & FN Spon, 1992.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. 2003. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2012**: ano base 2011. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro: EPE, jun 2012.

ESMAP - Energy Sector Management Assistance Programme. **The world bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean**. The World Bank. Waterloo, Ontario, 2004

FELIX, E. P.; CARDOSO, A. A. Amônia (NH³) atmosférica: Fontes, Transformação, sorvedouros e Métodos de Análise. **Química Nova**. v. 27, n. 1, São Paulo, 2004.

FERNANDES, A. **Utilização da farinha de casca de batata inglesa (Solanum tuberosum L.) na elaboração de pão integral**. 2006. 127f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

FERNANDES, J. G. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2009.

FUNTEC - Fundação para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Toledo. **Recuperação Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Toledo**. Toledo: Editora Grafo-Set, 1992.

FURTADO, M. C. **Avaliação das Oportunidades de Comercialização de Novas Fontes de Energias Renováveis no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

GARCILASSO, V. P.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Proveniente de Aterro Sanitário - Estudo de Caso In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA,13. **Anais ...**, Rio de Janeiro, 2010.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVAO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6. **Anais...** Campinas, 2006.

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

GOOGLE MAPS. **Mapa de localização do Aterro Sanitário do Município de Toledo – PR**. Disponível em: <<http://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR&tab=wl>> Acesso em 02 jun. 2012.

GUEDES, V. P. **Estudo do Fluxo de Gases Através do Solo de Cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos**. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

HOEKS, J. Significance of biogas reduction in waste tips, *Waste management and research*, 1, pp. 323-325

HOORNWEG, D. “What a waste”: solid waste management in Denmark. **Waste Management**, v. 23. n. 1-2. p. 65-70, 2000.

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos: Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. 15. ed. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010a**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?>> Acesso em: 12 mai. 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/pnsb.pdf>> Acesso em: 28 jul. 2012

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010b. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf> Acesso em: 12 dez. 2012

ICLEI. **Manual para aproveitamento do biogás**: volume 1 - Aterros Sanitários. Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

IGNACIO, E. **Fontes Alternativas de Energia**. Núcleo José Reis de divulgação científica – ECA/USP. ano 7. n. 39. São Paulo, 2007.

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Caderno Estatístico**: Município de Toledo. jun 2012.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 3: Reference Manual. Chapter 6: Waste. 1996.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**. IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan, 2000.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 5: Waste. Chapter 2: Waste Generation, Composition and Management Data. 2006.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 5: Waste. Chapter 3: Solid Waste Disposal. 2006.

JUNIOR, N. C.; JUNIOR, E. G.; MACELINO, M. A.; ASSAD, M. M. N. Análise Técnica e Econômica no Aproveitamento Energético do Biogás de Aterros Sanitários Estudo de Caso do Aterro Sanitário Bandeirantes. **Sinergia**. v. 13, n. 3, p. 219-228, set./dez. 2012.

KORN, M.; ACEVEDO, M. S. F.; BORGES, S. S.; LIMA, J. L. F. Production of Chloride and Hypochlorite for Analytical Purposes by Sonochemical Degradation of Organochlorines. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. v. 16, n. 5, p. 988-994, 2005.

LE MONDE DIPLOMATIQUE BRASIL. **Alternativas ao aquecimento global**. ed. 1. São Paulo: Instituto Paulo Freire, 2007.

LIBÂNIO, Paulo Augusto Cunha. **Avaliação da eficiência e aplicabilidade de um sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos urbanos e de chorume**. 2002. 156f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

MACIEL F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MATSUFUJI, Y.; KOBAYASHI, H.; TANAKA, A.; ANDO, S.; KAWABATA, T.; HANASHIMA, M. Generation of greenhouse gas effect gases by different landfill types and methane gas control. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND EXHIBITION, 7., 1996. **Anais...** n. 1, p. 253-254.

MEHTA, R.; ASCE, M. A. B. M.; YAZDANI, R.; AUGENSTEIN, D.; BRYARS, M.; SINDERSON, L. Refuse Decomposition in the presence and absence of leachate recirculation. **Journal of Environmental Engineering**. v. 128, n. 3, p. 228-236. Março, 2002.

MEINERZ, C. C.; KLEIN, J. C.; DIMBARRE, S.; MONDARDO, D.; BELLON, P. P.; SANTOS, L. B.; SCHERER, F. A. Estudo de caso para recuperação paisagística do Aterro Sanitário de Toledo, PR. IN: Internacional Workshop - Advances in Cleaner Production, 2. **Anais...** São Paulo, 2009

MENDONÇA, S. R. **Lagoas de Estabilização e Aeradas Mecanicamente: novos conceitos**. Sindicato Nacional dos Editores de Livros: João Pessoa, 1990.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Versão preliminar para consulta pública. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília, 2011.

MUCHE, H. ; ZIMMERMAN, H. The purification of biogás. **A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien – GATE**, p. 25. Eschborn, Germany, 1985.

MUYLAERT, M. S.; AMBRAM, R.; CAMPOS, C. P.; MONTEZ, E. M.; OLIVEIRA, L. B. **Consumo de energia e aquecimento do planeta** – Análise do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) do Protocolo de Quioto – Estudo de Caso. Rio de Janeiro: Editora COPPE, 2000.

NEUMANN, M. G.; GESSNER F.; CIONE A. P. P.; SARTORI R. A.; CAVALHEIRO C. C. S. Interações entre corantes e argilas em suspensão aquosa. **Química Nova**. v. 23, n. 6, p. 818-824. São Paulo, 2002.

PECORA, V. **Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP** – Estudo de Caso. 2006. 152 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo – PIPGE, São Paulo, 2006.

PECORA, V.; VELAZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. Aproveitamento do biogás proveniente de aterro sanitário para geração de energia elétrica em São Paulo - Estudo de Caso. In: VII CBPE - Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. **Anais...** São Paulo, 2010.

PERSSON, M.; JÖNSSON, O.; WELLINGER, A. **Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection**. IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas. Vienna, 2006.

PICHAT, P. **A gestão dos resíduos**. Lisboa: Biblioteca Básica de Ciência e Cultura, 1995.

REECE, F. N.; BATES, B. J.; LOTT, B. D. Ammonia control in broiler houses. **Poultry Science**, v.58, p.754-755, 1979.

ROCHA, J. C.; GRANER, C. A. F.; MAGNANI, R. Determinação espectrofotométrica de amônio em extratos de carne, com salicilato e hipoclorito, sem prévia neutralização dos digeridos sulfúricos. **Química Nova**. v. 12, n. 4, p. 309-312, São Paulo, 1989.

RUSSO, M. A. T. **Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia. Guimarães-Portugal, 2005.

SALOMON, K. R. THIAGO FILHO, G. L. **Biomassa**: Série Energias Renováveis. Ministério Minas de Energia. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. Itajubá: FAPEPE, 2007. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/cartilhas/cartilhas-energias-renovaveis-biomassa.pdf>> Acesso em 20 jul. 2012.

SANTOS, G. G. D. dos. **Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: O Caso da Incineração e da Disposição em Aterros**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2011.

SILVA, T. N.; CAMPOS, L. M. de S. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes – SP. **Eng. Sanitaria e Ambiental**. v.13, n.1, p. 88-96. Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, Oscar. **Toledo e Sua História**. Toledo: Prefeitura Municipal de Toledo, 1988.

SOUTO, A. R.; RALISCH, R. Índice de qualidade ambiental suinícola (IQAS): Aspectos conceituais e metodológicos e aplicação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n.4, p. 441-448, mar. 2007.

SOUZA, S. N. M. de.; PEREIRA, W. C.; PAVAN, A. A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5. **Anais...** Campinas, 2004. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100042&script=sci_arttext> Acesso em 11 jul. 2012.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues**. São Paulo: McGraw-Hill, International Editions, 1993.

TEIXEIRA, P. F.; LIOTTI, R. G.; TORVES, J. C.; CABRAL, A.; VAZOLLER, R. F.; TEIXEIRA, C. E.; MARINHO, F. A. M. Processo de oxidação do metano através das bactérias metanotróficas em coberturas de aterros sanitários. IN: Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, 6. **Anais....** Salvador, 2007

TOLEDO. Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Toledo - PR.** – 2 ed. - Toledo, 2011.

TOLEDO. Prefeitura Municipal. **Perfil Ambiental da Cidade de Toledo - PR.** Secretaria Municipal do Meio Ambiente. Toledo, 2012.

VAN ELK, A. G. H. P. **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: redução de emissões na disposição final**. Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

VANZIN, E. **Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no Aterro Santa Tecla**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2006.

VIVEIROS, M. V. **Coleta Seletiva Solidária: Desafios no Caminho da Retórica à Prática Sustentável**. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) - Universidade de São Paulo, Programa de Pós Graduação em Ciência Ambiental. São Paulo, 2006.

WILLUMSEN, H. C. Energy Recovery From Landfill Gas in Denmark and Worldwide. **LG Consultant**, Vilborg, Denmark, 2001.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no brasil.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Estratégico) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2009.

ANEXOS

ANEXO A

Quadro 5 - Valores do índice de geração de metano para a constante k

TIPO DE RESÍDUO		ZONA CLIMÁTICA *							
		Polar e Temperada (TMA ≤ 20°C)				Tropical ¹ (TMA > 20°C)			
		Seco (PMA/PET < 1)		Úmido (PMA/PET > 1)		Seco (PMA < 1000mm)		Úmido e seco (PMA ≥ 1000mm)	
		Padrão	Classificaçã O ₂	Padrão	Classificaçã O ₂	Padrão	Classificaçã O ₂	Padrão	Classificaçã O ₂
Degradação Lenta	Papel e tecido	0,04	0,03-0,05	0,06	0,05-0,07	0,045	0,04-0,06	0,07	0,06-0,085
	Madeira ; palha	0,02	0,01-0,03	0,03	0,02-0,04	0,025	0,02-0,04	0,035	0,03-0,05
Degradação Moderada	Poda e capina	0,05	0,04-0,06	0,1	0,06-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2
Degradação Rápida	Restos de alimentos	0,06	0,05-0,08	0,185	0,1-0,2	0,085	0,07-0,1	0,4	0,17-0,7
Resíduos Brutos		0,05	0,04-0,06	0,09	0,08-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2

1 A informação disponível sobre a determinação da constante (k) e da meia-vida em condições tropicais é bastante limitado. Os valores incluídos no quadro, para estas condições, são indicativos, e sua maioria é derivada a partir das hipóteses descritas no texto, e dos valores obtidos para as condições temperadas.

2 O valor classificado se refere aos dados mínimos e máximos relatados na literatura, ou estimados pelos autores do presente capítulo. Basicamente, se inclui para descrever a incerteza associada ao outro valor definido como padrão.

* Adaptado de: Capítulo 3 de GPG-LULUCF (IPCC, 2003).

TMA – temperatura média anual ; PMA – precipitação média anual ; PET – potencial de evapotranspiração.

Fonte: Adaptado de IPCC (2006)

ANEXO B

Quadro 6 - Valores do carbono orgânico degradável (DOC) em resíduos sólidos urbanos

Componente do RSU	Teor de matéria seca na % do peso úmido ¹	Quantidade de DOC na % de resíduos úmidos		Quantidade de DOC na % de resíduos secos		Quantidade total na % do peso seco		Fração de carbono fóssil na % do total de carbono	
		P	C**	P	C ²	P	C	P	C
Papel/papelão	90	40	36-45	44	40-50	46	42-50	1	0-5
Tecidos ³	80	24	20-40	30	25-50	50	25-50	20	0-50
Restos de Alimentos	40	15	8-20	38	20-50	38	20-50	-	-
Madeira	85	43	39-46	50	46-54	50	46-54	-	-
Resíduos de poda e capina	40	20	18-22	49	45-55	49	45-55	0	0
Fraldas	40	24	18-32	60	44-80	70	54-90	10	10
Borracha e couro	84	(39) ⁵	(39) ⁵	(47) ⁵	(47) ⁵	67	67	20	20
Plásticos	100	-	-	-	-	75	67-85	100	95-100
Metal ⁶	100	-	-	-	-	ND	ND	ND	ND
Vidro ⁶	100	-	-	-	-	ND	ND	ND	ND
Outros resíduos inertes	90	-	-	-	-	3	0-5	100	50-100

*valor padrão **valor classificado

ND = dados não disponíveis

¹ A quantidade de umidade apresentado aqui se refere aos resíduos antes de serem recolhidos e tratados.

² A classificação dos valores corresponde aos valores mínimo e máximo apresentados por Dehoust et al., 2002; Gangdonggu, 1997; Guendehou, 2004; JESC, 2001; Jager y Blok, 1993; Würdinger et al., 1997; y Zeschmar-Lahl, 2002.

³ Pelo padrão, se supõe que 40% dos resíduos são de origem sintética. Ao parecer do perito dos autores.

⁴ Este valor corresponde aos produtos de madeira já em degradação. A quantidade de matéria seca na madeira, no momento da coleta (para poda e capina) é de 40 por cento. O parecer do perito dos autores.

⁵ Borrachas de origem natural provavelmente não se degradam em condições anaeróbias nos aterros (Tsuchii et al., 1985; Rose y Steinbüchel, 2005).

⁶ O metal e o vidro contém pequena quantidade de carbono fóssil. A combustão de grandes quantidades de metal e vidro não é comum.

Fonte: IPCC (2006)

ANEXO C

Quadro 7 - Classificação dos valores do Fator de Correção de Metano (MCF)

Tipo de local de disposição dos resíduos sólidos	MCF padrão
Aterro bem gerenciado (decomposição anaeróbia) ¹	1,0
Aterro gerenciado (decomposição semi-anaeróbia) ²	0,5
Não gerenciado (>5m de resíduos e/ou próximo ao lençol freático) ³	0,8
Não gerenciado (<5m de resíduos) ⁴	0,4
Local sem categoria ⁵	0,6

¹ **Aterros bem gerenciados (decomposição anaeróbia):** Local onde existe uma disposição controlada dos resíduos, os quais incluem pelo menos um dos seguintes elementos: (i) material de cobertura; (ii) compactação mecânica ou (iii) nivelamento dos resíduos.

² **Aterro gerenciado (decomposição semi-aeróbia):** Local onde existe uma disposição de resíduos controlada, os quais incluem todas as estruturas seguintes que possibilitam a entrada de oxigênio nas camadas de resíduos: (i) material de cobertura permeável, (ii) sistema de drenagem para lixiviados, (iii) sistema de ventilação de gás.

³ **Aterros não gerenciados – profundos e/ou com lençol freático elevado:** Locais que não cumprem os critérios dos Aterros gerenciados e possuem profundidade maior ou igual a 5 metros e/ou lençol freático elevado, próximo ao nível do solo. Esta situação se refere a áreas em que os resíduos tem contato com a água subterrânea.

⁴ **Aterros não gerenciados, pouco profundos:** Locais que não cumprem com os critérios dos aterros gerenciados e possuem profundidade menos de 5 metros.

⁵ **Locais sem categoria:** Somente podem utilizar esta classificação os países que não possuem nenhuma das características das categorias classificadas acima.

Fonte: IPCC (2000); Matsufuji et al. (1996)

ANEXO D

Quadro 8 - Modelos gerados para projeção e estimativa de crescimento populacional de Toledo-PR

Ano	População (IBGE)	Modelo Matemático (1ª Fase)			Modelo Matemático (2ª Fase)			
		Linear	2º Grau	3º Grau	Linear	2º Grau	3º Grau	Exponencial
2000	98200	103207	105115	98261	98019	97080	98200	97636
2001	–	104985	105898	99563	99995	98836	99645	99509
2002	–	106762	106625	100994	101971	100679	101039	101418
2003	–	108540	107295	102565	103947	102609	102457	103363
2004	–	110318	107909	104285	105923	104626	103973	105346
2005	–	112096	108468	106167	107899	106730	105662	107367
2006	–	113874	108970	108219	109875	108921	107599	109426
2007	109857	115652	109415	110453	111851	111199	109857	111525
2008	–	117430	109805	112880	113827	113564	112513	113664
2009	–	119208	110138	115510	115803	116015	115641	115845
2010	119313	120986	110415	118354	117779	118554	119314	118067
2011	–	122764	110636	121422	119755	121180	123608	120331
2012	–	124541	110800	124725	121731	123892	128598	122640
2013	–	126319	110909	128274	123707	126692	134358	124992
2014	–	128097	110961	132079	125683	129578	140963	127390
2015	–	129875	110957	136151	127659	132552	148487	129833
2016	–	131653	110897	140500	129635	135612	157005	132324
2017	–	133431	110780	145138	131611	138759	166592	134862
2018	–	135209	110608	150074	133587	141993	177322	137449
2019	–	136987	110379	155320	135563	145315	189270	140085
2020	–	138765	110094	160886	137539	148723	202511	142772

ANEXO E

Tabela 19 - Estimativa máxima acumulada de geração de metano no aterro sanitário

CURVA ALTA				
ANO	Tempo	Ton CH ₄	m ³	m ³ .tonRS ⁻¹
2003	0	15,50	23290,09	1,61
2004	1	117,02	175809,02	5,99
2005	2	219,78	330191,01	7,38
2006	3	312,69	469787,19	7,47
2007	4	410,33	616475,80	7,44
2008	5	507,04	761770,00	7,35
2009	6	596,43	896072,02	7,13
2010	7	681,56	1023974,07	6,90
2011	8	760,54	1142627,08	6,61
2012	9	840,10	1262164,92	6,35
2013	10	918,42	1379835,28	6,11
2014	11	995,25	1495260,20	5,88
2015	12	1070,82	1608791,34	5,66
2016	13	1111,91	1670522,71	5,88
2017	14	966,33	1451810,14	5,11
2018	15	815,00	1224445,05	4,31
2019	16	687,36	1032687,15	3,63
2020	17	579,71	870960,07	3,06
2021	18	488,93	734560,75	2,58
2022	19	412,36	619522,66	2,18
2023	20	347,78	522500,45	1,84
2024	21	293,31	440672,69	1,55
2025	22	247,38	371659,82	1,31
2026	23	208,64	313454,92	1,10
2027	24	175,96	264365,37	0,93
2028	25	148,41	222963,63	0,78
2029	26	125,16	188045,74	0,66
2030	27	105,56	158596,28	0,56
2031	28	89,03	133758,83	0,47
2032	29	75,09	112811,13	0,40
2033	30	63,33	95144,00	0,33
2034	31	53,41	80243,69	0,28
2035	32	45,05	67676,88	0,24
2036	33	37,99	57078,14	0,20
2037	34	32,04	48139,25	0,17
2038	35	27,02	40600,26	0,14
2039	36	22,79	34241,93	0,12
2040	37	19,22	28879,37	0,10

ANEXO F

Tabela 20 – Estimativa mínima acumulada de geração de metano no aterro sanitário

CURVA BAIXA				
ANO	Tempo	Ton CH ₄	m ³	m ³ .tonRS ⁻¹
2003	0	15,50	23290,09	1,61
2004	1	117,02	175809,02	5,99
2005	2	219,78	330191,01	7,38
2006	3	312,69	469787,19	7,47
2007	4	410,33	616475,80	7,44
2008	5	507,04	761770,00	7,35
2009	6	596,43	896072,02	7,13
2010	7	681,56	1023974,07	6,90
2011	8	759,40	1140917,25	6,64
2012	9	831,07	1248591,53	6,36
2013	10	898,54	1349959,60	6,10
2014	11	962,79	1446492,67	5,84
2015	12	1024,54	1539262,23	5,60
2016	13	1054,24	1583876,36	5,76
2017	14	915,11	1374853,50	5,00
2018	15	771,80	1159540,43	4,22
2019	16	650,93	977947,12	3,56
2020	17	548,99	824792,77	3,00
2021	18	463,01	695623,62	2,53
2022	19	390,50	586683,39	2,14
2023	20	329,34	494804,07	1,80
2024	21	277,77	417313,79	1,52
2025	22	234,27	351959,11	1,28
2026	23	197,58	296839,50	1,08
2027	24	166,64	250352,06	0,91
2028	25	140,54	211144,92	0,77
2029	26	118,53	178077,93	0,65
2030	27	99,97	150189,50	0,55
2031	28	84,31	126668,62	0,46
2032	29	71,11	106831,30	0,39
2033	30	59,97	90100,67	0,33
2034	31	50,58	75990,18	0,28
2035	32	42,66	64089,51	0,23
2036	33	35,98	54052,58	0,20
2037	34	30,34	45587,51	0,17
2038	35	25,59	38448,14	0,14
2039	36	21,58	32426,86	0,12
2040	37	18,20	27348,55	0,10