

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE MARINGÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS LIMPAS**

LIEVERTHON BIANCHI GUALDA DE SOUZA

**QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE BIOGÁS EM UM
ATERRO SANITÁRIO LOCALIZADO NA REGIÃO
NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ**

**MARINGÁ
2015**

LIEVERTHON BIANCHI GUALDA DE SOUZA

**QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE BIOGÁS EM UM
ATERRO SANITÁRIO LOCALIZADO NA REGIÃO
NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas do Centro Universitário de Maringá, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologias Limpas.

Orientadora: Profa. Dra. Rosa Maria Ribeiro.
Coorientador: Prof. Dr. José Maurício Gonçalves dos Santos

MARINGÁ

2015

S541q **SOUZA.** Lieverthon Bianchi Gualda de

Quantificação das Emissões de Biogás em um aterro Sanitário Localizado na Região Noroeste do Estado do Paraná. Lieverthon Bianchi Gualda de Souza. Maringá-Pr.: Cesumar., 2015.

74 p.

Mestrado em Tecnologias Limpas

Contém Tabelas e figuras

Orientadora: Prof^a. Dra. Rosa Maria Ribeiro

Coorientador: Prof. Dr. José Maurício Golçalves dos Santos

1. Aterro Sanitário. 2. Gás Metano. 3. Matéria Orgânica.
4. Resíduos Sólidos. Centro Universitário de Maringá-Cesumar I. Título.

CDD 22^a Ed. 620

NBR 12899 - AACR/2

LIEVERTHON BIANCHI GUALDA DE SOUZA

**Quantificação das emissões de biogás em um aterro sanitário
localizado na Região Noroeste do Estado do Paraná**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas do Centro
Universitário de Maringá, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias
Limpas pela Comissão Julgadora composta pelos membros.

COMISSÃO JULGADORA

Orientador:

Prof.^a. Dr.^a. Rosa Maria Ribeiro
Centro Universitário de Maringá (Presidente)

Membro:

Prof.^a. Dr.^a. Isabele Picada Emanuelli
Centro Universitário de Maringá

Membro:

Prof.^a. Dr.^a. Sandra Maria Simonelli
Universidade Estadual de Londrina

Aprovado em: 16 de setembro de 2015.

DEDICO ESTE TRABALHO À MINHA
FAMÍLIA, POR SEMPRE INCENTIVAR MEUS
ESTUDOS, PARA TORNAR-ME UM
PROFISSIONAL MAIS QUALIFICADO.

AGRADECIMENTO

A Deus, que esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida e do mestrado, por me capacitar e me ajudar em todas as situações e experiências obtidas neste mestrado.

Aos meus pais, Lourival de Souza e Louremi Bianchi Gualda de Souza, pelo incentivo nos estudos e nas decisões.

Aos meus avós, Maria Gualda e João Gualda, pelo incentivo e ajuda no desenvolvimento do projeto.

A minha namorada, Camila Longo, que durante todo o período do mestrado sempre me apoiou.

A minha orientada, profa. Dra. Rosa Maria Ribeiro, por todo o tempo dedicado a mim e ao projeto.

Ao meu coorientador, prof. Dr. José Maurício Gonçalves do Santos, por todo o empenho e dedicação para com o projeto e por todo o conhecimento e experiência que compartilhou.

A todos os professores do mestrado que, de alguma forma, contribuíram com conhecimento e experiência.

Ao prof. Dr. Laercio Mantovani Frare por compartilhar seus estudos e metodologias sobre biogás.

Aos engenheiros Marco Aurélio e Robson Hoepers pela assistência e suporte nos estudos realizados no aterro sanitário.

“Se não puder voar, corra.
Se não puder correr, ande.
Se não puder andar, rasteje, mas
continue em frente de qualquer jeito”.

Martin Luther King

BIOGRAFIA

Lieverthon Bianchi Gualda de Souza nasceu em 26 de setembro de 1990 na cidade de Maringá no Estado do Paraná.

Desde os primeiros anos de vida até outubro de 2004, morou na cidade de Quinta do Sol-PR, onde estudou até o final da 8ª série do ensino fundamental em colégio público.

Em outubro de 2004, mudou-se com sua família para a cidade de Maringá-PR, onde finalizou o ensino fundamental em colégio particular.

Após o ensino médio, ingressou no curso superior em Engenharia de Controle e Automação – Mecatrônica na UniCesumar.

Durante a graduação, serviu no serviço militar obrigatório e realizou vários projetos, dentre os quais, destaca-se o “Elevador móvel autossuficiente para pessoas com necessidade especiais”, desenvolvido com um colega de graduação e que foi patentado. Ao término da graduação, ingressou no programa de pós-graduação *stricto sensu*, em nível de mestrado em Tecnologias Limpas, contemplado com uma bolsa da Capes.

Quantificação das emissões de biogás em um aterro sanitário localizado na região Noroeste do Estado do Paraná

RESUMO

Na sociedade, o consumismo impera de forma disseminada, sendo a correta destinação do lixo foco de muitos debates. Para tanto, há várias alternativas de estudo, como a mitigação dos resíduos, a reciclagem, a compostagem e/ou biodegração de material orgânico e a incineração em altas temperaturas. Contudo, a prática dessas alternativas ainda está muito aquém das necessidades, levando um volume muito grande desses materiais a serem depositados como lixo nos aterros sanitários. Diante desse fato, este trabalho se propôs a quantificar o biogás gerado em um aterro localizado na região Noroeste do Estado do Paraná. Assim, foi efetuada uma qualificação dos resíduos, constatando-se que não há uma coleta seletiva dos dejetos que chegam ao aterro sanitário; também foi realizada uma estimativa do volume do biogás, utilizando-se um lisímetro, em amostragens de campo, dos quais se obteve a vazão do biogás nos nove drenos da área delimitada pelo aterro, estimado para o ano de 2015, e que resultaram em 139 m³. Foi realizada também uma estimativa por meio do método matemático de LandGEM, em que foram obtidos dados em forma de estimativas do período em que o biogás ainda será gerado no aterro, isto é, até meados de 2151, bem como o ano de máxima produção do gás no aterro que é 2016. Concluiu-se que é necessário que haja um gerenciamento adequado dos resíduos que chegam ao aterro sanitário, pois, dessa forma, haverá maior aproveitamento dos resíduos, possibilitando-se a priorização eficaz no gerenciamento dos resíduos. E como consequência, a quantidade de material não orgânico seria significativamente reduzida, o que acarretaria numa decomposição dos resíduos de forma mais rápida e eficiente, incrementando a produção do biogás no aterro sanitário. E em se implantando tecnologias, o biogás poderia ser aproveitado para a geração de energia elétrica, o que traria redução da emissão do CO₂, com a possibilidade de lhe se aferido créditos de carbono.

Palavras chave: Aterro sanitário. Gás metano. Matéria orgânica. Resíduos sólidos.

Quantification of biogas emissions at a landfill located in the State of Paraná Northwest

ABSTRACT

In society, consumerism reigns of disseminated form, being the correct garbage disposal focus of many debates. For both, there are several alternatives, such as the mitigation of waste, recycling, composting and/or biodegradation of organic material and the incineration at high temperatures. However, the practice of these alternatives is still far short of needs, taking a lot of these materials to be deposited as garbage in landfills. Ahead of this fact, this work set out to quantify the biogas generated in a landfill located in the Northwest of the State of Paraná. Thus was made a qualification of waste, noting that there is a selective collection of waste products that reach the landfill; was also carried out an estimate of the volume of biogas, using a lysimeter, in field sampling, which obtained the biogas flow in nine drains the area bounded by the landfill, estimated for the year 2015, and that resulted in 139 m³. Was also carried estimated by the mathematical method LandGEM, wherein the form of data estimates were obtained for the period where the biogas is still generated in landfills, that is, until the mid 2151 as well as year of maximum production the landfill gas that is 2016. It was concluded that there needs to be a proper management of waste arriving at the landfill, because, that way, there will be greater utilization of waste, enabling-if effective prioritization of waste management. And as a result, the amount of inorganic material would be significantly reduced, which would result in decomposition of waste faster and more efficiently, increasing the production of biogas in the landfill. And if deploying technologies, biogas could be used to generate electricity, which would reduce the emission of CO₂, with the possibility of it if measured carbon credits.

Keywords: Gas methane. Landfill. Organic matter. Solid waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Prioridade na gestão de resíduos sólidos.....	18
Figura 2:	Destinação final de RSU.....	20
Figura 3:	Fluxo do sistema integrado de resíduos sólidos urbanos.....	21
Figura 4:	Ilustração da poluição do solo originário do chorume.....	23
Figura 5:	Ilustração da poluição de um aterro controlado.....	25
Figura 6:	Ilustração de um aterro sanitário.....	25
Figura 7:	Fases da biodegradação dos resíduos para a geração do biogás.....	28
Figura 8:	Imagem fotográfica de satélite da região do aterro sanitário da região Noroeste do Estado do Paraná com seus respectivos drenos numerados de 1 a 9.....	35
Figura 9:	Lisímetro.....	38
Figura 1:	Imagem fotográfica de satélite da região do aterro sanitário da região Noroeste do Estado do Paraná com seus respectivos drenos numerados de 1 a 9.....	46
Figura 2:	Lísímetro.....	47
Figura 3:	Composição gravimétrica dos RSU que chegam ao aterro sanitário da região Noroeste do Estado do Paraná.....	51
Figura 4:	Estimativas das emissões de biogás por meio do programa de LandGEM...	52
Figura 5:	Média de temperatura (K) x pressão (mmHg) nos meses de junho e julho em cada dreno.....	54
Figura 6:	Vazão corrigida do biogás em m ³ /ano nos drenos da região delimitada do aterro sanitário.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Coleta de RSU nos Estados e no Distrito Federal.....	20
Tabela 2:	Composição média do biogás.....	27
Tabela 3:	Duração de cada fase na decomposição dos resíduos para a geração do biogás.....	29
Tabela 4:	Composição do biogás de aterro.....	29
Tabela 1:	Dados obtidos dos drenos de 1 a 9 relativos à pressão, tempo e vazão do biogás gerado.....	53
Tabela 5:	Dados obtidos do Dreno 1.....	65
Tabela 6:	Dados obtidos do Dreno 2.....	66
Tabela 7:	Dados obtidos do Dreno 3.....	67
Tabela 8:	Dados obtidos do Dreno 4.....	68
Tabela 9:	Dados obtidos do Dreno 5.....	69
Tabela 10:	Dados obtidos do Dreno 6.....	70
Tabela 11:	Dados obtidos do Dreno 7.....	71
Tabela 12:	Dados obtidos do Dreno 8.....	72
Tabela 13:	Dados obtidos do Dreno 9.....	73

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1:	Cálculo da geração anual de metano.....	36
Equação 2:	Cálculo área da seção circular do tubo.....	38
Equação 3:	Cálculo do volume da tubulação.....	38
Equação 4:	Cálculo da vazão do biogás.....	40
Equação 5:	Vazão do biogás corrigida.....	41
Equação 1:	Cálculo da geração anual de metano.....	46
Equação 2:	Cálculo área da seção circular do tubo.....	48
Equação 3:	Cálculo do volume da tubulação.....	48
Equação 4:	Cálculo da vazão do biogás.....	49
Equação 5:	Vazão do biogás corrigida.....	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivo Geral.....	14
1.2	Objetivos Específicos.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1	Resíduos sólidos.....	16
2.1.1	Origem dos resíduos sólidos.....	16
2.1.2	Classificação dos Resíduos Sólidos – ABNT NBR 10.004:2004.....	17
2.1.3	RSU – Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	17
2.1.3.1	Gestão de Resíduos.....	18
2.1.4	Destinação dos RSU.....	19
2.1.5	Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos.....	21
2.2	Lixão.....	22
2.3	Aterro controlado.....	24
2.4	Aterro sanitário.....	25
2.4.1	Emissão de biogás em aterros sanitários.....	26
2.4.2	Biogás.....	26
2.4.3	Digestão anaeróbica.....	27
2.4.4	Fatores que influenciam a composição do biogás.....	30
2.4.5	Fatores que influenciam a geração de biogás.....	30
2.5	PRINCIPAIS GASES EMITIDOS POR ATERROS SANITÁRIOS.....	32
2.5.1	Dióxido de Carbono.....	32
2.5.2	Metano.....	32
2.5.3	Hidrogênio.....	32
2.5.4	Compostos Orgânicos Não Metanogênicos (NMOC)	33
2.6	Cenário energético brasileiro.....	33
3	METODOLOGIA.....	35
3.1	Caracterização do local de estudo.....	35
3.2	Método matemático de LandGEM.....	36
3.2.2	Programa LandGEM – Versão 3.02.....	36

3.3	Projeção das emissões do biogás em campo.....	37
3.3.1	Desenvolvimento do Lisímetro.....	38
3.3.2	Desenvolvimento do Circuito de Medições de Temperatura e Pressão.....	39
3.3.2.1	Display LCD Nokia 5110.....	39
3.3.2.2	Arduino Nano v3.0.....	39
3.3.2.3	Sensor de Temperatura e Pressão BMP180.....	39
3.3.2.4	Circuito de Temperatura e Pressão.....	39
3.4	Procedimento de leitura do biogás.....	39
3.4.1	Medições da Vazão do Biogás.....	40
3.4.2	Cálculo da Vazão Corrigida.....	40
4	ARTIGO sob o título “QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE BIOGÁS EM UM ATERRO SANITÁRIO LOCALIZADO NA REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ”.....	42
5	Normas do Artigo	60
6	CONCLUSÕES.....	61
7	REFERÊNCIAS.....	62
8	APÊNDICES.....	65

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, o consumismo impera de forma disseminada, independentemente da situação econômica, tanto em países desenvolvidos como nos considerados subdesenvolvidos. Esse quadro teve início com a Revolução Industrial, quando se buscava o desenvolvimento tecnológico, sem haver foco no lado ambiental. O lixo produzido não era reconhecido como um agravante ao meio ambiente. O usual era sua deposição em lixões, deposição a céu aberto (JESUS NETA, 2012).

Atualmente, a destinação do lixo tem sido foco de muitos debates, o que levou à aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, com enfoque na coleta seletiva e nos aterros sanitários (FREITAS; LEITE, 2014). Assim, várias alternativas têm sido estudadas e colocadas em prática, como a mitigação dos resíduos, a reciclagem, a compostagem e/ou biodegração de material orgânico e a incineração em altas temperaturas. Contudo a prática dessas alternativas ainda está muito aquém das necessidades, levando um volume muito grande desses materiais para ser depositado como lixo nos aterros sanitários.

Segundo Fernandes (2009), o aterro sanitário é uma das principais formas de disposição de resíduos no mundo. Os RSU, como são comumente chamados os resíduos sólidos urbanos, quando depositados nesse local, entram em decomposição, gerando o biogás, que, em sua composição, contém gases que podem afetar diretamente o meio ambiente (DEMAJOROVIC, 1995).

O biogás é composto, principalmente, por gás metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), além de outros gases em concentrações menores (DEGANUTTI *et al.*, 2002). De acordo com Fernandes (2009), a emissão descontrolada desses gases pode acarretar em grave problema de poluição atmosférica local e global e precisa ser mitigada. Os efeitos da liberação dos gases localmente variam do simples mau odor até possíveis doenças cancerígenas na comunidade circunvizinha ao aterro. Em relação à poluição atmosférica global, o principal efeito da liberação do biogás é o aquecimento do globo terrestre que vem gerando grandes discussões nos últimos anos.

O gás metano é o segundo maior contribuinte para o aquecimento global, atrás apenas do dióxido de carbono, entre as emissões de gases do efeito estufa (MARIANO *et al.*, 2007).

Estima-se que o metano seja aproximadamente 25 vezes mais prejudicial que o gás carbônico no aprisionamento de calor na atmosfera. Porém o gás metano pode ser utilizado como matéria prima energética, pois possui alto poder energético, o que o torna uma excelente

alternativa na produção de energia, seja elétrica, calorífica ou como combustível (WORLD BANK, 2015).

Em 2011, o aproveitamento energético dos resíduos sólidos gerados, em todo o planeta, ofertou 90 TWh de eletricidade (WORLD BANK, 2012; CEWEP, 2008; EPA 2007), equivalente a 83% do consumo residencial brasileiro em 2010 (EPE, 2011). Para tal, cerca de 200 milhões de toneladas foram utilizadas, o que corresponde a 15% da produção total de lixo. Segundo o World Bank (2012), quase o triplo da produção nacional (aproximadamente 77 milhões de toneladas) demandou aproximadamente 2.000 usinas. Do exposto, fica evidente a importância da quantificação da produção do biogás em aterros sanitários.

Para obter a quantidade dos gases emitidos, especialmente o gás metano, este projeto se propôs a realizar um levantamento de dados com as estimativas de emissões de biogás no aterro sanitário localizado na região Noroeste do Estado do Paraná, mediante aferição da vazão do biogás por um lisímetro e corrigida para as CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão) por meio de métodos matemáticos.

1.1 Objetivo Geral

Realizar um levantamento da emissão de biogás na área delimitada de um aterro sanitário, situado na região Noroeste do Estado do Paraná, ou seja, quantificar sua vazão anual.

1.2 Objetivos Específicos

- Quantificar os resíduos sólidos recebidos no aterro sanitário;
- desenvolver um lisímetro para quantificar a vazão do biogás para o ano de 2015;
- estimar o período de máxima produção do biogás, por meio do método matemático de LandGEM, e também, o tempo remanescente da produção do biogás.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Resíduos Sólidos

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, os resíduos sólidos podem ser definidos como

Resíduos nos estados sólidos e semissólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004, p. 1).

2.1.1 Origem dos resíduos sólidos

As principais classificações dos resíduos sólidos quanto à origem, no âmbito da **publicação da Lei Federal nº. 12.305/10 (BRASIL, 2010b), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e sua regulamentação pelo Decreto Federal nº. 7.404/10 (BRASIL, 2010a)**, são:

- a) **resíduos sólidos urbanos:** correspondem aos resíduos domiciliares, originários de atividades domésticas, em residências urbanas, e de resíduos de limpeza urbana, que são provenientes da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- b) **resíduos industriais:** gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- c) **resíduos de serviços de saúde:** gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional de Meio Ambiente (Sisnama) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS). Importante ressaltar que os resíduos gerados em ambulatórios ou área de atendimento médico nas dependências da indústria devem ser tratados como Resíduos de Serviços de Saúde, observando-se a resolução CONAMA nº 358/05 (dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências) e legislações locais;

- d) **resíduos da construção civil:** gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis. As obras de construção civil, realizadas pela organização (reformas, ampliações, etc.), devem observar a resolução CONAMA nº 307/02 – que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil;
- e) **resíduos de serviços de transportes:** originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- f) **resíduos de mineração:** gerados nas atividades de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

2.1.2 Classificação dos Resíduos Sólidos – ABNT NBR 10.004:2004

Resíduos Perigosos (Classe I): são aqueles que, por suas características, podem apresentar riscos para a sociedade ou para o meio ambiente. São considerados perigosos também os que apresentam uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade. Na norma, estão definidos os critérios que devem ser observados em ensaios de laboratório para a determinação desses itens. Os resíduos que recebem essa classificação requerem cuidados especiais de destinação.

Resíduos Não Perigosos (Classe II): não apresentam nenhuma das características acima, podem ainda ser classificados em dois subtipos:

Classe II A – não inertes: são aqueles que não se enquadram no item anterior, Classe I, nem no próximo item, Classe II B. Geralmente apresentam alguma dessas características: biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.

Classe II B – inertes: quando submetidos ao contato com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, com exceção da cor, turbidez, dureza e sabor.

2.1.3 RSU – Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

Segundo ABRELPE (2014), a geração total de RSU no Brasil em 2014 foi de aproximadamente 78,6 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 2,9% em relação

a 2013, índice que é superior à taxa de crescimento populacional no país no período, que foi de 0,9%.

A quantidade de RSU coletado em 2014 é 3,2% maior que o coletado em 2013, esses dados mostram que houve uma discreta evolução na cobertura dos serviços de coleta de RSU, atingindo um total de 71.206.045 toneladas coletadas ao ano (ABRELPE, 2014).

Ainda segundo ABRELPE (2014), a comparação entre a quantidade de RSU gerada e a coletada em 2014 mostra um índice de cobertura de coleta de 90,6% no país, o que significa que pouco mais de 7 milhões de toneladas deixaram de ser coletadas em 2014 e consequentemente, tiveram destinação imprópria.

2.1.3.1 Gestão de Resíduos

De acordo com a Fernandes et. al. (2001), a prioridade da gestão de resíduos, segundo o Programa de Produção mais Limpa do PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), consiste na aplicação contínua de uma estratégia ambiental integrada para processos, produtos e serviços para aumentar a sua eficiência. Principalmente em relação à geração de resíduos, que é um dos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos e que consiste em incentivar a gestão de resíduos sólidos.

Observam-se as prioridades da gestão de resíduos na Figura 1:

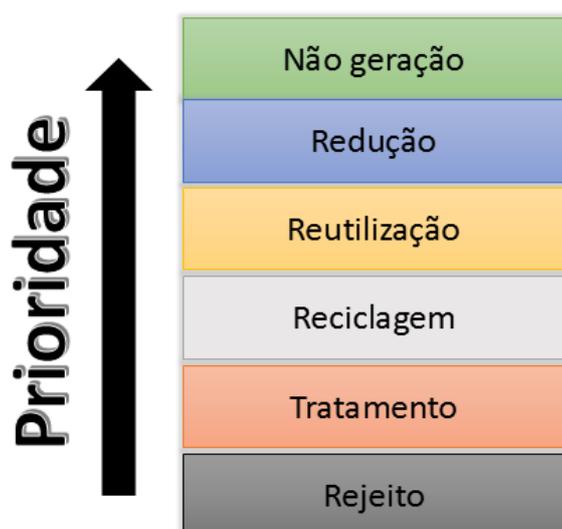


Figura 1: Prioridade na gestão de resíduos sólidos
Fonte: arquivo do autor (2015).

E em relação à gestão de resíduos, de acordo com Juliatto *et al.* (2011, p. 178), podem-se definir:

- **não geração:** realizar a atividade produtiva sem que ocorram perdas ao longo do processo e demais atividades que o suportam;
- **redução:** buscar a otimização e maximização da eficiência de processo quanto ao uso de maquinário, matérias primas, desenvolvimento de novas tecnologias, de forma a gerar a menor quantidade possível de resíduos;
- **reutilização:** identificar e buscar alternativas para viabilizar, técnica e economicamente, o uso de refugos e perdas no próprio processo ou em outro, tanto do ponto de vista mássico quanto energético;
- **reciclagem:** identificar, buscar alternativas para viabilizar, técnica e economicamente, o tratamento de refugos, perdas em processos, embalagens, transformando-os em insumos ou novos produtos;
- **tratamento:** aplicação de técnicas, tais como: compostagem, recuperação, aproveitamento energético, entre outras admitidas pelos órgãos competentes;
- **rejeito:** destinação de rejeitos em aterro, observando-se normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

2.1.4 Destinação dos RSU

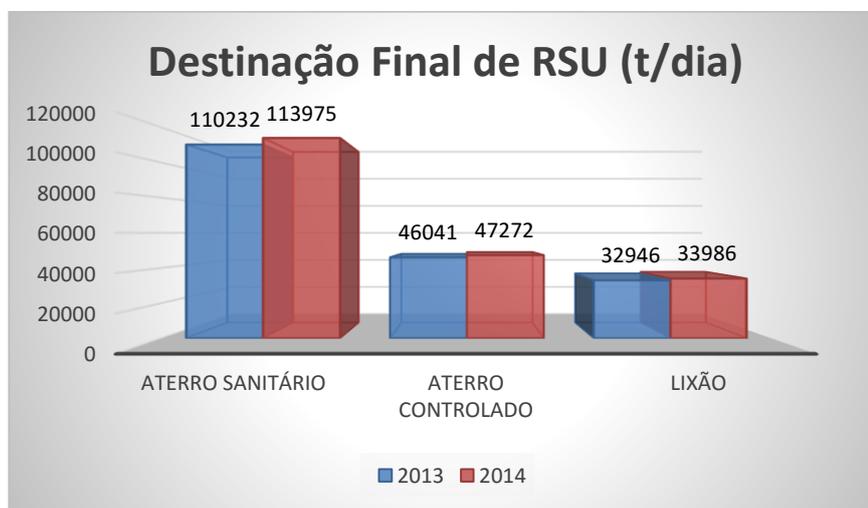
De acordo com a PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos – BRASIL, 2010b), os resíduos sólidos devem ser previamente separados de acordo com a sua constituição e composição, devendo a política ser implementada por municípios como forma de encaminhar as ações destinadas ao atendimento do princípio da hierarquia na gestão de resíduos, para que, assim, estes sejam destinados, da forma correta, para o aterro ou estações de tratamento. A coleta dos RSU também foi quantificada nos Estados e no Distrito Federal, como mostra a Tabela 1.

E a Figura 2 traz os dados referentes à destinação dos RSU no Brasil em 2014.

Tabela 1: Coleta de RSU nos Estados e no Distrito Federal

Regiões	UF	Estados e Distrito Federal	População 2013	RSU por Hab. (Kg/hab./dia)	RSU coletado (t/dia)
NORTE	AC	Acre	776.463	0,626	486
	AP	Amapá	734.996	0,796	585
	AM	Amazonas	3.807.291	0,929	3.538
	PA	Pará	7.999.729	0,648	5.187
	RO	Rondônia	1.728.214	0,628	1.085
	RR	Roraima	488.072	0,668	326
	TO	Tocantins	1.478.164	0,657	971
NORDESTE	AL	Alagoas	3.300.935	0,731	2.413
	BA	Bahia	15.044.137	0,765	11.506
	CE	Ceará	8.778.576	0,830	7.286
	MA	Maranhão	6.794.301	0,611	4.151
	PB	Paraíba	3.914.421	0,741	2.902
	PE	Pernambuco	9.208.550	0,804	7.401
	PI	Piauí	3.184.166	0,641	2.042
	RN	Rio Grande do Norte	3.373.959	0,759	2.561
	SE	Sergipe	2.195.662	0,710	1.558
CENTRO-OESTE	DF	Distrito Federal	2.789.761	1,551	4.326
	GO	Goiás	6.434.048	0,955	6.146
	MT	Mato Grosso	3.182.113	0,846	2.691
	MS	Mato Grosso do Sul	2.587.269	0,896	2.317
SUDESTE	ES	Espírito Santo	3.839.366	0,763	2.931
	MG	Minas Gerais	20.593.356	0,810	16.684
	RJ	Rio de Janeiro	16.369.179	1,268	20.752
	SP	São Paulo	43.663.669	1,346	58.752
SUL	PR	Paraná	10.997.465	0,739	8.123
	RS	Rio Grande do Sul	11.164.043	0,712	7.953
	SC	Santa Catarina	6.634.254	0,685	4.546

Fonte: ABRELPE (2014).

**Figura 2:** Destinação final de RSU

Fonte: ABRELPE (2014).

2.1.5 Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos

Define-se por gerenciamento integrado de resíduos sólidos a participação de diferentes órgãos da administração pública e da sociedade civil com a finalidade de ocorrer a limpeza urbana, a coleta, o tratamento e a disposição final do lixo, promovendo melhor qualidade de vida à população e elevando a higiene e limpeza do município, analisando-se os aspectos das características das fontes de produção, volume, tipo de resíduo, características sociais, culturais, demográficas e econômicas dos cidadãos, climáticas e urbanísticas (ZANTA; FERREIRA, 2003).

A eficiência de um gerenciamento integrado de resíduos sólidos deve-se basear no uso de práticas administrativas de resíduos, que é a participação efetiva da comunidade, instruída na colaboração de limpeza das ruas, reduzindo-se o descarte, reaproveitando e reciclando os materiais para, depois, dirigi-los ao lixo, além do manejo seguro e efetivo fluxo de RSU (Resíduo Sólido Urbano), atingindo-se o mínimo de impactos sobre a saúde pública e meio ambiente (RIBEIRO; LIMA, 2000). A Figura 3 traz uma representação do fluxo.

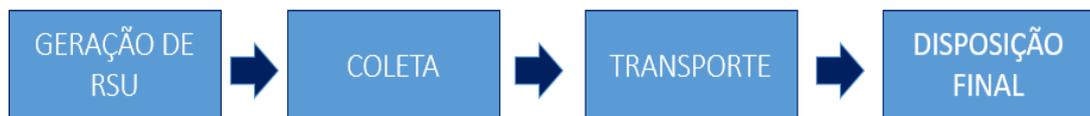


Figura 3: Fluxo do sistema integrado de resíduos sólidos urbanos
Fonte: Oliveira e Pasqual (1998, p. 2 – adaptado).

Através do fluxo de RSU é possível observar que se deve buscar a máxima redução na produção de lixo, o máximo reaproveitamento e reciclagem de materiais, além da disposição dos resíduos de forma mais adequada perante os aspectos sanitários e ambientais, compreendendo toda a população, auxiliando na redução de custos do sistema e contribuindo na proteção e melhoria do ambiente. Desse modo, para se compor um sistema de gerenciamento, é necessária não somente a busca por parceiros e entidades, mas por medidas que visem à redução de impactos ambientais, decorrentes da geração de resíduos.

Segundo Oliveira e Pasqual (1998), o sistema de tratamento dos resíduos sólidos é constituído de medidas e procedimentos que alteram as características físicas, químicas ou biológicas do resíduo, reduzindo o risco à saúde pública e ao meio ambiente. São eles: reciclagem (aproveitamento inorgânico dos resíduos, reduzindo-se níveis de consumo de energia, poluição ambiental e visual e auxiliando na saúde pública e limpeza urbana); compostagem (processo biológico de decomposição de materiais orgânicos dos resíduos,

obtendo-se o composto, rico em nutrientes e condicionador de solos) e incineração (que consiste na queima do resíduo para transformação de resíduos sólidos, líquidos e gases combustíveis em dióxido de carbono).

De acordo com a lei federal nº 12.305, de 2010, art. 3º, inciso VIII, a disposição final, ambientalmente adequada, é caracterizada como a “distribuição ordenada dos rejeitos em aterros, levando em consideração normas operacionais específicas de forma a impedir danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos” (BRASIL, 2010b).

Dentre os sistemas de disposição final, estão:

- descarga a céu aberto ou lixão (forma incorreta de disposição, sem nenhum sistema de tratamento e proteção ao meio ambiente);
- aterro controlado (disposição similar ao lixão, contudo os resíduos são cobertos por uma camada de terra, reduzindo odor e poluição visual, no entanto não há impermeabilização na base e sistema de tratamento do chorume);
- aterro sanitário (técnica correta de disposição de resíduos sólidos com o uso de procedimentos que visem à minimização de impactos à saúde da população e do meio ambiente, com controle e monitoramento ambiental).

Destinar o lixo de modo correto também é prever o que será aterro. Embora o gerenciamento integrado dos resíduos seja uma atribuição da Prefeitura, os governantes, com a comunidade, devem corroborar as decisões quanto à proporção do lixo a ser aterrado com a forma como o aterro deve ser feito, levando-se em consideração que os impactos ambientais, sociais e econômicos da disposição final afetam a população como um todo, tendo-se em vista que envolver a comunidade proporciona maior conscientização nesse aspecto.

2.2 Lixão

O lixão é uma área de disposição final de resíduos sólidos sem nenhuma preparação anterior do solo, visto na Figura 4 (ALVES *et al.*, 2013).

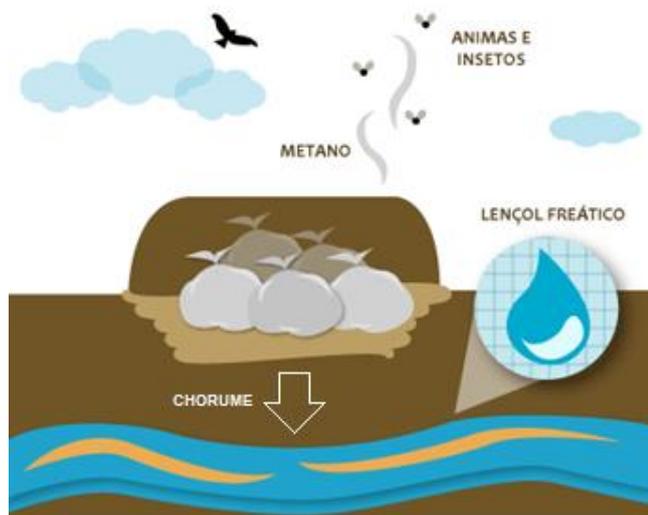


Figura 4: Ilustração da poluição do solo originário do chorume
Fonte: Ecod (2010, p. 1 – adaptado).

De acordo com May (2008), o lixão é um local onde não há preparação para o recebimento do lixo e nem sistema de tratamento do chorume, o que pode implicar em riscos ambientais, sociais e econômicos, além de prejuízos ao meio ambiente. O descarte incorreto dos resíduos no solo pode implicar em:

- a) poluição visual: grande variedade de lixo descartada de maneira incorreta, ocasionando um impacto visual na população e contribuindo na perda do valor natural e econômico da área em que o resíduo é descartado;
- b) poluição do solo: por meio da decomposição do lixo, ocorre a geração do chorume, que altera as características físico-químicas do solo, tornando-o impróprio para outros fins e, conseqüentemente, trazendo malefícios ao meio ambiente. Outra consequência negativa dos lixões é funcionar como criadouros de vetores de doenças (moscas, ratos, baratas);
- c) poluição da água: ocasionada pela transposição do chorume no solo, e conseqüentemente, poluindo e modificando as características dos mananciais de água subterrâneos e superficiais;
- d) poluição do ar: por meio da decomposição dos resíduos, ocorrendo a formação de gases, como o dióxido de carbono, o metano e ácido sulfídrico, ocasionando em riscos, explosões e doenças respiratórias para a população vizinha além da queima da vegetação.

Segundo Monteiro (2001), o lixão é uma forma incorreta de dispor os resíduos sólidos urbanos, pois provoca inúmeros impactos ambientais negativos. Os resíduos devem ser recuperados para que os impactos sejam minimizados. Uma forma simples e econômica de recuperação degradada por um lixão fundamenta-se nos seguintes procedimentos:

- definir com precisão, por meio de funcionários antigos, a extensão da área que recebeu o lixo;
- delimitar a área, cercando-a completamente;
- efetuar sondagens com o intuito de definir a espessura da camada de lixo ao longo da área degradada;
- remover o lixo tal que sua espessura seja menor que 1m;
- recuperar a área escavada com solo natural da região;
- executar valetas ao longo de todo o perímetro da pilha de lixo;
- executar um ou mais poços para a acumulação do chorume coletado pelas valetas;
- construir poços verticais para a drenagem do gás;
- espalhar uma camada de solo vegetal sobre a camada de argila;
- promover o plantio de espécies nativas;
- implantar poços de monitoramento a montante e a jusante do lixão recuperado.

2.3 Aterro Controlado

Segundo Ribeiro e Lima (2000), o aterro controlado (Figura 5) é um local similar ao aterro sanitário em relação à realização da cobertura por uma camada inerte, usualmente de terra ou entulho, no final do período diário de trabalho, contudo não dispõe de impermeabilização de base (comprometendo a qualidade das águas subterrâneas), nem de processos de tratamento de chorume ou de dispersão dos gases gerados. Esse método é preferível ao lixão, mas, pelos problemas ambientais que causa, é inferior em eficácia ao aterro sanitário.

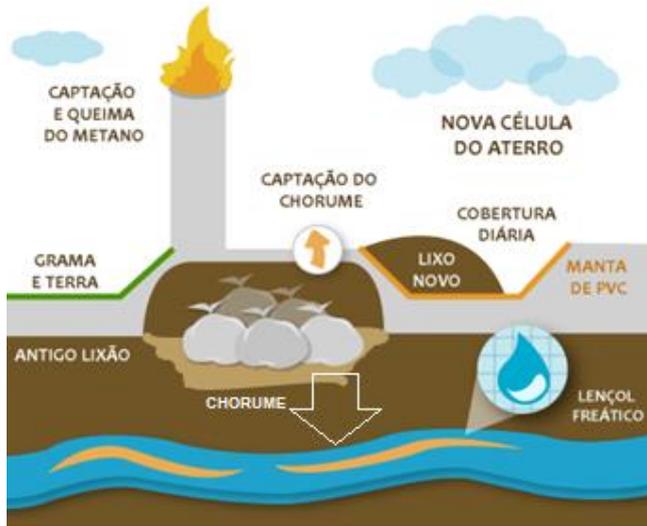


Figura 5: Ilustração da poluição de um aterro controlado
Fonte: Ecod (2010, p. 2 – adaptado).

2.4 Aterro Sanitário

O aterro sanitário, mostrado na Figura 6, constitui-se de local no qual se dispõem os resíduos sólidos no solo, de forma segura e controlada, garantindo-se a preservação do meio ambiente, a higiene e a saúde pública. No processo de decomposição dos resíduos sólidos, ocorre a liberação de gases e líquidos (chorume ou percolato) muito poluentes, o que exige cuidados na impermeabilização do solo, implementação de sistemas de drenagem eficazes, entre outros, evitando-se possível contaminação da água, do solo e do ar (LIMA, 2001).



Figura 6: Ilustração de um aterro sanitário
Fonte: Ecod (2010, p. 3 – adaptado).

2.4.1 Emissão de Biogás em Aterros Sanitários

Segundo Fernandes (2009), os aterros sanitários constituem ecossistemas nos quais várias espécies de microrganismos estão presentes. Dentre os decompositores da matéria orgânica, há as bactérias, fungos e protozoários. As bactérias estão presentes na decomposição anaeróbica da matéria orgânica, desempenhando o processo de fermentação – acetogênicas, produtoras de H_2 , e acetogênicas, consumidoras de H_2 , e as metanogênicas.

De acordo com Castilhos Júnior *et al.* (2003), o processo de degradação dos resíduos sólidos é um fenômeno constituído, essencialmente, pela superposição de mecanismos biológicos e físico-químicos, catalisados pelo fator água, presente nos resíduos pela umidade inicial e pelas águas das precipitações.

Contudo, para se entender os processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem em aterros sanitários e o seu comportamento ao longo do tempo, é necessário estudar diversos fatores que interferem no processo de degradação biológica, principalmente pelo fato de que, em países subdesenvolvidos, a maior parte dos resíduos depositados é matéria orgânica (MONTEIRO, 2003).

2.4.2 Biogás

Pode-se definir biogás como o produto da digestão anaeróbica da biomassa de resíduos orgânicos, oriundos de diversas fontes. Em sua constituição, o biogás é composto por cerca de 50-70% de metano (CH_4), 20-30% de gás carbônico (CO_2) e 0,1-0,5% de ácido sulfídrico (H_2S) e outros componentes (FERUCK *et al.*, 2014).

Comparado a outros parâmetros, $1m^3$ de biogás equivale, energeticamente, a

- 0,40 kg de GLP (gás de cozinha);
- 0,61 a 0,70 L de gasolina;
- 0,55 L de óleo diesel;
- 0,80 L de álcool;
- 1,25 a 1,43 kwh de eletricidade;
- 1,60 a 3,50 kg de lenha.

2.4.3 Digestão anaeróbica

De acordo com a EPE (2014), a digestão anaeróbica (DA) pode ser definida como a conversão da matéria orgânica em dióxido de carbono, metano e lodo por meio de bactérias, em um ambiente pobre em oxigênio. Esse processo é uma das formas mais antigas de digestão e ocorre naturalmente na ausência de oxigênio, como em plantações de arroz, águas paradas, estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários. O gás obtido durante a digestão anaeróbica, chamado de biogás, inclui, além do metano e do dióxido de carbono, alguns gases inertes e compostos sulfurosos. A Tabela 2 traz a composição média do biogás.

Tabela 2: Composição média do biogás

Conteúdo (% em volumes)	
Metano	50 – 70
Dióxido de carbono	25 – 45
Vapores d'água	2 (20°C) – 7 (40°C)
Oxigênio	< 2
Nitrogênio	< 2
Amônia	< 1
Hidrogênio	< 1
Ácido Sulfídrico	< 1

Fonte: Al Sead *et al.* (2008, p. 41 – adaptado).

Segundo Tchobanoglous, Thiesen e Vigil (1993) e Bidone (1999), a geração do biogás ocorre em cinco fases:

- **Fase I:** em que ocorre a biodegradação aeróbia pela quantidade de ar que é enterrada com o resíduo.
- **Fase II:** fase de transição. O oxigênio é consumido e as condições anaeróbicas começam a prevalecer. Os principais aceptores finais de elétrons, na fase anaeróbica, são o nitrato e o sulfato. Ocorre a conversão de matéria orgânica solúvel em ácidos graxos voláteis. Nessa fase predomina a formação de CO₂ e H₂, conhecida como fase acidogênia.
- **Fase III:** fase 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. O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante essa fase e os microrganismos envolvidos nessa conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias estritas e facultativas. Essa

fase também é conhecida como acetogênica, pois nela ocorre a conversão de ácidos graxos voláteis em ácido acético (CH_3COOH).

- **Fase IV:** fase metanogênica. Nessa fase, predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CO_2 e CH_4 em uma proporção de 35-50% e de 45-60%, respectivamente. A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente.
- **Fase V:** fase de maturação. Essa fase ocorre após grande quantidade do material orgânico ter sido biodegradada e convertida em CH_4 e CO_2 durante a fase metanogênica. 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. Condições aeróbias, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio, podem voltar a ocorrer, dependendo da suscetibilidade do aterro a condições atmosféricas.¹

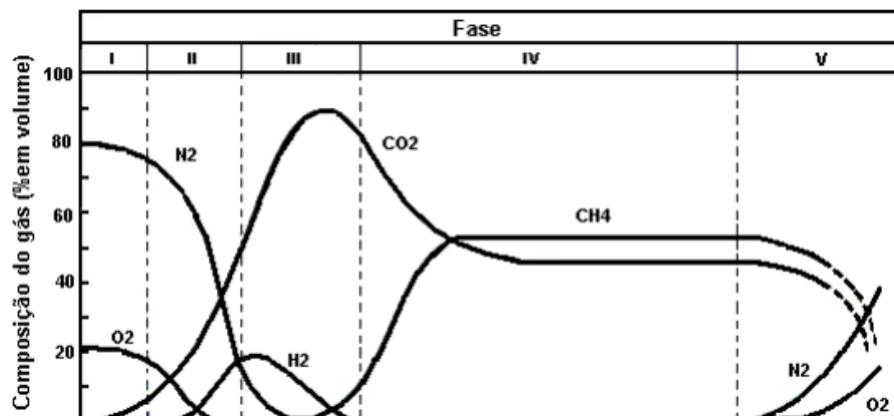


Figura 7: Fases da biodegradação dos resíduos para a geração do biogás
Fonte: Tchobanoglous, Thiesen e Vigil (1993) e Bidone (1999).

A duração de cada fase pode variar, dependendo da quantidade de nutrientes, da quantidade de água presente dos resíduos e, principalmente, da compactação dada à camada de resíduos.

Segundo Augenstein e Pacey (1991), a duração de cada etapa está descrita na Tabela 3, a seguir.

¹ Todas as fases estão dispostas na Figura 7.

Tabela 3: Duração de cada fase na decomposição dos resíduos para a geração do biogás

Fases	Intervalo de duração das fases
I	Algumas horas a 1 semana
II	1 mês a 6 meses
III	3 meses a 3 anos g
IV	8 anos a 40 anos
V	1 ano a mais de 40 anos

Fonte: Augenstein e Pacey (1991, p. 130).

O biogás proveniente dos resíduos de aterros sanitários é composto por vários tipos de gases, sendo em maior quantidade o gás metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), além de outros gases.

O gás metano é o principal componente do biogás, 1 ton. desse gás equivale a 25 créditos de carbono, ou seja, ele é 25 vezes mais potente que o dióxido de carbono em termos de efeito estufa.

Assim, sua simples queima representa um benefício ambiental perante sua emissão.

Em adição, o aproveitamento energético também evita a emissão decorrente da queima de combustível fóssil que poderia ser utilizado para ofertar a mesma quantidade de energia que o biogás. A Tabela 4, abaixo, traz os tipos de gases contidos no biogás e suas proporções.

Tabela 4: Composição do biogás de aterro

Composição	Porcentagem (base seca)
Metano	45,0 – 60,0
Dióxido de Carbono	40,0 – 60,0
Nitrogênio	2,0 – 5,0
Oxigênio	0,1 – 1,0
Enxofre	0,0 – 1,0
Amônia	0,1 – 1,0
Hidrogênio	0,0 – 0,2
Monóxido de Carbono	0,0 – 0,2
Gases em menor concentração	0,01 – 0,6

Fonte: Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993).

2.4.4 Fatores que influenciam a composição do biogás

A composição do biogás pode variar de um local a outro, ou até mesmo de uma célula à outra no mesmo aterro sanitário. Essa variação ocorre a todo instante. Segundo a Agência Ambiental da Inglaterra (2012), os fatores que podem influenciar a composição do biogás são:

- diferenças na composição do resíduo, pré-tratamento e armazenamento;
- mudança na forma predominante da atividade microbológica (anaeróbio e/ou aeróbio);
- idade do resíduo;
- características hidráulicas do local;
- propriedades físico-químicas dos componentes do resíduo;
- diferentes propriedades dos componentes do biogás;
- temperatura do aterro.

2.4.5 Fatores que influenciam a geração de biogás

Segundo Castilhos Júnior *et al.* (2003), a geração de gás em aterros sanitários é realizada por bactérias, assim, os diversos fatores que afetam a sobrevivência das mesmas agem diretamente na formação do biogás. Dentre os fatores, estão: impermeabilidade do ar, temperatura, pH, composição dos resíduos, umidade dos resíduos, tamanho das partículas, idade dos resíduos, dentre outros fatores.

- Impermeabilidade do ar: a impermeabilização completa do sistema é necessária pelo fato de as bactérias metanogênicas serem essencialmente anaeróbias. Por isso, a decomposição da matéria orgânica na presença de oxigênio produzirá apenas dióxido de carbono;
- Temperatura: a temperatura exerce influência sobre a velocidade do sistema, sendo que a faixa ótima de temperatura para bactérias mesofílicas consiste entre 30 a 35°C, enquanto que, para as bactérias termofílicas, é entre 45 a 65°C. As termófilas geralmente produzem altas taxas de geração de gás; contudo a maior parte dos aterros ocorre na faixa das mesófilas;
- pH: para a maioria das bactérias anaeróbias, a faixa de pH ótimo é 6,7 a 7,5 ou próximo do neutro [pH = 7,0] (McBEAN *et al.*, 1995). Dentro da faixa ótima de pH, a

metanogênese é elevada para uma taxa elevada de tal modo que a produção de metano é maximizada. Fora da faixa ótima – um pH abaixo de 6 ou acima de 8 –, a produção de metano fica estritamente limitada. A maioria dos aterros tendem a ambientes levemente ácidos;

- Composição do resíduo: a maioria dos resíduos residenciais e comerciais, dispostos em um aterro sanitário municipal de resíduos sólidos, são biodegradáveis. A outra parte consiste de vários materiais inertes tais como concreto, cinza, solo, metais, plásticos e outros materiais não biodegradáveis. Assim, quanto maior a quantidade de resíduos biodegradáveis, mais rápida será a sua decomposição, e, conseqüentemente, mais acelerada será a taxa de produção de gases no aterro;
- Umidade dos resíduos: depois da composição dos resíduos, o teor de umidade, ou seja, a quantidade de água presente nos resíduos, é o fator mais importante para a taxa de produção de biogás. Existe uma faixa ótima de umidade, quanto maior o teor de umidade, maior será a taxa de produção de gás, isso ocorre até a umidade de saturação. Essas alterações no teor de umidade do aterro podem resultar das mudanças na infiltração de águas superficiais e/ou influxo de águas subterrâneas, liberação de água como resultado da decomposição dos resíduos e variações sazonais do teor de umidade dos resíduos;
- Tamanho das partículas: quanto menor a unidade ou partícula do resíduo disposto, maior será a área da superfície específica. A partícula de resíduo com uma área superficial maior se decomporá mais rapidamente do que uma partícula com uma área menor. Por essa razão, um aterro que aceita pedaços de resíduo terá uma taxa de decomposição mais rápida e completa do que aquele que recebe somente resíduos inteiros;
- Idade do resíduo: a geração de gás (metano) em um aterro possui duas variáveis dependentes do tempo: tempo de atraso e tempo de conversão. O tempo de atraso (retardo) é o período que vai da disposição dos resíduos até o início da geração do metano (início da Fase III). O tempo de conversão é o período que vai da disposição dos resíduos até o final da geração do metano (final da Fase V);
- Outros fatores: há outros fatores que podem influenciar a taxa de geração de gás, que são a presença de nutrientes, bactérias, potencial de oxidação-redução, compactação dos resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro e processamento de resíduos variáveis (CASTILHOS JÚNIOR *et al.*, 2003).

2.5 Principais Gases Emitidos por Aterros Sanitários

Os gases emitidos de aterros sanitários causam vários impactos nas regiões circunvizinhas, em diferentes escalas e impactos globais, como o aumento do efeito estufa. As emissões continuam por um longo período após o fechamento do aterro sanitário. Este pode gerar incômodos pelo mau cheiro e problemas de saúde (FERNANDES, 2009).

2.5.1 Dióxido de Carbono

O CO₂ é a principal forma gasosa do carbono. Esse gás é produzido na biodegradação da matéria orgânica tanto aeróbia como anaerobiamente. Por esse motivo, é um dos principais gases produzidos em aterros sanitários. A concentração de CO₂ no biogás varia de 35 a 45%.

O CO₂ é classificado como um gás intermediário entre tóxico e não tóxico. Sendo acima de 5%, representa um grave perigo para a vida. O valor limite de CO₂ é 0,5%, com um limite de exposição de 1%. Em 3%, respirar torna-se difícil e podem-se desenvolver dores de cabeça ou sonolência (FISCHER *et al.*, 1999).

2.5.2 Metano

O metano é produzido na biodegradação anaeróbia da matéria orgânica e sua concentração em aterros sanitários varia de 35 a 60%. O metano possui um potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o dióxido de carbono. Isso ocorre pelo alto coeficiente de absorção por radiação ultravioleta e longa residência na atmosfera (WORLD BANK, 2015).

2.5.3 Hidrogênio

O hidrogênio tem como características: gás não venenoso, inodoro e incolor, mas altamente inflamável. É produzido por bactérias acetogênicas e fermentativas e consumido pelas metanogênicas. Como as bactérias metanogênicas são mais lentas, ocorre acúmulo de hidrogênio, principalmente em aterros mais novos, chegando a concentrações maiores que o limite de explosividade de 4% (FISCHER *et al.*, 1999).

2.5.4 Compostos Orgânicos Não Metanogênicos (NMOC)

Os gases de aterros sanitários possuem uma variedade de compostos orgânicos traços, que, juntos, constituem 1% do volume do biogás. Alguns estudos detectaram entre 100 e 200 compostos diferentes. Esses compostos são subprodutos de processos químicos e biológicos que ocorrem na massa de resíduo e consistem dos compostos oxidados do carbono como: álcool, acetona, ácidos orgânicos, furanos e compostos sulfurados (FISCHER *et al.*, 1999).

O potencial de perigo de explosão varia de acordo com as características químicas do componente. Contudo o benzeno e outros NMOCs, sozinhos, são improváveis de serem coletados em concentrações altas o bastante para trazerem perigos de explosão (BRITO FILHO, 2005).

2.6 Cenário Energético Brasileiro

O cenário energético brasileiro, contido nos dados do Balanço Energético Nacional – BEN –, publicado em 2014, referente ao ano de 2013, apresenta os dados preliminares e reúne avaliações sobre quando e como se usou a energia no Brasil no ano de 2013, também mostra a contabilização relacionada à oferta e consumo de energia no Brasil (EPE, 2014).

Os dados estão divididos em duas formas de energia: as renováveis, como biomassa da cana, hidráulica e eletricidade, lenha e carvão vegetal e lixívia; e as não renováveis, que são o petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e urânio.

No Brasil, o consumo dominante é do petróleo e seus derivados (39,3%), seguido da biomassa da cana (16,1%) e do gás natural (12,8%). Esses dados mostram o crescimento da energia renovável, proveniente da biomassa, o que implica em aspectos positivos, relacionados à utilização das energias renováveis no país (EPE, 2014).

No contexto mundial, a matriz energética nacional caiu de 42,4%, em 2012, para 41,0%, em 2013, embora tenha permanecido acima da média mundial, calculada em 13,2% (EPE, 2014).

No setor de energia elétrica, a oferta interna cresceu 3,9%, para 609,9 TWh, em 2013, apesar da redução de 5,4% da oferta de energia hidráulica, em virtude da irregularidade das chuvas. Com isso, a participação das energias renováveis na matriz elétrica caiu para 79,3%, contra 84,5%, em 2012, e 88,9%, em 2011 (EPE, 2014).

Assim como em 2012, o aumento do consumo final de eletricidade foi atendido pela maior geração das térmicas, sobretudo pelas unidades movidas a gás natural, cuja proporção na matriz elétrica subiu de 7,9%, em 2012, para 11,3%, em 2013. A participação da biomassa, o que inclui o bagaço da cana-de-açúcar, também avançou de 6,8% para 7,6% em 2013. Apenas entre as fontes termelétricas, o total gerado pela biomassa, incluindo exportação e autoprodução, representou uma participação de 26,9% (EPE 2014).

O potencial da cogeração, a partir de resíduos agrícolas, é enorme no Brasil. A fonte com maior potencial são os resíduos gerados pelo setor de açúcar e etanol. Estima-se que o potencial de geração em 2013 que utilizou apenas bagaço excedente foi de 7.810 MW médios. Em 2020, esse potencial poderá atingir 10.440 MW médios apenas com bagaço. Com mais 50% de palha, poderão ser gerados 15.660 MW médios, e, com a biodigestão para geração de biogás, esta geração poderá atingir 20.880 MW médios (EPE, 2014).

3 METODOLOGIA

3.1. Caracterização do Local de Estudo

O aterro sanitário está localizado na região Noroeste do Estado do Paraná, na altitude de 555 m em relação ao nível do mar, cujo clima é subtropical temperado, com temperatura média anual de 22°C e a média pluviométrica anual de 1.590 ml (SANTOS, 2003).

Encontra-se em uma propriedade particular de uma empresa da região, sendo um local permitido e legalizado para execução das atividades de um aterro sanitário, e está dentro das adequações quanto às distâncias de núcleos habitacionais e de corpos d'água, além de estar isolado do visual da população, como deve ser um aterro Sanitário. A área onde foram realizadas as medições esteve em funcionamento durante três anos, de 2011 a 2013.

No acesso ao bairro, há placas que sinalizam a localização do aterro; o mesmo conta com portaria/guarita e com vigilantes (dois funcionários), que monitoram a entrada e saída dos veículos no local, garantindo segurança e boa conduta do local quanto aos trabalhadores e visitantes.

Os caminhões que atuam na coleta do lixo e na deposição do mesmo no aterro sanitário são pertencentes à Prefeitura da cidade, no total, são 37 veículos, que perfazem três viagens por dia. Há outros dez caminhões que atuam como grandes geradores, responsáveis pela coleta do lixo das empresas. O descarregamento do lixo no aterro é realizado por dois funcionários da Prefeitura, responsáveis pela coleta do lixo, cuja organização é realizada por cinco funcionários, sendo três operadores de máquinas e dois catadores. E, atuando na inspeção do tratamento do chorume, são dois funcionários.

A Figura 8 mostra uma imagem fotográfica de satélite da região do aterro sanitário da região Noroeste do Estado do Paraná com seus respectivos drenos numerados de 1 a 9.



Figura 8 – Imagem fotográfica de satélite da região do aterro sanitário da região Noroeste do Estado do Paraná com seus respectivos drenos numerados de 1 a 9

Fonte: GOOGLE EARTH (2014)

3.2. Método Matemático de Landgem – Versão 3.02 da *United States Environment Protection Agency* – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)

No aterro foram utilizados métodos matemáticos teóricos para a estimativa anual da produção do biogás.

Por meio do modelo utilizado, foi possível construir uma curva de geração do biogás que prediz a geração do gás por determinado período. A produção total de gás e a taxa com que será gerado variam de acordo com os parâmetros similares de entrada, tais como: a quantidade de RSU aterrada, o tempo de atividade do aterro, o potencial de geração do metano e a taxa de geração do metano.

3.2.2. Programa LandGEM – Versão 3.02

O LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model* – Modelo de Emissão de Gases em Aterros Sanitários) é um programa que estima a quantidade de biogás gerado em aterros e suas variações ao longo de determinado período de tempo. O modelo realiza o cálculo da emissão de gás metano e de outros 49 componentes. Esse modelo utiliza uma equação 1 de primeira ordem para estimar as emissões do biogás (EPA, 2005).

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

em que:

Q_{CH_4} = geração anual de metano para o ano calculado (m^3ano^{-1});

i = anos escolhidos para se realizar o cálculo;

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

$j = 0,1$ – acréscimo por ano;

k = taxa de geração de metano (ano^{-1});

L_0 = potencial de geração de metano (m^3t^{-1});

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

t_{ij} = ano, em cada seção, de recebimento da massa de resíduos (tempo, ex.: 3,2 anos).

Com o software, é possível utilizar dados específicos de um aterro para se estimar as emissões, na ausência de dados específicos.

O LandGEM possui dois tipos de parâmetros padrão, para se realizar o cálculo da geração de metano, que são o AP42 (*Compilation of Air Pollutant Emission Factors*) e o CCA (*Clean Air Act*). Os parâmetros dos quais o programa se utiliza para perfazer os cálculos em um aterro convencional são:

- CCA: são usados $170 m^3CH_4t^{-1}$ RSU para o cálculo de L_0 ; e, para se calcular o k , usa-se $0,05 (ano^{-1})$;

- AP42: são usados $100 m^3CH_4t^{-1}$ RSU para se determinar L_0 ; e, para se calcular o k , $0,04 (ano^{-1})$.

Os parâmetros L_0 e k são os mais importantes para a equação (1), pois podem sofrer alterações de acordo com o local, clima, tipo de resíduos, entre outros. Na teoria, k varia entre 0,003 a 0,21 (ano^{-1}), contudo, nos padrões brasileiros, o fator é aplicado a 0,05 até 0,15. Já L_0 está proporcionalmente relacionado à quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos e pode variar de 0 (ausência de material orgânico) até 300 m^3t^{-1} . No Brasil, metade dos RSU são constituídos de matéria orgânica, para L_0 , esse valor pode variar de 140 a 190 m^3t^{-1} (CEPEA, 2004).

É sabido que a decomposição dos RSU é até cinco vezes mais rápida em climas tropicais úmidos do que o que preveem os modelos de primeira ordem, quando adotados os parâmetros padrão Maciel e Jucá (2011).

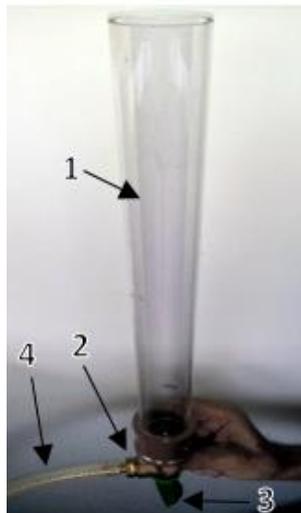
Segundo Scharff e Jacobs (2006), a desvantagem do LandGEM é que não há diferença no teor da matéria orgânica, pois, nesse modelo, todos os resíduos são considerados RSM (Resíduos Sólidos Municipais). No entanto o LandGEM leva em consideração a degradação dos resíduos depositados ao longo do tempo que não acaba de uma vez, pois considera que a fração orgânica dos resíduos, depositada no primeiro ano do aterro, continuará se degradando, somando-se ao valor da emissão os resíduos que forem sendo depositados.

3.3. PROJEÇÃO DAS EMISSÕES DO BIOGÁS EM CAMPO

As investigações de campo se deram para se estimar as vazões de biogás que são emitidas pelos drenos localizados na região do aterro e para se avaliar a quantidade de gás metano presente no biogás. Nas amostragens de campo, foram utilizados equipamentos que fornecem dados referentes à vazão (lisímetro), temperatura e pressão ambiente (circuito de T e P) na área do aterro sanitário.

3.3.1. Desenvolvimento do Lisímetro

O lisímetro é um instrumento de simples construção e de uso. Para compô-lo, foram utilizados os seguintes materiais: uma mangueira de 3/8", uma conexão em T para gás, um balão elástico (bexiga) com detergente e água misturados e um tubo de vidro com capacidade de 144,32 ml. A seguir, a Figura 9 mostra o lisímetro utilizado no experimento de campo (fonte: do arquivo do autor).



- 1 - Tubo
- 2 - Conexão em T
- 3 - Balão
- 4 - Mangueira 3/8"

Figura 9 – Lisímetro

Fonte: arquivo do autor (2015)

A função do lisímetro é realizar a medição da vazão de biogás através dos drenos, nos quais o biogás incidirá sobre a mangueira de 3/8", percorrendo todo o trajeto até chegar à conexão em T.

Nessa etapa, o balão com água e detergente é bombeado; assim, à medida que o biogás passa pela conexão, carrega, consigo, parte do líquido (água mais detergente) para o tubo, onde será possível observar a formação de uma película de sabão que percorrerá o volume (V) da tubulação em um tempo (t).

Assim, tendo-se o conhecimento do volume do tubo e do tempo de enchimento, encontra-se a vazão de biogás.

Para se calcular o volume do tubo, é necessário, primeiramente, calcular a área da seção circular do tubo por meio da equação de número 2, que calcula a seção circular do tubo.

$$A = \pi \left(\frac{\Phi}{2}\right)^2 \quad \text{EQUAÇÃO 2}$$

em que:

A= área da seção circular do tubo em mm²;

Φ = diâmetro do tubo.

Sabendo-se a área da seção circular do tubo, pode-se calcular o volume da tubulação por meio da equação de número 3.

$$V = A * h \quad \text{EQUAÇÃO 3}$$

em que:

V= volume da tubulação em mL;

A= área da seção circular do tubo em mm²;

h= comprimento da tubulação em mm.

3.3.2. Desenvolvimento do Circuito de Medições de Temperatura e Pressão

No circuito, foram utilizados os componentes abaixo mencionados:

- display LCD Nokia 5110;
- arduino Nano v3.0;
- sensor de temperatura e pressão BMP180.

3.3.2.1. Display LCD Nokia 5110

O display possui uma resolução de 84x48 pixels, 1,6 pol. e backlight (luz de fundo) azul, com tensão de alimentação de 5 V.

3.3.2.2. Arduino Nano v3.0

Arduino é uma plataforma *open-source* (uso livre) de computação, baseada em uma placa e um ambiente de desenvolvimento. Ele pode ser utilizado para o desenvolvimento de objetivos interativos autônomos ou pode ser conectado a um software no computador. A linguagem de programação mais usada é a C/C++.

3.3.2.3. Sensor de Temperatura e Pressão BMP180

O sensor Bmp180 tem capacidade de medir a temperatura e pressão atmosférica. Pode medir uma faixa de 225-825 mmHg com corrente de até 5 μ A e tensão entre 1,8 e 3,6 V.

Para se fazer a leitura, captam-se os dados referentes à temperatura, pressão e umidade do local. Para a confecção do módulo leitor, são necessários:

3.3.2.4. Circuito de Temperatura e Pressão

A montagem do sistema de temperatura e pressão consiste, primeiramente, na ligação dos componentes acima relacionados, em que são utilizadas cinco entradas do arduino para ligação com o display. No sensor BMP180, são usadas duas entradas para conectá-lo ao arduino.

A energização do sistema é feita individualmente em cada componente com uma tensão máxima de 3.6 V no sensor e de 5 V no arduino.

O funcionamento consiste no recebimento das informações da temperatura e da pressão ambiente através de sensores piezoresistivos com sinal analógico (pulsos eletromagnéticos), por meio do sensor BMP180, que transmite as informações ao arduino. Essas informações são processadas para o programa inserido no arduino, que então as transfere para o display, e, assim, o usuário visualiza os dados de temperatura e pressão do ambiente.

3.4. Procedimento de Leitura do Biogás

Foram realizadas, no total, 20 medições em cada um dos nove drenos da região delimitada do aterro. Na obtenção de melhores resultados, as medições foram feitas em diferentes dias, com o intuito de obter medidas alternadas de temperatura e pressão. O tempo médio para a medição de cada dreno foi de aproximadamente 4,44 min.

As leituras foram realizadas, utilizando-se um lisímetro. Na base do lisímetro, era acoplada uma bexiga, que era manualmente pressionada com a passagem do biogás.

Também a pressão e temperatura de cada amostragem eram medidas, colocando-se o circuito de temperatura e pressão na base da chaminé do dreno.

As etapas para a realização das medições foram:

- primeira etapa: foram medidas a temperatura e pressão através do circuito de T e P;
- segunda etapa: foi colocada uma vedação com material emborrachado, na saída do dreno (chaminé), com uma perfuração central para colocação da mangueira de 3/8" cuja função era de transportar o gás do interior da vala para o lisímetro;
- terceira etapa: esperaram-se aproximadamente 40 min. - tempo necessário para se iniciar a vazão dos drenos para a mangueira do lisímetro;
- quarta etapa: a mangueira foi acoplada à conexão em T do lisímetro para se realizar a medição;
- quinta etapa: o balão elástico (bexiga, na base do lisímetro onde havia água e detergente) era bombeado manualmente durante o tempo em que o gás era arrastado pela camada de sabão no tubo do lisímetro;
- sexta etapa: com o auxílio de um cronômetro, foi mensurado o tempo em que o gás era arrastado pela camada de sabão no tubo do lisímetro até que o mesmo percorresse os 150 mm delimitados para a medição.

A partir do momento em que a camada de sabão percorria o tubo, iniciava-se a medição do tempo, até que a camada atingisse o percurso delimitado de 150 mm de altura do tubo, cujo diâmetro era de 35 mm. Assim, tendo-se essas informações de tempo e calculando-se o volume pela equação 3, pode-se calcular a vazão do biogás, por meio da equação 4.

3.4.1. Medições da Vazão do Biogás

O biogás foi calculado a partir da equação de número 4.

$$Q_{biogás} = \frac{V}{t} \quad \text{EQUAÇÃO 4}$$

em que:

$Q_{biogás}$ = vazão do biogás em $mlmin^{-1}$;

V = volume da tubulação em ml;

t = tempo médio em minutos.

3.4.2. Cálculo da Vazão Corrigida

Como um gás é compressível, o seu volume varia de acordo com a pressão e/ou a temperatura; uma vazão volumétrica, expressa em qualquer unidade (por exemplo, em m^3h^{-1}), não informa qual a massa de gás que está sendo movimentada. Assim, a vazão deve vir acompanhada das leituras da pressão e da temperatura do gás.

Para se contornar esse problema, facilitando-se a comparação entre vazões, foi convencionada uma condição padrão “Normal”. A vazão volumétrica, medida nessa condição Normal, é expressa em N junto à medida da vazão, como Nm^3h^{-1} , o que mostra que foram feitas nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP).

A condição padrão normalmente utilizada é:

- 1,013 Bar de pressão (1 atm);
- 20° graus Celsius de temperatura;

Assim, 1 Nm^3 de ar comprimido é 1m^3 de ar a uma pressão de $100\text{Kpa} = 1\text{ atm}$ e a 20°C (293 K).

Obtida a vazão de biogás ($Q_{\text{biogás}}$), a próxima etapa foi o cálculo da vazão corrigida de biogás, quando serão inseridos os valores da vazão de biogás, a temperatura corrigida para graus Kelvin e a pressão corrigida para mmHg, conforme a equação 5.

$$Q_{\text{biogás corrigida}} = Q_{\text{biogás}} * \left(\frac{P_{\text{ambiente}}}{P_{\text{padrão}}} \right) * \left(\frac{T_{\text{padrão}}}{T_{\text{ambiente}}} \right) \quad \text{EQUAÇÃO 5}$$

em que:

$Q_{\text{biogás corrigida}}$: vazão do biogás corrigida em NmLmin^{-1} ;

$Q_{\text{biogás}}$: vazão do biogás em mlmin^{-1} ;

P_{ambiente} : pressão ambiente em milímetros de mercúrio (mmHg);

$P_{\text{padrão}}$: pressão padrão em milímetros de mercúrio (760 mmHg);

T_{ambiente} : temperatura ambiente em grau Kelvin (K);

$T_{\text{padrão}}$: temperatura padrão em grau Kelvin (273,15 K).

4 ARTIGO

QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE BIOGÁS EM UM ATERRO SANITÁRIO LOCALIZADO NA REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ

QUANTIFICATION OF BIOGAS EMISSIONS AT A LANDFILL LOCATED IN THE STATE OF PARANÁ NORTHWEST

Lieverthon Bianchi Gualda de Souza
Engenheiro de Controle e Automação-Mecatrônico
E-mail: li_thon@hotmail.com

Rosa Maria Ribeiro
Profa. Dra. em Engenharia Química
E-mail: rosa.ribeiro@unicesumar.edu.br

José Maurício Gonçalves dos Santos
Prof. Dr. em Zootecnia
E-mail: jose.santos@unicesumar.edu.br

RESUMO

Na sociedade, o consumismo impera de forma disseminada, sendo a correta destinação do lixo foco de muitos debates. Para tanto, há várias alternativas de estudo, como a mitigação dos resíduos, a reciclagem, a compostagem e/ou biodegração de material orgânico e a incineração em altas temperaturas. Contudo, a prática dessas alternativas ainda está muito aquém das necessidades, levando um volume muito grande desses materiais a serem depositados como lixo nos aterros sanitários. Diante desse fato, este trabalho se propôs a quantificar o biogás gerado em um aterro localizado na região Noroeste do Estado do Paraná. Assim, foi efetuada uma qualificação dos resíduos, constatando-se que não há uma coleta seletiva dos dejetos que chegam ao aterro sanitário; também foi realizada uma estimativa do volume do biogás, utilizando-se um lisímetro, em amostragens de campo, dos quais se obteve a vazão do biogás nos nove drenos da área delimitada pelo aterro, estimado para o ano de 2015, e que resultaram em 139 m³. Foi realizada também uma estimativa por meio do método matemático de LandGEM, em que foram obtidos dados em forma de estimativas do período em que o biogás ainda será gerado no aterro, isto é, até meados de 2151, bem como o ano de máxima produção do gás no aterro que é 2016. Concluiu-se que é necessário que haja um gerenciamento adequado dos resíduos que chegam ao aterro sanitário, pois, dessa forma, haverá maior aproveitamento dos resíduos, possibilitando-se a priorização eficaz no gerenciamento dos resíduos. E como consequência, a quantidade de material não orgânico seria significativamente reduzida, o que acarretaria numa decomposição dos resíduos de forma mais rápida e eficiente, incrementando a produção do biogás no aterro sanitário. E em se implantando tecnologias, o biogás poderia ser aproveitado para a geração de energia elétrica, o que traria redução da emissão do CO₂, com a possibilidade de lhe se aferido créditos de carbono.

PALAVRAS-CHAVE: gás metano, matéria orgânica, resíduos sólidos, aterro sanitário

ABSTRACT

In society, consumerism reigns of disseminated form, being the correct garbage disposal focus of many debates. For both, there are several alternatives, such as the mitigation of waste, recycling, composting and/or

biodegradation of organic material and the incineration at high temperatures. However, the practice of these alternatives is still far short of needs, taking a lot of these materials to be deposited as garbage in landfills. Ahead of this fact, this work set out to quantify the biogas generated in a landfill located in the Northwest of the State of Paraná. Thus was made a qualification of waste, noting that there is a selective collection of waste products that reach the landfill; was also carried out an estimate of the volume of biogas, using a lysimeter, in field sampling, which obtained the biogas flow in nine drains the area bounded by the landfill, estimated for the year 2015, and that resulted in 139 m³. Was also carried estimated by the mathematical method LandGEM, wherein the form of data estimates were obtained for the period where the biogas is still generated in landfills, that is, until the mid 2151 as well as year of maximum production the landfill gas that is 2016. It was concluded that there needs to be a proper management of waste arriving at the landfill, because, that way, there will be greater utilization of waste, enabling-if effective prioritization of waste management. And as a result, the amount of inorganic material would be significantly reduced, which would result in decomposition of waste faster and more efficiently, increasing the production of biogas in the landfill. And if deploying technologies, biogas could be used to generate electricity, which would reduce the emission of CO₂, with the possibility of it if measured carbon credits.

KEYWORDS: *Gas methane. Organic matter. Solid waste. Landfill*

INTRODUÇÃO

Na sociedade do século XXI, o consumismo impera de forma disseminada, independentemente da situação econômica, tanto em países desenvolvidos como nos considerados subdesenvolvidos.

Esse quadro teve início com a Revolução Industrial, em que se buscava o desenvolvimento tecnológico, sem haver foco no lado ambiental. O lixo produzido não era reconhecido como um agravante ao meio ambiente e o usual era sua deposição em lixões a céu aberto.

Atualmente, a destinação do lixo tem sido foco de muitos debates, o que levou à aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, com enfoque na coleta seletiva e nos aterros sanitários (FREITAS; LEITE, 2014). Assim, várias alternativas têm sido estudadas e colocadas em prática, como a mitigação dos resíduos, a reciclagem, a compostagem e/ou biodegração de material orgânico e a incineração em altas temperaturas. Contudo a prática dessas alternativas ainda está muito aquém das necessidades; um volume muito grande de materiais que poderiam ter uma destinação mais adequada, tem sido depositado como lixo nos aterros sanitários.

Segundo Fernandes (2009), o aterro sanitário é uma das principais formas de disposição de resíduos no mundo. Os RSU, como são comumente chamados os resíduos sólidos urbanos, quando depositados nesse local, entram em decomposição, gerando o biogás, que, em sua composição, contém gases que podem afetar diretamente o meio ambiente (DEMAJOROVIC, 1995).

Resíduos Sólidos (RSU), segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 10.0004: resíduos sólidos, são definidos da seguinte maneira:

Resíduos nos estados sólidos e semissólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também, resíduo sólido os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou

exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004, p. 1).

Dessa forma, faz-se necessário um controle gerencial desses RSU. O gerenciamento integrado desses resíduos deve ser realizado com a participação de diferentes órgãos da administração pública e da sociedade civil, com o objetivo de promover a limpeza urbana, coleta, tratamento e disposição final do lixo, proporcionando melhor qualidade de vida à população, elevando a higiene e limpeza do município, analisando os aspectos das características das fontes de produção, volume, tipo de resíduo, características sociais, culturais, demográficas e econômicas dos cidadãos, climáticas e urbanísticas (ZANTA; FERREIRA, 2003).

O conhecimento da quantidade produzida, bem como das características físicas e químicas dos resíduos, faz-se necessário no intuito de direcionar e planejar os sistemas de gerenciamento dos resíduos (LANGE *et al.*, 2002). Para Fernandes (2009), o conhecimento da composição gravimétrica dos resíduos é de extrema importância no entendimento da formação do biogás. Este varia de acordo com a porcentagem de materiais aterrados e com o grau de degradação, tendo em vista que o biogás é proveniente da biodegradação dos resíduos por meio dos microrganismos.

A eficiência de um gerenciamento integrado de resíduos sólidos deve se basear no uso de práticas administrativas de resíduos, que é a participação efetiva da comunidade, instruída na colaboração de limpeza das ruas, reduzindo o descarte, reaproveitando e reciclando os materiais para, depois, dirigi-los ao lixo, além do manejo seguro e efetivo fluxo de RSU, atingindo o mínimo de impactos sobre a saúde pública e meio ambiente (RIBEIRO; LIMA, 2000).

Pode-se inferir que, a partir da geração de RSU, deve-se realizar uma coleta domiciliar, posteriormente, o transporte dos resíduos e, por fim, a sua disposição final no aterro sanitário, pois resíduo tem sido sempre sinônimo daquilo que possa ser descartado, sem agregar qualquer valor econômico. Nos últimos anos, essa concepção mudou de foco e hoje o resíduo é visto como um subproduto do produto principal de qualquer atividade. A matéria orgânica presente nos RSU, ao sofrer uma decomposição anaeróbica, encerrada em um aterro, liberará o biogás.

O biogás é composto principalmente por gás metano (CH_4) em maior proporção e por dióxido de carbono (CO_2), além de outros gases em concentrações menores (DEGANUTTI *et al.*, 2002). Segundo Fernandes (2009), a emissão descontrolada desses gases pode acarretar em grave problema de poluição atmosférica local e global e precisa ser mitigada. Os efeitos da liberação dos gases localmente variam do simples mau odor até possíveis doenças cancerígenas na comunidade circunvizinha ao aterro. Em relação à poluição atmosférica global, o principal efeito da liberação do biogás é o aquecimento do globo terrestre que vem gerando grandes discussões nos últimos anos. O gás metano é o segundo maior contribuinte para o aquecimento global, atrás apenas do dióxido de carbono entre as emissões de gases do efeito estufa.

Estima-se que o metano (CH_4) seja aproximadamente 25 vezes mais prejudicial que o CO_2 no aprisionamento de calor na atmosfera. Porém o gás metano pode ser utilizado como matéria prima energética, pois possui alto poder energético, o que o torna uma excelente alternativa na produção de energia, seja elétrica, calorífica ou como combustível (WORLD BANK, 2015).

Assim, para se dimensionar a quantidade do biogás emitido, este projeto se propôs a realizar um levantamento de dados com as estimativas de emissões de biogás no aterro sanitário localizado na região Noroeste do Estado do Paraná.

OBJETIVOS

Realizar um levantamento da emissão de biogás em um aterro sanitário situado na região Noroeste do Estado do Paraná; por meio do método matemático de LandGEM, obter uma estimativa teórica e, com o desenvolvimento de um lisímetro, estimar na prática a geração do biogás gerado no referido aterro.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização do local de estudo

O aterro sanitário está localizado na região Noroeste do Estado do Paraná, na altitude de 555 m em relação ao nível do mar, cujo clima é subtropical temperado, com temperatura média anual de 22°C e a média pluviométrica anual de 1.590 ml (SANTOS, 2003).

Encontra-se em uma propriedade particular de uma empresa da região, sendo um local permitido e legalizado para execução das atividades de um aterro sanitário, e está dentro das adequações quanto às distâncias de núcleos habitacionais e de corpos d'água, além de estar isolado do visual da população, como deve ser um aterro Sanitário. A área onde foram realizadas as medições esteve em funcionamento durante três anos, de 2011 a 2013.

No acesso ao bairro, há placas que sinalizam a localização do aterro; o mesmo conta com portaria/guarita e com vigilantes (dois funcionários), que monitoram a entrada e saída dos veículos no local, garantindo segurança e boa conduta do local quanto aos trabalhadores e visitantes.

Os caminhões que atuam na coleta do lixo e na deposição do mesmo no aterro sanitário são pertencentes à Prefeitura da cidade, no total, são 37 veículos, que perfazem três viagens por dia. Há outros dez caminhões que atuam como grandes geradores, responsáveis pela coleta do lixo das empresas. O descarregamento do lixo no aterro é realizado por dois funcionários da Prefeitura, responsáveis pela coleta do lixo, cuja organização é realizada por cinco funcionários, sendo três operadores de máquinas e dois catadores. E, atuando na inspeção do tratamento do chorume, são dois funcionários.

A Figura 1 mostra uma imagem fotográfica de satélite da região do aterro sanitário da região Noroeste do Estado do Paraná com seus respectivos drenos numerados de 1 a 9 (GOOGLE EARTH, 2014).



FIGURA 1 – Imagem fotográfica de satélite da região do aterro sanitário da região Noroeste do Estado do Paraná com seus respectivos drenos numerados de 1 a 9

Método matemático de LandGEM – Versão 3.02 da *United States Environment Protection Agency* – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)

No aterro foram utilizados métodos matemáticos teóricos para a estimativa anual da produção do biogás.

Por meio do modelo utilizado, foi possível construir uma curva de geração do biogás que prediz a geração do gás por determinado período. A produção total de gás e a taxa com que será gerado variam de acordo com os parâmetros similares de entrada, tais como: a quantidade de RSU aterrada, o tempo de atividade do aterro, o potencial de geração do metano e a taxa de geração do metano.

Programa LandGEM – Versão 3.02

O LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model* – Modelo de Emissão de Gases em Aterros Sanitários) é um programa que estima a quantidade de biogás gerado em aterros e suas variações ao longo de determinado período de tempo. O modelo realiza o cálculo da emissão de gás metano e de outros 49 componentes. Esse modelo utiliza uma equação 1 de primeira ordem para estimar as emissões do biogás (EPA, 2005).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad \text{EQUAÇÃO 1}$$

em que:

Q_{CH_4} = geração anual de metano para o ano calculado (m^3ano^{-1});

i = anos escolhidos para se realizar o cálculo;

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

$j = 0,1$ – acréscimo por ano;

k = taxa de geração de metano (ano^{-1});

L_0 = potencial de geração de metano (m^3t^{-1});

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

t_{ij} = ano, em cada seção, de recebimento da massa de resíduos (tempo, ex.: 3,2 anos).

Com o software, é possível utilizar dados específicos de um aterro para se estimar as emissões, na ausência de dados específicos.

O LandGEM possui dois tipos de parâmetros padrão, para se realizar o cálculo da geração de metano, que são o AP42 (*Compilation of Air Pollutant Emission Factors*) e o CCA (*Clean Air Act*). Os parâmetros dos quais o programa se utiliza para perfazer os cálculos em um aterro convencional são:

- CCA: são usados $170 \text{ m}^3\text{CH}_4\text{t}^{-1}$ RSU para o cálculo de L_0 ; e, para se calcular o k , usa-se $0,05 \text{ (ano}^{-1}\text{)}$;
- AP42: são usados $100 \text{ m}^3\text{CH}_4\text{t}^{-1}$ RSU para se determinar L_0 ; e, para se calcular o k , $0,04 \text{ (ano}^{-1}\text{)}$.

Os parâmetros L_0 e k são os mais importantes para a equação (1), pois podem sofrer alterações de acordo com o local, clima, tipo de resíduos, entre outros. Na teoria, k varia entre 0,003 a 0,21 (ano^{-1}), contudo, nos padrões brasileiros, o fator é aplicado a 0,05 até 0,15. Já L_0 está proporcionalmente relacionado à quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos e pode variar de 0 (ausência de material orgânico) até $300 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$. No Brasil, metade dos RSU são constituídos de matéria orgânica, para L_0 , esse valor pode variar de 140 a $190 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ (CEPEA, 2004).

É sabido que a decomposição dos RSU é até cinco vezes mais rápida em climas tropicais úmidos do que o que preveem os modelos de primeira ordem, quando adotados os parâmetros padrão Maciel e Jucá (2011).

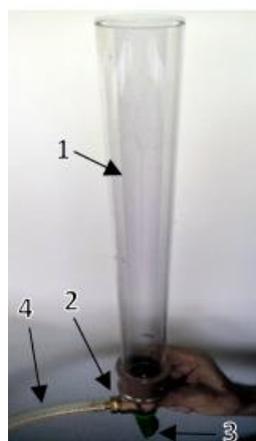
Segundo Scharff e Jacobs (2006), a desvantagem do LandGEM é que não há diferença no teor da matéria orgânica, pois, nesse modelo, todos os resíduos são considerados RSM (Resíduos Sólidos Municipais). No entanto o LandGEM leva em consideração a degradação dos resíduos depositados ao longo do tempo que não acaba de uma vez, pois considera que a fração orgânica dos resíduos, depositada no primeiro ano do aterro, continuará se degradando, somando-se ao valor da emissão os resíduos que forem sendo depositados.

Projeção das Emissões do Biogás em Campo

As investigações de campo se deram para se estimar as vazões de biogás que são emitidas pelos drenos localizados na região do aterro e para se avaliar a quantidade de gás metano presente no biogás. Nas amostragens de campo, foram utilizados equipamentos que fornecem dados referentes à vazão (lisímetro), temperatura e pressão ambiente (circuito de T e P) na área do aterro sanitário.

Desenvolvimento do Lisímetro

O lisímetro é um instrumento de simples construção e de uso. Para compô-lo, foram utilizados os seguintes materiais: uma mangueira de 3/8", uma conexão em T para gás, um balão elástico (bexiga) com detergente e água misturados e um tubo de vidro com capacidade de 144,32 ml. A seguir, a Figura 2 mostra o lisímetro utilizado no experimento de campo (fonte: do arquivo do autor).



- 1 - Tubo
- 2 - Conexão em T
- 3 - Balão
- 4 - Mangueira 3/8"

FIGURA 2 – Lisímetro

A função do lisímetro é realizar a medição da vazão de biogás através dos drenos, nos quais o biogás incidirá sobre a mangueira de 3/8", percorrendo todo o trajeto até chegar à conexão em T.

Nessa etapa, o balão com água e detergente é bombeado; assim, à medida que o biogás passa pela conexão, carrega, consigo, parte do líquido (água mais detergente) para o tubo, onde será possível observar a formação de uma película de sabão que percorrerá o volume (V) da tubulação em um tempo (t).

Assim, tendo-se o conhecimento do volume do tubo e do tempo de enchimento, encontra-se a vazão de biogás.

Para se calcular o volume do tubo, é necessário, primeiramente, calcular a área da seção circular do tubo por meio da equação de número 2, que calcula a seção circular do tubo.

$$A = \pi \left(\frac{\Phi}{2} \right)^2 \quad \text{EQUAÇÃO 2}$$

em que:

A= área da seção circular do tubo em mm²;

Φ = diâmetro do tubo.

Sabendo-se a área da seção circular do tubo, pode-se calcular o volume da tubulação por meio da equação de número 3.

$$V = A * h \quad \text{EQUAÇÃO 3}$$

em que:

V= volume da tubulação em mL;

A= área da seção circular do tubo em mm²;

h= comprimento da tubulação em mm.

Desenvolvimento do Circuito de Medições de Temperatura e Pressão

No circuito, foram utilizados os componentes abaixo mencionados:

- display LCD Nokia 5110;
- arduino Nano v3.0;
- sensor de temperatura e pressão BMP180.

Display LCD Nokia 5110

O display possui uma resolução de 84x48 pixels, 1,6 pol. e backlight (luz de fundo) azul, com tensão de alimentação de 5 V.

Arduino Nano v3.0

Aduno é uma plataforma *open-source* (uso livre) de computação, baseada em uma placa e um ambiente de desenvolvimento. Ele pode ser utilizado para o desenvolvimento de objetivos interativos autônomos ou pode ser conectado a um software no computador. A linguagem de programação mais usada é a C/C++.

Sensor de Temperatura e Pressão BMP180

O sensor Bmp180 tem capacidade de medir a temperatura e pressão atmosférica. Pode medir uma faixa de 225-825 mmHg com corrente de até 5 μA e tensão entre 1,8 e 3,6 V.

Para se fazer a leitura, captam-se os dados referentes à temperatura, pressão e umidade do local. Para a confecção do módulo leitor, são necessários:

Circuito de Temperatura e Pressão

A montagem do sistema de temperatura e pressão consiste, primeiramente, na ligação dos componentes acima relacionados, em que são utilizadas cinco entradas do arduino para ligação com o display. No sensor BMP180, são usadas duas entradas para conectá-lo ao arduino.

A energização do sistema é feita individualmente em cada componente com uma tensão máxima de 3.6 V no sensor e de 5 V no arduino.

O funcionamento consiste no recebimento das informações da temperatura e da pressão ambiente através de sensores piezoresistivos com sinal analógico (pulsos eletromagnéticos), por meio do sensor BMP180, que transmite as informações ao arduino. Essas informações são processadas para o programa inserido no arduino, que então as transfere para o display, e, assim, o usuário visualiza os dados de temperatura e pressão do ambiente.

Procedimento de Leitura do Biogás

Foram realizadas, no total, 20 medições em cada um dos nove drenos da região delimitada do aterro. Na obtenção de melhores resultados, as medições foram feitas em diferentes dias, com o intuito de obter medidas alternadas de temperatura e pressão. O tempo médio para a medição de cada dreno foi de aproximadamente 4,44 min.

As leituras foram realizadas, utilizando-se um lisímetro. Na base do lisímetro, era acoplada uma bexiga, que era manualmente pressionada com a passagem do biogás.

Também a pressão e temperatura de cada amostragem eram medidas, colocando-se o circuito de temperatura e pressão na base da chaminé do dreno.

As etapas para a realização das medições foram:

- primeira etapa: foram medidas a temperatura e pressão através do circuito de T e P;
- segunda etapa: foi colocada uma vedação com material emborrachado, na saída do dreno (chaminé), com uma perfuração central para colocação da mangueira de 3/8" cuja função era de transportar o gás do interior da vala para o lisímetro;
- terceira etapa: esperaram-se aproximadamente 40 min. - tempo necessário para se iniciar a vazão dos drenos para a mangueira do lisímetro;
- quarta etapa: a mangueira foi acoplada à conexão em T do lisímetro para se realizar a medição;
- quinta etapa: o balão elástico (bexiga, na base do lisímetro onde havia água e detergente) era bombeado manualmente durante o tempo em que o gás era arrastado pela camada de sabão no tubo do lisímetro;
- sexta etapa: com o auxílio de um cronômetro, foi mensurado o tempo em que o gás era arrastado pela camada de sabão no tubo do lisímetro até que o mesmo percorresse os 150 mm delimitados para a medição.

A partir do momento em que a camada de sabão percorria o tubo, iniciava-se a medição do tempo, até que a camada atingisse o percurso delimitado de 150 mm de altura do tubo, cujo diâmetro era de 35 mm. Assim, tendo-se essas informações de tempo e calculando-se o volume pela equação 3, pode-se calcular a vazão do biogás, por meio da equação 4.

Medições da Vazão do Biogás

O biogás foi calculado a partir da equação de número 4.

$$Q_{biogás} = \frac{V}{t} \quad \text{EQUAÇÃO 4}$$

em que:

$Q_{\text{biogás}}$ = vazão do biogás em mlmin^{-1} ;

V = volume da tubulação em ml;

t = tempo médio em minutos.

Cálculo da Vazão Corrigida

Como um gás é compressível, o seu volume varia de acordo com a pressão e/ou a temperatura; uma vazão volumétrica, expressa em qualquer unidade (por exemplo, em m^3h^{-1}), não informa qual a massa de gás que está sendo movimentada. Assim, a vazão deve vir acompanhada das leituras da pressão e da temperatura do gás.

Para se contornar esse problema, facilitando-se a comparação entre vazões, foi convencionada uma condição padrão "Normal". A vazão volumétrica, medida nessa condição Normal, é expressa em N junto à medida da vazão, como Nm^3h^{-1} , o que mostra que foram feitas nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP).

A condição padrão normalmente utilizada é:

- 1,013 Bar de pressão (1 atm);

- 20° graus Celsius de temperatura;

Assim, 1 Nm^3 de ar comprimido é 1 m^3 de ar a uma pressão de 100Kpa = 1 atm e a 20°C (293 K).

Obtida a vazão de biogás ($Q_{\text{biogás}}$), a próxima etapa foi o cálculo da vazão corrigida de biogás, quando serão inseridos os valores da vazão de biogás, a temperatura corrigida para graus Kelvin e a pressão corrigida para mmHg, conforme a equação 5.

$$Q_{\text{biogás corrigida}} = Q_{\text{biogás}} * \left(\frac{P_{\text{ambiente}}}{P_{\text{padrão}}} \right) * \left(\frac{T_{\text{padrão}}}{T_{\text{ambiente}}} \right) \quad \text{EQUAÇÃO 5}$$

em que:

$Q_{\text{biogás corrigida}}$: vazão do biogás corrigida em NmLmin^{-1} ;

$Q_{\text{biogás}}$: vazão do biogás em mlmin^{-1} ;

P_{ambiente} : pressão ambiente em milímetros de mercúrio (mmHg);

$P_{\text{padrão}}$: pressão padrão em milímetros de mercúrio (760 mmHg);

T_{ambiente} : temperatura ambiente em grau Kelvin (K);

$T_{\text{padrão}}$: temperatura padrão em grau Kelvin (273,15 K).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são descritas as características dos RSU que chegam ao aterro sanitário, bem como a proporção de cada resíduo na quantidade total que adentra no local. São apresentados os dados da produção do biogás, referentes às medições de vazão realizadas nos drenos do aterro sanitário, bem como a temperatura e pressão ambiente. Também, apresentados os dados das estimativas de produção do biogás ao longo dos anos e os períodos de máxima produção do biogás no local por meio do modelo matemático de LandGEM.

Características dos RSU do Aterro Sanitário da Região Noroeste do Estado do Paraná

Os dados referentes à composição qualitativa em base úmida dos resíduos da cidade, de onde os resíduos são enviados ao aterro em estudo, estão elencados na Figura 3 (do arquivo do autor).

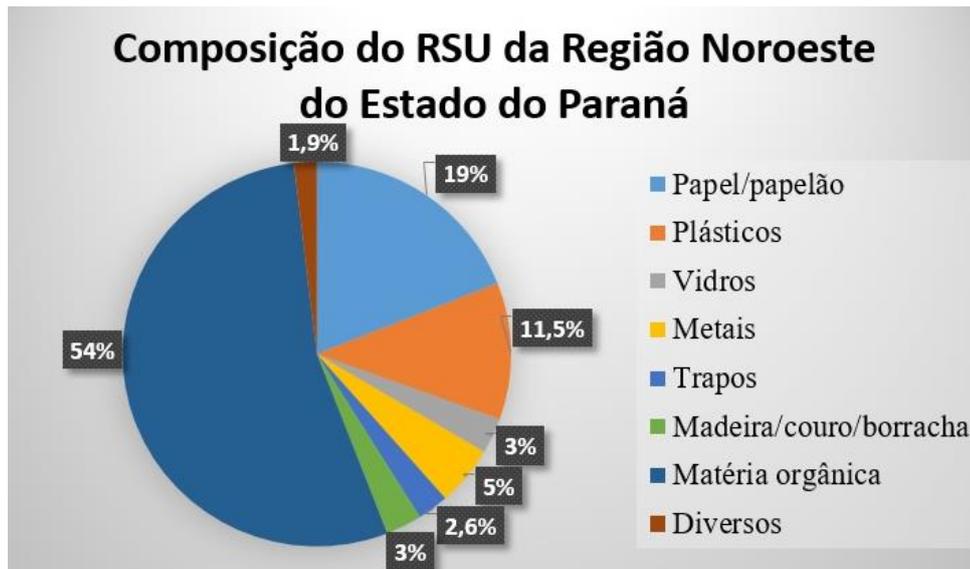


FIGURA 3 – Composição gravimétrica dos RSU que chegam ao aterro sanitário da região Noroeste do Estado do Paraná

Por meio da Figura 3, visualiza-se que não há uma coleta seletiva dos resíduos que chegam ao aterro sanitário deste estudo. Contudo, ao se comparar o resultado obtido referente à quantidade de matéria orgânica, 54%, com a média nacional de 51,4%, descrita pelo IBGE (2010) e citado por Brasil (2012), é fato que a composição gravimétrica obtida neste trabalho está acima da média nacional, o que representa um índice bastante positivo.

Pode ser feito um paralelo da composição dos RSU entre este projeto, com os de outros autores, todos realizados em um aterro sanitário.

Com base nos dados obtidos por Barros Júnior, Tavares e Barros (2003), na mesma região é possível observar que, assim como os resultados relacionados à composição gravimétrica dos RSU que chegam ao aterro sanitário em estudo, para o ano de 2015, em 2003, também não havia uma coleta seletiva dos resíduos que eram depositados no aterro. Comparando-se os resíduos provenientes da matéria orgânica, que são os principais responsáveis pela geração do biogás neste trabalho e no de Barros Júnior, Tavares e Barros (2003), observa-se que, em ambos os trabalhos, a quantidade material orgânico supera os 50% – neste trabalho, 54%, e 52,16% no de Barros Júnior, Tavares e Barros (2003), fator importante para a biodegradação e, conseqüentemente, geração do biogás. Contudo é importante ressaltar que, em ambos os trabalhos, a quantidade de resíduo de plástico possui um percentual bastante elevado – 11,5% neste trabalho e 13,48% no de Barros Júnior, Tavares e Barros (2003) –, havendo uma redução de quase 15% de 2003 para 2015, resultado pouco satisfatório, visto que o plástico é um material de lenta biodegradação, o que certamente retarda o tempo de geração do biogás.

No trabalho de Ferreira, Cruvinel e Costa (2014), fazendo um estudo em Santo Antônio do Goiás, cuja composição gravimétrica mostra que não há uma coleta seletiva dos resíduos que chegam ao aterro sanitário da cidade. Dos resíduos que adentram ao local, a grande maioria é de tecido, que, em média, demora em torno de 30 anos para se decompor. Outro resíduo que também aparece em grande quantidade é o plástico, como segundo maior na quantidade total, e que demora, em média, mais de 100 anos para se decompor. Esses dados demonstram que não há uma coleta seletiva no aterro sanitário, como também a taxa de geração de biogás está sendo diretamente afetada pelos resíduos não orgânicos que estão sendo aterrados. Já os resíduos de material orgânico, que deveriam estar em maior quantidade, representam apenas a quarta posição em quantidade de resíduos aterrados, com 11,25% do percentual total, uma diferença de 42,75% em relação ao valor obtido neste trabalho.

No trabalho realizado por Sevaios *et al.* (2014), também não se observou uma coleta seletiva em regiões da CTR-Central de Tratamento de Resíduos de Caieiras da cidade de São Paulo e algumas cidades da região

metropolitana, sendo a composição gravimétrica média de 47% dos resíduos de origem orgânica. Com relação aos números obtidos neste trabalho, a quantidade de material orgânica representa 54%, havendo uma diferença positiva de 7% entre os resultados.

Fazendo um paralelo entre os 3 trabalhos expostos acima, com o deste projeto, tem-se nos quatro, a mesma singularidade – em nenhum deles há uma coleta seletiva dos resíduos que adentram ao aterro sanitário. E, calculando-se a média de material orgânico dos trabalhos, obtém-se o valor de 41,1% que, comparado à média nacional de 51,4%, descrita pelo IBGE (2010) e citada por Brasil (2012), caracteriza-se num valor bastante abaixo da média nacional, com uma diferença de 10,3%. E quando se analisa os resultados deste projeto isoladamente, o valor foi de 54%.

Com relação aos valores percentuais de matéria orgânica dos quatro trabalhos, tem-se um desvio padrão de 20,12; com um coeficiente de variação de 48,95% que representa um percentual acima do padrão ($\geq 25\%$) no comparativo entre os quatro trabalhos, o que demonstra que deve haver mais incentivos dos órgãos públicos para um gerenciamento adequado dos resíduos que têm como destino final o aterro sanitário.

Modelos de Geração de Biogás

Segundo informações obtidas no aterro sanitário estudado, o local recebeu resíduos durante três anos – 2011 a 2013. A partir desses dados, utilizando-se o modelo de LandGEM, foi possível traçar uma estimativa das emissões de biogás no aterro e calcular por quanto tempo ele ainda será emitido.

Cálculo Teórico – Programa LandGEM

Por meio do LandGEM, foi possível obter os dados de emissões de biogás a partir dos dados inseridos no programa, tais como: o ano em que o aterro esteve ativo e o ano em que foi desativado; a capacidade do aterro, ou seja, a quantidade total de lixo que o local recebeu nos anos de funcionamento. O programa mostra as emissões em metros cúbicos em forma de estimativas do período em que o biogás ainda será gerado, como também, o período de máxima produção no aterro sanitário. Na Figura 4, é possível visualizar essas estimativas.



FIGURA 4 – Estimativas das emissões de biogás por meio do programa de LandGEM

Observando a Figura 4, com os resultados obtidos por meio do programa de LandGEM, estima-se que o biogás será gerado no aterro sanitário até meados de 2151 e terá sua máxima produção em 2016.

Comparando-se o resultado obtido pelo programa de LandGEM, representado na Figura 4, com o resultado obtido pelo mesmo programa no trabalho realizado por Figueiredo (2012), chegam-se que as estimativas em

ambos os trabalhos são bem semelhantes, visto que, neste trabalho, o biogás será gerado de 2012 até 2151 (139 anos) e, no de Figueiredo (2012), será gerado de 2012 até 2148 (136 anos).

Outro dado que pode ser analisado é que, no trabalho de Figueiredo (2012), a estimativa de máxima produção, em meados de 2018, será seis anos após o início de funcionamento do aterro sanitário; já, neste trabalho, a estimativa de máxima produção, em 2016, será cinco anos após o início das atividades no local. Vale ressaltar que o aterro em estudo já encerrou as atividades, que se iniciaram em 2011 e finalizaram em 2013; já o aterro do estudo de Figueiredo (2012) também iniciou suas atividades em 2011, mas só encerrará suas atividades em 2030. Devido ao exposto, a estimativa obtida por meio de LandGEM, deve ser considerada apenas como aspecto de previsão de dados, uma forma de planejamento para medidas de aproveitamento do biogás gerado.

No trabalho realizado por Braga (2011), em que também se utilizou o método matemático de LandGEM, faz-se uma análise das estimativas de produção do biogás em três aterros sanitários, representados por A, B e C, respectivamente. Todos os três aterros obtiveram os mesmos resultados para as estimativas de produção do biogás, que se iniciou em 1998 e emitirá o gás até meados de 2138, ou seja, 140 anos, tendo sua máxima produção em 2011. Todos os aterros do trabalho de Braga (2011) iniciaram suas atividades em 1998 e encerraram em 2010, ou seja, 12 anos de recebimento de resíduos.

Num comparativo entre os dados obtidos neste trabalho, com o de Figueiredo (2012) e com o de Braga (2011), vê-se que, independentemente do tempo em que o aterro sanitário recebeu os resíduos, as estimativas do período remanescente de produção do biogás são bastante semelhantes, havendo um desvio padrão de 2,08 e um coeficiente de variação de 1,5%; já para o ano de máxima produção em relação ao ano de início de recebimento de resíduos nos aterros, o desvio padrão foi de 3,79 e o coeficiente de variação, de 49,43%. Isso significa que o desvio padrão está acima do padrão, que é de valores iguais ou menores de 25%.

Cálculos das Amostragens em Campo

De acordo com a área do aterro sanitário em estudo, que esteve ativo por um período de três anos (2011 a 2013) e que há dois está inativo, dados foram obtidos e estão disponíveis na Tabela 1, perfazendo nove pontos de amostragens nos drenos. A amostragem foi feita por meio de lisímetro, cujo volume foi quantificado de acordo com a equação número 3.

TABELA 1 – Dados obtidos dos drenos de 1 a 9 relativos à pressão, tempo e vazão do biogás gerado

Média das amostragens dos drenos	Temperatura ambiente (K)	Pressão ambiente (mmHg)	Tempo (minutos)	Vazão Biogás (mLmin ⁻¹)
1	297,7	744,95	4,46	32,32
2	298,1	747,35	4,43	32,54
3	296,6	744,55	4,41	32,70
4	298,5	749,83	4,45	32,45
5	296,6	743,14	4,43	32,45
6	295,9	741,83	4,48	32,45
7	294,4	742,33	4,48	32,46
8	300,3	753,35	4,47	32,45
9	299	751,23	4,38	32,45
Média	297,46	746,5	4,44	32,47
Desvio padrão	1,78	4,15	0,03	0,101
Coeficiente de Variação	0,60%	0,56%	0,68%	0,03%

Na Tabela 1, por meio do desvio padrão e da média das amostragens de cada um dos nove drenos, que o coeficiente de variação em todas as mensurações está abaixo de 1%, isso significa que há um padrão nas médias

de temperatura ambiente, pressão ambiente, tempo de medição e vazão do biogás em cada um dos drenos do aterro sanitário durante os meses de junho e julho.

Na Figura 5, tem-se uma representação gráfica da média de temperatura e pressão ambiente, respectivamente, em cada um dos nove drenos das amostragens em campo nos meses de junho e julho.

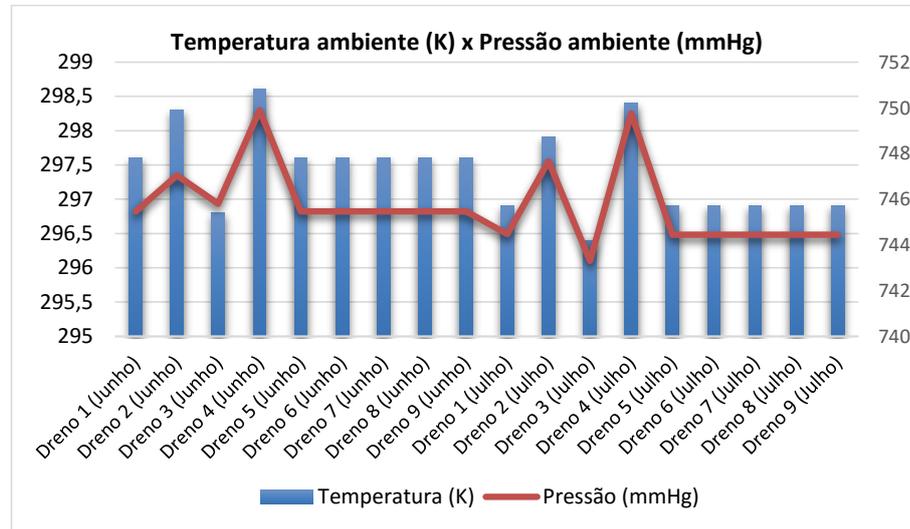


FIGURA 5 – Média de temperatura (K) x pressão (mmHg) nos meses de junho e julho em cada dreno. Analisando-se a Figura 5, cujas medições foram realizadas nos meses de junho e julho, períodos de temperaturas mais baixas, houve pouca variação da temperatura ambiente média, mantendo-se praticamente estável, com média bimensal de 297,46 graus Kelvin (24,46°C). Se comparado à temperatura média de 24,1°C registrada pelo CPTEC (2015) no mesmo período em que as medições deste trabalho foram realizadas, ou seja, junho e julho, observa-se uma diferença de 0,36°C, o que representa uma diferença praticamente imperceptível.

Já com relação à temperatura média anual da região, obtida por Santos (2003) e que é de 22°C, e a média de temperatura obtida neste trabalho nas medições realizadas nos meses de junho e julho de 24,46°C, tem-se, então, uma diferença de 2,46°C.

Comparando-se a temperatura média das medições deste trabalho, 24,46°C, às registradas pelo CPTEC (2015), 24,1°C, e Santos (2003), 22°C, o desvio padrão calculado é de 1,33, com um coeficiente de variação (CV) de 5,65%; o que representa um padrão nas temperaturas, pois o CV encontrado está dentro da margem ($\leq 25\%$) para um valor percentual padrão.

A pressão ambiente média, obtida nas medições deste trabalho, é de 746,5 mmHg. Já a média de pressão ambiente registrada pelo CPTEC (2015) foi de 757,56 mmHg. Como a altitude também interfere na pressão, também pode-se fazer um comparativo com relação à altitude da região, que é de 555 m. Assim, considerando-se a densidade do ar, $1,29 \text{ Kg m}^{-3}$, a gravidade igual a 10 ms^{-2} e a altitude de 555 m, obtém-se a pressão de 0,93 atm, que é igual a 705,6 mmHg. Assim, ao se comparar a média obtida nas medições em campo, a média teórica (calculada) da região e a média registrada pelo CPTEC (2015), tem-se um desvio padrão de 27,37 e um coeficiente de variação de 3,72%, o que significa que o desvio padrão é baixo, pois está dentro da conformidade ($\leq 25\%$).

Os dados da vazão obtidos, mostrados na Tabela 1, foram adequados para as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), usando-se a equação de número 5. Assim, foram determinados os valores da vazão do biogás corrigidos em $\text{Nm}^3\text{ano}^{-1}$, como mostra a Figura 6.

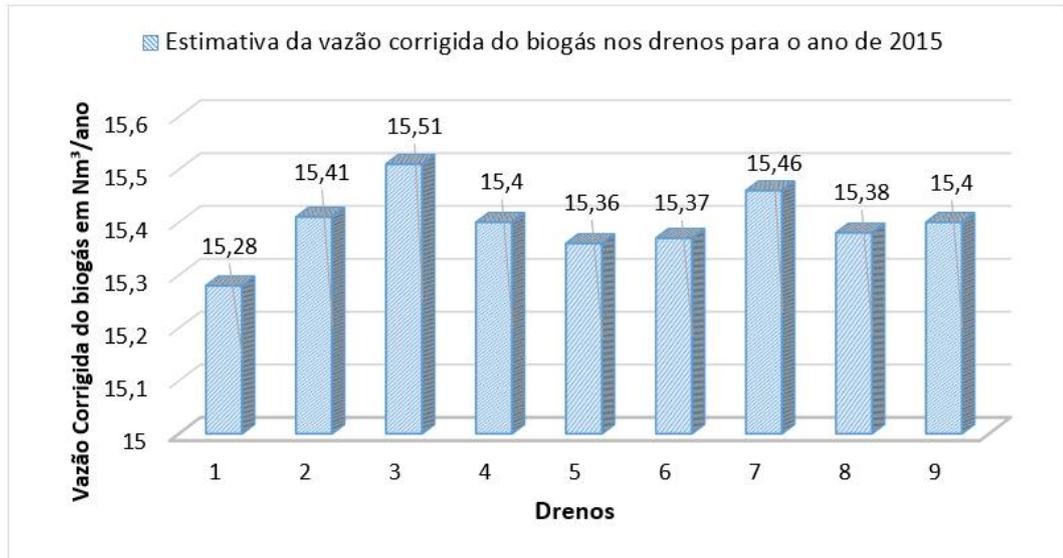


FIGURA 6 – Vazão corrigida do biogás em $\text{m}^3\text{ano}^{-1}$ nos drenos da região delimitada do aterro sanitário

Por meio da Figura 6, se forem somados os valores correspondentes aos nove drenos, obtém-se a estimativa da produção do biogás no aterro, para o ano de 2015, de **139 Nm^3** .

Em se fazendo uma analogia com outros autores que trabalharam com biodegradação de matéria orgânica, Silva (2012) trabalhando com 3 lisímetros (L1, L2 e L3) no aterro sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia-CE; cada um dos lisímetros operou com RSU distintos, isto é, em L1, RSU sem seleção; em L2, 50% matéria orgânica e 50% de RSU e em L3, 100% de matéria orgânica, e obteve com a somatória dos mesmos uma vazão média anual de 29, 28 m^3 ; neste projeto usando apenas um lisímetro obteve-se 139 m^3 ; esses materiais distintos usados em Silva (2012) podem ter ocasionado a diferença entre a produção de seu trabalho e o deste projeto.

E, analisando-se este projeto com relação a outros autores que trabalharam com biodigestores, pode-se dizer que a produção de biogás encontrada neste projeto é compatível com a encontrada por Oliveira (2006), cujo trabalho utilizou um biodigestor que operava em processo contínuo e no qual obteve uma vazão estimada de 91,25 m^3 de biogás produzido por ano; enquanto que neste projeto, utilizando-se um lisímetro, obteve-se uma estimativa de 139 m^3 de biogás, emitidos para o ano de 2015.

Pode-se dizer que a estimativa obtida neste trabalho, resultou em um dado relativamente positivo, comparado ao de Oliveira (2006), em que a produção do biogás é realizada em um biodigestor que recebe somente dejetos orgânicos, enquanto que os resultados obtidos neste trabalho são de um aterro sanitário onde não há coleta seletiva, ou seja, a biodegradação não é exclusivamente de matéria orgânica.

No trabalho realizado por Giacobbo *et al.* (2013), a estimativa de produção do biogás foi de 244 m^3 por ano, onde a produção de biogás é resultante da biodegradação de dejetos de bovinocultura. E a produção estimada de biogás neste trabalho é de 139 m^3 é resultante da biodegradação de resíduos de diversas fontes, sendo que alguns resíduos são de lenta decomposição.

Assim, pela quantidade de material orgânico presente na biodigestão de Giacobbo *et al.* (2013), a quantidade de biogás gerado será maior que a obtida neste projeto, uma vez que, quanto maior a quantidade de matéria orgânica contida no resíduo, maior será sua taxa de geração de biogás.

Godoy Júnior (2010) também trabalhou com biodigestor; isto é, a biodegradação de dejetos efluentes e obteve a vazão de 1750 $\text{m}^3\text{ano}^{-1}$. Realizando-se um comparativo com o estudo feito neste trabalho, 139 $\text{m}^3\text{ano}^{-1}$. O valor obtido por Godoy Júnior (2010) é referente à biodegradação de dejetos orgânicos, em que a taxa de produção

de biogás é mais rápida, e, neste trabalho, os resíduos que são decompostos para a geração do biogás são de diversas fontes, inclusive de materiais que são de lenta decomposição. Vale ressaltar que o resultado obtido por Godoy Junior (2010) foi o mais expressivo entre os autores que trabalharam com biodigestor.

Ao se analisar o resultado deste trabalho com o de Silva (2012), Oliveira (2006), Giacobbo *et al.* (2013) e Godoy Júnior (2010), calculou-se uma vazão média para os 5 trabalhos de $450,71 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}$ de biogás gerado, com um desvio padrão de 730,56 e um coeficiente de variação de 61,69%; o que significa que o desvio padrão está acima do padrão (coeficiente de variação $\geq 25\%$). De fato, os trabalhos foram realizados com metodologias diferentes, para obter-se a vazão de biogás.

O valor obtido neste trabalho está abaixo da média dos 5 estudos realizados. Entretanto, deve-se levar em consideração que os resultados deste trabalho são derivados da biodigestão onde há diversidade de resíduos, alguns inclusive de lenta decomposição, o que, entre outras causas, pode ter interferido diretamente na produção de biogás.

CONCLUSÕES

O presente trabalho qualificou e quantificou os resíduos que chegam ao aterro sanitário da região Noroeste do Estado do Paraná, onde foi constatado que quase a metade dos resíduos são de origem não orgânica, alguns dos quais de lenta decomposição, o que dificulta a digestão anaeróbia. Os resultados obtidos com as amostragens da vazão do biogás em campo, que resultaram em 139 m^3 estimados para o ano de 2015, foram bastante satisfatórios, se levar-se em conta a não seleção de resíduo sólido.

Através das estimativas obtidas pelo método matemático de LandGEM, foi possível realizar uma previsão do tempo remanescente de produção do biogás no aterro sanitário, que será até meados de 2151, bem como o período de máxima emissão do mesmo, ou seja, o ano 2016.

Ao se analisar os resultados deste estudo, desde a qualificação dos resíduos que chegam no aterro sanitário, as estimativas obtidas por meio do método de LandGEM, e os resultados da vazão de biogás através das amostragens em campo, é fato a necessidade de um gerenciamento adequado dos resíduos que chegam ao aterro sanitário, pois desta forma, haverá maior aproveitamento dos resíduos. E como consequência, a quantidade de material não orgânico seria significativamente reduzida, o que acarretaria numa decomposição dos resíduos de forma mais rápida e eficiente, contribuindo para uma maior produção de biogás no aterro sanitário.

Assim, baseado nos resultados obtidos neste projeto, medidas poderão ser tomadas para os próximos anos no intuito de que o biogás (metano) produzido possa ser utilizado como matéria prima para produção de energia elétrica. O que poderá resultar em créditos de carbono, isto é, uma fonte de divisas para a empresa.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004**: resíduos sólidos. Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8.849**: apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

ABREU, F. V. *et al.* **Biogás de Aterros Sanitários para geração de energia renovável e limpa**: um estudo de viabilidade técnica e econômica. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UERJ, 2009. Artigo técnico.

BARROS JÚNIOR, C. de; TAVARES, C.R.G.; BARROS, S.T.D. de. Modelo de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: estudo para o município de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 17-25, dez. 2003.

BRAGA, J.M. da C. **Previsão da Produção de Biogás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2011. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos: Versão Preliminar para Consulta Pública**. Brasília, DF: MMA, 2012.

BRITO FILHO, L.F. **Estudo de gases em aterros**. Casos: Nova Iguaçu e Terra Brava. 2005. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CASTILHOS JÚNIOR, A.B.; LANGE, L.C.; GOMES, L.P.; PESSIN, N. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES/RiMa, 2003.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil**. São Paulo: CEPEA, 4 mar. 2004.

CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (Brasil) (Org.). **Previsão de tempo para cidades: Maringá**. 2015. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/cidades/tempo/3161>>. Acesso em: 22 set. 2015.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. do C.J.P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. dos. **Biodigestores Rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Bauru: Departamento de Arquitetura, Artes e Representações Gráficas, UNESP, 2002.

DEMAJOROVIC, J. Da política tradicional de tratamento do lixo à política de gestão de resíduos sólidos. **Revista de Administração de Empresas – EAESP**, São Paulo: FGV, v. 35, n. 3, p. 88-93, maio/jun. 1995.

ECOD (Org.). **Lixão, Aterro controlado e Aterro sanitário**. 2010. Disponível em: <<http://www.eco-desenvolvimento.org/noticias/ecod-basico-lixao-aterro-controlado-e-aterro?tag=rrr>>. Acesso em: 10 ago. 2015

EPA. USEPA. United States Environmental Protection Agency. **LANDGEM (Landfill Gas Emission Model)**, Version 3.01. User's Guide. EPA: Environmental Research Group, 2005.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Levantamento das principais tecnologias e sistemas de utilização no mundo e tendências tecnológicas**. Potencial de aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: EPE, 2007. 219 p.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2011.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 18. ed. Rio de Janeiro: EPE, 2014. 50 p. (recursos energéticos).

FERNANDES, J.G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental**. 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

FERREIRA, E. de M.; CRUVINEL, K.A. da S.; COSTA, E.S. da. Disposição final dos resíduos sólidos urbanos: diagnóstico da gestão do município de Santo Antônio de Goiás. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 14, n. 3, p. 3401-3411, ago. 2014. Disponível em: <<http://cascavel.cpd.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/remoa/article/view/13520/pdf>>. Acesso em: 20 set. 2015.

FIGUEIREDO, J.C. **Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais**. 2012. 139 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

FIGUEIREDO, N.J.V. de. **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica**: estudo de caso. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FREITAS, O.; LEITE, P. Catadores assumem coleta de lixo reciclável em 50 cidades do país. **Folha de S.Paulo**, Cotidiano, 23 jun. 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2014/06/1474724-catadores-assumem-coleta-de-lixo-reciclavel-em-50-cidades-do-pais.shtml>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

GIACOBBO, Giovana et al. Influência da variabilidade da temperatura ambiente na co-digestão anaeróbia de detritos de bovinocultura de leite e cama de aviário. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 2, n. 1, p.55-69, jun. 2013. Disponível em: <<http://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/9180>>. Acesso em: 20 out. 2015.

GODOY JÚNIOR, E. **Desenvolvimento e avaliação de uma miniestação ecoeficiente de tratamento de esgoto e reuso de águas, com sistemas registrador queimador, para baixa vazões de biogás e cogeração de energia**. 2010. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.

GOOGLE EARTH (Estados Unidos). **Aterro sanitário**. 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

LANGE, L.C.; SIMÕES, G.F.; FERREIRA, C.F.A.; SANTANA, D.W.E.A.; GARCIA, L.N. Estudo comparativo de metodologias empregadas para a análise de resíduos sólidos urbanos. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIASANITARIA Y AMBIENTAL, México, 2002.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. **Waste Management**, n. 31, p. 966-977, 2011.

MONTEIRO, V.E.D. **Análises físicas, químicas e biológicas no Estudo do comportamento do aterro sanitário da Muribeca**. 2003. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

OLIVEIRA, Rogério Moreira de. **Biosistemas integrados na suinocultura**. Brasil: Sbrt, 2006. 58 p. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MzEy>>. Acesso em: 20 out. 2015.

OLIVEIRA, S. de; PASQUAL, A. **Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em Médias e Pequenas Comunidades**. São Paulo: UNESP, 1998.

RIBEIRO, T.F.; LIMA, S. do C. Avaliação da Coleta Seletiva de lixo domiciliar: estudo de casos contaminação e poluição ambiental na área de influência do aterro controlado do Morro do Céu, Niterói, Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 2, n. 2, p. 50-69, dez. 2000.

SANTOS, A. O. **Caracterização do reservatório do Parque do Ingá no que diz respeito dos seus aspectos liminológicos**. 2003. 62 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2003.

SILVA, Anna Kelly Moreira. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) EM LISÍMETROS PREENCHIDOS COM RESÍDUOS DE DIFERENTES CARACTERÍSTICAS**. 2012. 203 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/7675/1/2013_tese_akmsilva.pdf>. Acesso em: 20 out. 2015.

SCHARFF, H.; JACOBS, J. Applying guidance for methane emission estimation for landfills. **Waste Management, New York**, v. 26, p. 417-429, 2006.

SEVAIOS, Viviane Hernandes Novo *et al.* Composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso. **Revista Eletrônica de Tecnologia e Cultura**, Jundiaí, v. 2, n. 2, p. 112-120, out. 2014. Disponível em: <<http://www.revista-fatecjd.com.br/retc/index.php/RETC/article/view/183/pdf>>. Acesso em: 21 set. 2015.

USEPA. (1991). Short-term methods for estimating the chronic toxicity of effluents and receiving waters to marine and estuarine organisms. eds. Klemm, D.; Morrison, G. E.; Norberg-King, T. J.; Peltier, W. H. & Heber, M. A. U.S. Environmental Protection Agency. Report EPA/600/4-91/003. 482p.

WORLD BANK (EUA). **Primeiro leilão-piloto para captura de metano é um sucesso**. 2015. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/pt/news/press-release/2015/07/17/first-pilot-auction-to-capture-methane-a-success>>. Acesso em: 5 maio 2015.

WORLD BANK. What a waste: a global review of solid waste management. Urban development series. Knowledge papers. 2012. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/urban>>. Acesso em: 5 maio 2015.

ZANTA, V.M.; FERREIRA, C.F.A. Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbano. In: CASTILHOS JÚNIOR, A.B. de. **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbano para pequenas comunidades**. Florianópolis: Abes, 2003. p. 1-16.

5 NORMAS DO ARTIGO

ISSN impresso: 1808-4524 ISSN eletrônico: 2176-9478



Escopo

- A Revista Brasileira de Ciências Ambientais – *RBCIAMB* - publica artigos completos de trabalhos científicos originais ou trabalhos de revisão com relevância para a área de Ciências Ambientais. A *RBCIAMB* prioriza artigos com perspectiva interdisciplinar. O foco central da revista é a discussão de problemáticas que se inscrevam na relação sociedade e natureza em sentido amplo, envolvendo aspectos ambientais em processos de desenvolvimento, tecnologias e conservação. A submissão dos trabalhos é de fluxo contínuo.

Língua

- A *RBCIAMB* publica artigos em Português e em Inglês.

Submissão

- Os artigos submetidos à *RBCIAMB* devem ser inéditos e estar dentro do escopo da revista.
- Todo o processo de submissão e análise é feito por via eletrônica, através do e-mail **rbciamb@abes-dn.org.br**. Os arquivos devem estar em MSWord, ter no máximo 10Mb com todo o conteúdo do artigo, arquivos com figuras ou mapas de formato superior devem ser editadas de forma a serem compatíveis com a limitação apresentada.
- Os trabalhos, sempre que possível, devem ser organizados com a seguinte estrutura: título em português e inglês, nome dos autores, afiliação dos autores com cidade e estado, resumo, *abstract*, palavras-chave, *key words*, introdução, objetivos, materiais e métodos, resultados e discussão, conclusões e referências.
- Resumos com no máximo 150 palavras.
- O texto deverá ser formatado para um tamanho de página A-4, margens 3 cm para esquerda e superior, e 2 cm inferior e direita. As páginas deverão ser devidamente numeradas. Deve ser empregada fonte Calibri, corpo 10. O espaçamento entre as linhas deverá ser 1,15. O texto integral do artigo não deve ultrapassar 20 páginas.

Figuras e tabelas

- O tamanho máximo que pode ter figura e tabela é de uma página A4;
- Tabelas e figuras devem ser limitadas a 5 no conjunto;
- Serão aceitos artigos com tabelas ou figuras. Quadros serão identificados como tabela. Todos os gráficos, desenhos, figuras e fotografias devem ser denominados "Figura".
- Não se escreve "FONTE" abaixo ou acima de figura ou tabela, o correto é citar a referência no texto referente ao objeto (figura ou tabela).
- As figuras e tabelas devem ser numeradas em ordem crescente de acordo com a sua inserção no texto.
- Legendas de tabelas são colocadas acima das tabelas e de figuras abaixo.

Referências

- A Revista Brasileira de Ciências Ambientais adota as normas vigentes da ABNT 2002 - NBR 6023.

Avaliação

- Toda contribuição submetida à *RBCIAMB* é encaminhada para revisores *ad-hoc*. No caso dos revisores solicitarem alterações as mesmas devem ser realizadas num período de até 30 dias ou a critério do Editor. O autor responsável deverá encaminhar uma versão corrigida do manuscrito identificando as alterações realizadas ou enviar documento anexo detalhando todas as correções, indicando página e linha onde foram feitas.

Copyright:

- O conteúdo dos artigos é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es), que declaram se responsabilizar por qualquer reclamação de terceiros quanto a conflitos envolvendo direitos autorais, assumindo e isentando a *RBCIAMB* de qualquer pendência envolvendo suas publicações. Os autores que encaminharem seus artigos cedem à *RBCIAMB* os respectivos direitos de reprodução e/ou publicação.

Sistema de Cobrança

- A Revista Brasileira de Ciências Ambientais, cobra taxa de contribuição por submissão de manuscritos. O valor é de **R\$ 50,00** por manuscrito submetido à avaliação. Os editores esperam contar com a colaboração de todos os autores, no sentido de garantir a continuidade da revista. A taxa de submissão não será restituída caso o manuscrito seja recusado, e o pagamento da taxa não garante o aceite do artigo, que passará normalmente pelo processo de avaliação.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho qualificou e quantificou os resíduos que chegam ao aterro sanitário da região Noroeste do Estado do Paraná, onde foi constatado que quase a metade dos resíduos são de origem não orgânica, alguns dos quais de lenta decomposição, o que dificulta a digestão anaeróbia. Os resultados obtidos com as amostragens da vazão do biogás em campo, que resultaram em 139 m³ estimados para o ano de 2015, foram bastante satisfatórios, se levar-se em conta a não seleção de resíduo sólido.

Através das estimativas obtidas pelo método matemático de LandGEM, foi possível realizar uma previsão do tempo remanescente de produção do biogás no aterro sanitário, que será até meados de 2151, bem como o período de máxima emissão do mesmo, ou seja, o ano 2016.

Ao se analisar os resultados deste estudo, desde a qualificação dos resíduos que chegam no aterro sanitário, as estimativas obtidas por meio do método de LandGEM, e os resultados da vazão de biogás através das amostragens em campo, é fato que a necessidade de um gerenciamento adequado dos resíduos que chegam ao aterro sanitário, pois desta forma, haverá maior aproveitamento dos resíduos. E como consequência, a quantidade de material não orgânico seria significativamente reduzida, o que acarretaria numa decomposição dos resíduos de forma mais rápida e eficiente, contribuindo para uma maior produção de biogás no aterro sanitário.

Assim, baseado nos resultados obtidos neste projeto, medidas poderão ser tomadas para os próximos anos no intuito de que o biogás (metano) produzido possa ser utilizado como matéria prima para produção de energia elétrica. O que poderá resultar em créditos de carbono, isto é, uma fonte de divisas para a empresa.

7 REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004**: resíduos sólidos. Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABRELPE (Brasil) (Org.). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2014.

AGÊNCIA AMBIENTAL DA INGLATERRA. 2012. Disponível em: <<http://www.environmentagency.gov.uk/>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas Handbook**. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.

ALVES, T. L. B. *et al.* Lixão de Campina Grande-PB versus Aterro Sanitário de Puxinanã: transferência de problema scioambiental. **Polêmica**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, p. 460-468, set. 2013.

AUGENSTEIN, D.; PACEY, J. Modelling landfill methane generation. **Proceedings of the Third International Landfill Symposium**, Sardenha, Italia, v. 1, p.115-148, 1991.

BIDONE, F. R. A. **Conceitos básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos: EESC/USP, 1999.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010a. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2010/decreto-7404-23-dezembro-2010-609830-publicacaooriginal-131134-pe.html>>. Acesso em: 17 set. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº. 12.305 de 2 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. Brasília, DF: MMA, 2010b. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 20 set. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**: versão preliminar para consulta pública. Brasília, DF: MMA, 2012. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1529/PNRS_consultaspublicas.pdf>. Acesso em: 20 set. 2015.

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros**. Casos: Nova Iguaçu e Terra Brava. 2005. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. **Resíduos sólidos urbanos**: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: ABES/RiMa, 2003.

CEWEP. Confederation of European Waste-to-Energy Plants. **Waste to energy and the revision of the Waste Framework Directive**. 2008. 27 p. Disponível em: <http://www.cewep.eu/information/publicationsandstudies/studies/climateprotection/309.February_FFfact_study_Waste-toEnergy's_contribution_to_climate_protection.html>. Acesso em: 15 ago. 2015.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. do C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. dos. **Biodigestores Rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Bauru: Departamento de Arquitetura, Artes e Representações Gráficas, UNESP, 2002.

DEMAJOROVIC, J. Da política tradicional de tratamento do lixo à política de gestão de resíduos sólidos. **Revista de Administração de Empresas – EAESP**, São Paulo: FGV, v. 35, n. 3, p. 88-93, maio/jun. 1995.

ECOD (Org.). **Lixão, Aterro controlado e Aterro sanitário**. 2010. Disponível em: <<http://www.ecodesenvolvimento.org/noticias/ecod-basico-lixao-aterro-controlado-e-aterro?tag=rrr>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

EPA. USA. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2005**. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2007.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional: resultados do Leilão A-5**. Rio de Janeiro: EPE, 2011.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

FERNANDES, J. G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental**. 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

FERNANDES, J. V. G *et al.* Introduzindo práticas de produção mais limpa em sistemas de gestão ambiental certificáveis: uma proposta prática. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 3, p. 157-164, jul./dez. 2001.

FERUCK, M. M. *et al.* Remoção de H₂S e CO₂ do biogás por processo de lavagem com água de cultivo de microalgas. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8., 2014, Concórdia. **Proceedings....** Concórdia: Jornada de Iniciação Científica, 2014. p. 31-32. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1014144/1/final7635.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2015.

FISCHER, D. *et al.* T: a novel non-viral vector for DNA delivery based on low molecular weight, branched polyethylenimine: effect of molecular weight on transfection efficiency and cytotoxicity. **Pharm Res**, Washington, v. 16, p. 1273-1279, 1999.

FREITAS, O.; LEITE, P. Catadores assumem coleta de lixo reciclável em 50 cidades do país. **Folha de S.Paulo**, Cotidiano, 23 jun. 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2014/06/1474724-catadores-assumem-coleta-de-lixo-reciclavel-em-50-cidades-do-pais.shtml>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

JESUS NETA, A. S. de. Meio ambiente e gestão dos resíduos sólidos: estudo sobre o consumo sustentável a partir da lei 12.305/2010. **Âmbito-Jurídico**, Rio Grande, v. 1, n. 98, p.1-17, mar. 2012.

JULIATTO, D. L.; CALVO, M. J; CARDOSO, T. E. Gestão integrada de resíduos sólidos para instituições públicas de ensino superior. **Revista Gestão Universitária na América Latina**, Florianópolis, v. 4, n. 3, p. 170-193, set./dez. 2011.

LIMA, J. D. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

MARIANO, M. O. H. *et al.* Estudo Geotécnico e avaliação da camada de cobertura do aterro de resíduos sólidos de Aguazinha - Olinda - PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte, 2007. **Anais...** Belo Horizonte: ABES, 2007. p. 296-304.

MAY, M. S. S. **Contribuição para construção de instrumento para análise e avaliação de aterros simplificados de resíduos sólidos urbanos para municípios de pequeno porte**. 2008. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008. Disponível em: <http://www.meau.ufba.br/site_backup/system/files/2008_mario_MAY.PDF>. Acesso em: 18 set. 2015.

McBEAN, D. E.; WINTERS, V.; WILSON, A. D.; OSWALD, C. B.; ALPS, B. J.; ARMSTRONG, J. M. Neuroprotective efficacy of lifarizine (RS-87476) in a simplified rat survival model of 2 vessel occlusion. **Br J Pharmacol**, Washington, v. 116, p. 3093-3098, 1995.

MONTEIRO, J. H. *et al.* **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises físicas, químicas e biológicas no Estudo do comportamento do aterro sanitário da Muribeca**. 2003. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

OLIVEIRA, S. de; PASQUAL, A. **Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em Médias e Pequenas Comunidades**. São Paulo: UNESP, 1998.

RIBEIRO, T. F.; LIMA, S. do C. Avaliação da Coleta Seletiva de lixo domiciliar: estudo de casos contaminação e poluição ambiental na área de influência do aterro controlado do Morro do Céu, Niterói, Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 2, n. 2, p. 50-69, dez. 2000.

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

WORLD BANK (EUA). **Primeiro leilão-piloto para captura de metano é um sucesso**. 2015. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/pt/news/press-release/2015/07/17/first-pilot-auction-to-capture-methane-a-success>>. Acesso em: 5 maio 2015.

WORLD BANK. **What a waste**: a global review of solid waste management. Urban development series. Knowledge papers. 2012. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/urban>>. Acesso em: 5 maio 2015.

ZANTA, V.M.; FERREIRA, C.F.A. Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbano. In: CASTILHOS JÚNIOR, A.B. de. **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbano para pequenas comunidades**. Florianópolis: Abes, 2003. p. 1-16.

8 APÊNDICES

Tabela 5: Dados obtidos do Dreno 1

Número de amostragens	Temperatura ambiente (K)	Pressão ambiente (mmHg)	Tempo (minutos)	Vazão Biogás (ml/min)
1	297	743	4,57	31,58
2	298	743,4	4,5	32,07
3	298	749	4,55	31,72
4	298	746	4,46	32,36
5	297	745	4,44	32,5
6	297	741,8	4,45	32,43
7	298	748	4,44	32,5
8	298	743,4	4,46	32,36
9	298	748	4,45	32,43
10	297	747	4,45	32,43
11	296	745	4,45	32,43
12	297	743	4,45	32,43
13	297	743	4,45	32,43
14	297	744,4	4,45	32,43
15	297	743	4,5	32,07
16	298	744,6	4,44	32,5
17	298	744,9	4,47	32,29
18	296	743	4,45	32,43
19	295	745	4,43	32,58
20	298	748,5	4,46	32,36
Média	297,7	744,95	4,46	32,32

Tabela 6: Dados obtidos do Dreno 2

Número de amostragens	Temperatura ambiente (K)	Pressão ambiente (mmHg)	Tempo (minutos)	Vazão Biogás (mL/min)
1	297	745	4,43	32,58
2	298	743,4	4,42	32,65
3	299	752,5	4,43	32,58
4	299	751	4,44	32,50
5	298	749	4,44	32,50
6	300	741,5	4,42	32,65
7	298	748	4,44	32,50
8	298	743,3	4,44	32,50
9	298	749,7	4,45	32,43
10	298	747	4,45	32,43
11	300	752	4,44	32,50
12	298	749	4,45	32,43
13	297	743,4	4,42	32,65
14	298	746,5	4,45	32,43
15	297	746,3	4,4	32,80
16	298	748,4	4,44	32,50
17	298	748	4,42	32,65
18	297	746	4,45	32,43
19	298	748	4,43	32,58
20	298	749	4,43	32,58
Média	298,1	747,35	4,43	32,54

Tabela 7: Dados obtidos do Dreno 3

Número de amostragens	Temperatura ambiente (K)	Pressão ambiente (mmHg)	Tempo (minutos)	Vazão Biogás (mL/min)
1	297	744,8	4,39	32,87
2	296	743,4	4,42	32,65
3	298	752,5	4,39	32,87
4	298	751	4,44	32,50
5	298	749	4,4	32,80
6	296	743	4,4	32,80
7	298	748	4,44	32,50
8	297	743,3	4,39	32,87
9	297	748	4,4	32,80
10	293	735	4,41	32,73
11	298	752	4,44	32,50
12	298	749	4,43	32,58
13	296	743	4,42	32,65
14	297	743	4,41	32,73
15	294	739	4,4	32,80
16	297	744	4,44	32,50
17	295	740	4,42	32,65
18	297	742	4,4	32,80
19	296	744	4,41	32,73
20	296	737	4,41	32,73
Média	296,6	744,55	4,41	32,70

Tabela 8: Dados obtidos do Dreno 4

Número de amostragens	Temperatura ambiente (K)	Pressão ambiente (mmHg)	Tempo (minutos)	Vazão Biogás (ml/min)
1	300	756	4,49	32,14
2	299	753	4,47	32,29
3	298	752,5	4,45	32,43
4	298	751	4,44	32,50
5	298	751,5	4,47	32,29
6	300	754	4,46	32,36
7	298	748	4,44	32,50
8	298	750	4,39	32,87
9	298	748	4,44	32,50
10	299	735	4,46	32,36
11	300	751,5	4,44	32,50
12	298	749	4,43	32,58
13	299	752	4,44	32,50
14	298	751	4,43	32,58
15	299	754	4,49	32,14
16	298	744	4,44	32,50
17	298	746	4,45	32,43
18	298	748	4,44	32,50
19	298	751	4,43	32,58
20	298	751	4,45	32,43
Média	298,5	749,83	4,45	32,45

Tabela 9: Dados obtidos do Dreno 5

Número de amostragens	Temperatura ambiente (K)	Pressão ambiente (mmHg)	Tempo (minutos)	Vazão Biogás (ml/min)
1	297	743	4,49	32,14
2	298	743,4	4,47	32,29
3	298	749	4,45	32,43
4	298	746	4,44	32,50
5	297	745	4,47	32,29
6	297	741,8	4,46	32,36
7	298	748	4,44	32,50
8	298	743,4	4,39	32,87
9	298	748	4,44	32,50
10	297	747	4,46	32,36
11	296	745	4,44	32,50
12	297	743	4,43	32,58
13	297	743	4,44	32,50
14	297	744,4	4,43	32,58
15	297	743	4,49	32,14
16	298	744,6	4,44	32,50
17	298	744,9	4,45	32,43
18	296	743	4,44	32,50
19	295	745	4,43	32,58
20	298	748,5	4,45	32,43
Média	296,6	743,14	4,43	32,45

Tabela 10: Dados obtidos do Dreno 6

Número de amostragens	Temperatura ambiente (K)	Pressão ambiente (mmHg)	Tempo (minutos)	Vazão Biogás (ml/min)
1	297	743	4,49	32,14
2	298	743,4	4,47	32,29
3	298	749	4,45	32,43
4	298	746	4,44	32,50
5	297	745	4,47	32,29
6	297	741,8	4,46	32,36
7	298	748	4,44	32,50
8	298	743,4	4,39	32,87
9	298	748	4,44	32,50
10	297	747	4,46	32,36
11	296	745	4,44	32,50
12	297	743	4,43	32,58
13	297	743	4,44	32,50
14	297	744,4	4,43	32,58
15	297	743	4,49	32,14
16	298	744,6	4,44	32,50
17	298	744,9	4,45	32,43
18	296	743	4,44	32,50
19	295	745	4,43	32,58
20	298	748,5	4,45	32,43
Média	295,9	741,83	4,48	32,45

Tabela 11: Dados obtidos do Dreno 7

Número de amostragens	Temperatura ambiente (K)	Pressão ambiente (mmHg)	Tempo (minutos)	Vazão Biogás (ml/min)
1	297	743	4,49	32,14
2	298	743,4	4,47	32,29
3	298	749	4,45	32,43
4	298	746	4,44	32,50
5	297	745	4,47	32,29
6	297	741,8	4,46	32,36
7	298	748	4,44	32,50
8	298	743,4	4,39	32,87
9	298	748	4,44	32,50
10	297	747	4,46	32,36
11	296	745	4,44	32,50
12	297	743	4,43	32,58
13	297	743	4,44	32,50
14	297	744,4	4,43	32,58
15	297	743	4,49	32,14
16	298	744,6	4,44	32,50
17	298	744,9	4,45	32,43
18	296	743	4,44	32,50
19	295	745	4,43	32,80
20	298	748,5	4,45	32,43
Média	294,4	742,33	4,48	32,46

Tabela 12: Dados obtidos do Dreno 8

Número de amostragens	Temperatura ambiente (K)	Pressão ambiente (mmHg)	Tempo (minutos)	Vazão Biogás (ml/min)
1	297	743	4,49	32,14
2	298	743,4	4,47	32,29
3	298	749	4,45	32,43
4	298	746	4,44	32,50
5	297	745	4,47	32,29
6	297	741,8	4,46	32,36
7	298	748	4,44	32,50
8	298	743,4	4,39	32,87
9	298	748	4,44	32,50
10	297	747	4,46	32,36
11	296	745	4,44	32,50
12	297	743	4,43	32,58
13	297	743	4,44	32,50
14	297	744,4	4,43	32,58
15	297	743	4,49	32,14
16	298	744,6	4,44	32,50
17	298	744,9	4,45	32,43
18	296	743	4,44	32,50
19	295	745	4,43	32,58
20	298	748,5	4,45	32,43
Média	300,3	753,35	4,47	32,45

Tabela 13: Dados obtidos do Dreno 9

Número de amostragens	Temperatura ambiente (K)	Pressão ambiente (mmHg)	Tempo (minutos)	Vazão Biogás (ml/min)
1	297	743	4,49	32,14
2	298	743,4	4,47	32,29
3	298	749	4,45	32,43
4	298	746	4,44	32,50
5	297	745	4,47	32,29
6	297	741,8	4,46	32,36
7	298	748	4,44	32,50
8	298	743,4	4,39	32,87
9	298	748	4,44	32,50
10	297	747	4,46	32,36
11	296	745	4,44	32,50
12	297	743	4,43	32,58
13	297	743	4,44	32,50
14	297	744,4	4,43	32,58
15	297	743	4,49	32,14
16	298	744,6	4,44	32,50
17	298	744,9	4,45	32,43
18	296	743	4,44	32,50
19	295	745	4,43	32,58
20	298	748,5	4,45	32,43
Média	299	751,23	4,38	32,45

Cálculos das Equações do trabalho

Equação 3 – Volume do tubo do lisímetro

Diâmetro (Φ) = 35 mm

Altura (h) = 150 mm

$$V = A * h$$

$$V = \pi * \left(\frac{\Phi}{2}\right)^2 * h$$

$$V = 144,32 \text{ mL}$$

Equação 4 – Vazão do Biogás

Volume (V) = 144,32 mL

Tempo (t) = 4,44 minutos

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{144,32 \text{ mL}}{4,44 \text{ minutos}}$$

$$Q = 32,47 \text{ mL/minuto}$$

Equação 5 – Vazão do biogás corrigida

Vazão do biogás = 32,47 mL/minuto

Pressão média ambiente = 746,5 mmHg

Pressão padrão = 760 mmHg

Temperatura média ambiente = 297,46 K

Temperatura padrão = 273,15K

$$Q_{\text{biogás corrigida}} = Q_{\text{biogás}} * \left(\frac{P_{\text{ambiente}}}{P_{\text{padrão}}}\right) * \left(\frac{T_{\text{padrão}}}{T_{\text{ambiente}}}\right)$$

$$Q_{\text{biogás corrigida}} = 32,29 \text{ mL} * \left(\frac{746,5 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}}\right) * \left(\frac{273,15 \text{ K}}{297,46 \text{ K}}\right)$$

$$Q_{\text{biogás corrigida}} = 29,12 \text{ NmL/minuto}$$