



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO SECRETARIA DE EDUCAÇÃO
PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS**

**CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

LUANA MARINHO TONELLOTO

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO NO ATERRO
SANITÁRIO DE PALMAS, TOCANTINS.**

**PALMAS
2019**

LUANA MARINHO TONELLOTO

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO NO ATERRO
SANITÁRIO DE PALMAS, TOCANTINS.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes
Pedroza

PALMAS

2019

Tonellotto, Luana Marinho

Produção e caracterização do biogás produzido no Aterro Sanitário de Palmas, Tocantins.

Luana Marinho Tonellotto. – Palmas, 2019.

54 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação do Tocantins, *Campus* Palmas, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Biogás 2. Resíduos Sólidos 3. Aterro Sanitário

I Produção e caracterização do biogás produzido no Aterro Sanitário de Palmas, Tocantins.

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUANA MARINHO TONELLOTTO

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS, TOCANTINS.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Civil
Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas,
como exigência à obtenção do grau em
Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
IFTO – *Campus* Palmas

Prof. Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende
IFTO – *Campus* Palmas

Prof. Dr. João Evangelista Marques Soares
Escola de Governo de Palmas do Instituto Vinte de Maio - IVM

DEDICATÓRIA

A Deus.

Aos meus pais, José André e Maria Ivonete.

A minha avó Maria Beloni.

Ao meu orientador Dr. Marcelo.

Aos amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder a oportunidade de viver e me graduar em um curso superior.

Ao meu orientado Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza, pelo conhecimento transmitido, paciência e toda a dedicação para este projeto.

Aos meus pais, Maria Ivonete e José André, por sempre investirem na minha educação e fazer todo o possível para que eu alcançasse meus objetivos.

A todos os amigos que fiz na universidade, que sempre compartilharam conhecimento e sentimentos de alegrias e frustrações.

A todos aqueles que contribuíram para esta pesquisa.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar a produção e caracterização química de biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas, visando aplicação industrial do biocombustível. A área de estudo está localizada na área rural, ao sul do município, distante aproximadamente 25 km do centro do plano diretor e cerca de 6 km do bairro de Taquaralto, em uma região de baixa densidade demográfica e com área original de 92,914 ha. A drenagem de gases foi realizada por tubos verticais, perfurados de concreto, de 0,40 m de diâmetro protegidos com brita nº 4 e tela. Para realização das medições dos volumes de biogás, foi utilizado 01 dreno vertical, com medições semanais e com perfil diário. Para medir a vazão de biogás foi necessário fazer um procedimento adaptativo, com o fechamento do dreno vertical com tampa de concreto com saída de biogás através de orifício central, adaptado através de uma conexão de aço e tubulação de interligação à válvula de saída de biogás, onde se conecta através de tubulação de cobre ao medidor de vazão. A medição de vazão do biogás foi realizada através de um medidor de gás GLP, da Marca LAO G-0,6 Predial, interligado através de conexão de cobre maleável de 3/8, com vazão máxima de 0,016 m³/h. Foi realizado o perfil de vazão diária de biogás no Aterro Sanitário de Palmas, Tocantins, sendo a quantidade de biocombustível aferida em um dos drenos de escape de gás do sistema. O volume de biogás acumulado diário foi de 18,12 m³. O principal constituinte no biogás da cidade de Palmas (TO) foi o metano com uma concentração de 55,30 % em termos de abundância relativa na mistura gasosa, o que aponta a utilização da mistura gasosa como biocombustível.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Aterro Sanitário. Biogás. Energia.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the production and chemical characterization of biogas from the Palmas Sanitary Landfill, aiming at the industrial application of biofuel. The study area is located in the rural area, to the south of the municipality, approximately 25 km from the center of the master plan and about 6 km from the Taquaralto neighborhood, in a region of low population density and with an original area of 92,914 ha. The gas drainage was performed by vertical pipes, perforated in concrete, with 0.40 m in diameter protected with gravel 4 and mesh. To perform measurements of biogas volumes, 01 vertical drain was used, with weekly measurements and daily profile. To measure the biogas flow it was necessary to make an adaptive procedure, with the closing of the vertical drain with concrete cover with biogas outlet through a central hole, adapted through a steel connection and interconnection pipe to the biogas outlet valve, where it is connected through copper pipe to the flow meter. The flow measurement of the biogas was performed through a LPG gas meter, LAO G-0.6 Buildings, interconnected through a 3/8 malleable copper connection, with a maximum flow of 0.016 m³/h. A daily biogas flow profile was carried out at the Palmas Sanitary Landfill, Tocantins, and the amount of biofuel measured in one of the system's gas exhaust drains. The daily accumulated biogas volume was 18.12 m³. The main constituent in the biogas of the city of Palmas (TO) was methane with a concentration of 55.30% in terms of relative abundance in the gas mixture, which indicates the use of the gas mixture as biofuel.

Keywords: Urban solid waste. Landfill Sanitary. Biogas. Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de um Aterro Sanitário.....	19
Figura 2 – Ilustração de um Aterro Sanitário.....	19
Figura 3 – Gráficos de índices de cobertura de coleta por regiões do Brasil.....	23
Figura 4 – Gráficos de percentual de municípios com iniciativas para coleta seletiva por regiões do Brasil.....	25
Figura 5 – Fases da biodegradação anaeróbia da matéria orgânica em Aterros Sanitários.....	29
Figura 6 – Geração de energia e calor através do biogás em alguns países.....	34
Figura 7 – Participação das formas de utilização de biogás em países da Europa.....	34
Figura 8 – Usina geradora de energia através de biogás no Aterro de Caieiras.....	35
Figura 9 – Usina Biogás no Aterro Sanitário Sítio São João.....	36
Figura 10 – Projeto da Usina Biogás.....	37
Figura 11 – Motogeradores da Usina Guataparã – SP.....	38
Figura 12 – Mapa de localização do Aterro Sanitário de Palmas.....	39
Figura 13 – Vala do Aterro Sanitário de Palmas.....	40
Figura 14 – Drenos de biogás.....	40
Figura 15 – Sistemas de lagoas para tratamento de chorume.....	41
Figura 16 – Adaptação dos drenos para aplicação do medidor.....	42
Figura 17 – Medidor de vazão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.....	42
Figura 18 – Coleta de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins: (a) drenagem do biocombustível e (b) estoque de amostras para posterior análise.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição típica do biogás de Aterros Sanitários de resíduos sólidos.....	27
Tabela 2 – Duração das fases de degradação da matéria orgânica em Aterros Sanitários.....	31
Tabela 3 – Condições operacionais do CG/TCD/FID utilizadas na análise do biogás.....	44
Tabela 4 - Principais constituintes de amostras de biogás do Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.....	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração de RSU no Brasil (toneladas/dia).....	22
Gráfico 2 – Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (toneladas/dia).....	24
Gráfico 3 – Disposição final de RSU (toneladas/ano).....	24
Gráfico 4 – Percentual da disposição final de RSU.....	25
Gráfico 5 – Perfil de vazão diária de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Problema da pesquisa.....	14
1.2 Justificativa.....	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo Geral.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).....	15
2.2 DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS.....	17
2.2.1 Aterro Sanitário.....	17
2.2.2 Reciclagem.....	20
2.2.3 Compostagem.....	20
2.2.4 Insineração.....	20
2.2.5 Pirólise.....	21
2.5 BIOGÁS.....	27
2.5.1 Geração do biogás em Aterros Sanitários.....	28
2.5.2 Aplicação do biogás.....	34
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	39
3.1 Local da Pesquisa.....	39
3.2 Medição de fluxo e coleta de biogás.....	41
3.3 Coleta e análise de biogás.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1 Perfil de vazão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.....	45
4.2 Análise cromatográfica do biogás produzido no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.....	46
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	50

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do consumo das comunidades gera um aumento da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), cuja consequência é a difícil gestão por parte dos órgãos responsáveis. Na maior parte do mundo, os aterros sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), têm sido utilizados para a destinação final de resíduos sólidos urbanos. Outras formas de diminuição de resíduos, tais como reciclagem, reutilização, redução, renovação e educação ambiental tem sido também utilizadas (REGATTIERE, 2009).

Apesar de ainda existir descarte indevido de resíduos, mais da metade dos resíduos gerados na maioria dos municípios brasileiros já são encaminhados para aterros sanitários, segundo ABRELPE (2017), onde são aterrados em valas impermeabilizadas, e tem sistemas de tratamento para o chorume, afim de evitar contaminação do solo.

O Aterro Sanitário é uma das principais formas de disposição de resíduos no mundo. Os resíduos depositados nestes ambientes entram em decomposição gerando gases que podem afetar diretamente o meio ambiente (FERNANDES, 2009). A matéria orgânica presente em um aterro sanitário municipal é decomposta por um processo anaeróbio, que produz um gás denominado biogás ou “gás de aterro” (REGATTIERE, 2003).

A emissão descontrolada do biogás é um grave problema de poluição atmosférica local e global que precisa ser mitigado. 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 (FERNANDES, 2009).

A composição química típica do biogás é responsável pela variedade de estratégias de utilização deste combustível. Ele é composto majoritariamente de metano (CH_4), o elemento combustível, e de dióxido de carbono (CO_2), inerte, além de impurezas presentes em menor quantidade, como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), corrosivo, que deve ser removido para um aproveitamento energético eficiente (PERECIN, 2017). Pelo elevado teor de metano, deve-se evitar o descarte de biogás na atmosfera, devido ao potencial de aquecimento global do CH_4 ser 28 vezes maior que o do CO_2 para um horizonte de 100 anos (IPCC, 2013).

Esse biogás, se adequadamente gerenciado, pode ser aproveitado do ponto de vista energético. Vários países da Europa e da América do Norte utilizam energia a partir de resíduos sólidos para vários fins, entre os quais: aquecimento, geração de energia elétrica e como combustível veicular (PAVAN, 2010).

Neste sentido torna-se de fundamental importância o estudo da geração e emissão de biogás em Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), para a minimização da poluição atmosférica (REGATTIERE, 2009).

1.1 Problema da pesquisa

Qual a importância de estudar a emissão de biogás em aterros sanitários? Quais alternativas existentes para o aproveitamento energético desse biogás e consequentemente reduzir essas emissões?

1.2 Justificativa

Os transtornos decorrentes dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) produzidos nas grandes cidades abrangem vários aspectos, desde sua origem, produção, coleta, tratamento e destino final, como também as grandes quantidades de subprodutos gerados e os consequentes problemas sociais, ambientais e de saúde pública. Os problemas ambientais incluem contaminação do solo, da água e do ar (AIRES, 2013).

O biogás gerado a partir da decomposição dos resíduos sólidos urbanos dispostos nos aterros sanitários é uma fonte de energia. Em uma análise objetiva, o aproveitamento energético dos resíduos justifica-se por ofertar até 30% da eletricidade consumida no país (AIRES, 2013).

Desta forma, alternativas para o uso ecoeficiente desses gases produzidos diminuiriam os impactos ambientais e poderiam servir de base para geração energética, suprimindo as necessidades funcionais do aterro e gerando energia sobressalente (AIRES, 2013).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

- Caracterizar a produção de biogás proveniente do Aterro Sanitário de Palmas visando aplicação industrial do biocombustível.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Calcular a produção de biogás produzido no sistema experimental;
- Determinar as características químicas do biogás produzido;

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

O termo resíduo sólido é empregado como sinônimo de “lixo” (MANCINI, 1999). Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2000), lixo corresponde a restos de atividades humanas, consideradas inúteis, indesejáveis e descartáveis. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, artigo 3º define como: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade.

A norma brasileira que classifica os resíduos sólidos (ABNT NBR 10.004:2004) define como:

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

A NBR 10.004:2004 também classifica os resíduos em dois grupos:

- Resíduos de Classe I – Perigosos: oferecem risco à saúde da população e de contaminação do meio ambiente quando disposto em local inadequado.

Apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

- Resíduos de Classe II – Não perigosos - esta classe é subdivida em inertes: não oferecem nenhum risco; e os não inertes: não apresentam as características para ser perigoso, porém possuem solubilidade em água, podendo assim reagir com meio e contaminá-lo.

A Lei nº 12.305/2010 define resíduos sólidos como: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

O resíduos sólidos, segundo a Lei nº 12305/2010 podem ser classificados quanto à sua origem como:

- Resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- Resíduos sólidos urbanos: resíduos domiciliares e de limpeza urbana;
- Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços;
- Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico;
- Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde como hospitais, clínicas, laboratórios, etc;

- Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais;
- Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- Resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

2.2 DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS

Os resíduos sólidos urbanos, mesmo quando classificados como não perigosos, se dispostos de forma e em local inadequado podem gerar vários problemas. O acúmulo desse lixo, além de causar um problema estético, gera emissão de vários gases mal cheirosos, se torna local de proliferação de vetores de doenças como ratos e mosquitos e contamina o solo. Por esses fatores, os lixões a céu aberto não são a melhor alternativa para a disposição final do lixo. As alternativas mais comuns e consideradas mais adequadas do ponto de vista ecológico são: a) aterro sanitário; b) reciclagem; c) compostagem; d) incineração; e) pirólise; f) logística reversa.

2.2.1 Aterro Sanitário

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 8419 (1996), define-se aterro sanitário de resíduos sólidos:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou risco à saúde pública e à segurança, minimizando impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário.

Segundo Castro (2001), aterro sanitário é a técnica utilizada para disposição final de resíduos sólidos, na qual o resíduo é disposto em camadas compactadas e sobrepostas, contemplando estrutura para impermeabilização do solo e sistema para drenagem de líquidos percolados e gases.

A disposição de resíduos em aterro sanitário é uma operação de eliminação que consiste basicamente na colocação dos resíduos no terreno através de técnicas que evitam perigos para a saúde pública, degradação da paisagem, poluição das águas subterrâneas e outros riscos ambientais (SPIGOLON, 2015).

Um aterro sanitário deve ser projetado e operado de forma a controlar a emissão de contaminantes para o meio ambiente, tem a finalidade de reduzir a possibilidade de poluição das águas superficiais e subterrâneas, do solo e do ar e eliminar impactos adversos na cadeia alimentar (BOSCOV, 2008).

Os principais problemas no que se refere ao aterro sanitário são as emissões líquidas (lixiviado/chorume) e gasosas (biogás). A construção do aterro deve prever sistemas de drenagem e concentração destes efluentes, de modo a minimizar a sua quantidade. Por isso é importante a separação dos lixiviados de todas as outras águas, superficiais e pluviais, mediante sistema de drenagem distintos (PIEADADE e AGUIAR, 2010).

De acordo com Lanza e Carvalho (2006), o aterro sanitário deve contar com todos os elementos de proteção ambiental, tais como sistema de impermeabilização de base e laterais, sistema de recolhimento diário e cobertura final, sistema de coleta e drenagem de líquidos lixiviados, sistema de coleta e tratamento dos gases, sistema de drenagem superficial, sistema de tratamento de líquidos lixiviados e sistema de monitoramento.

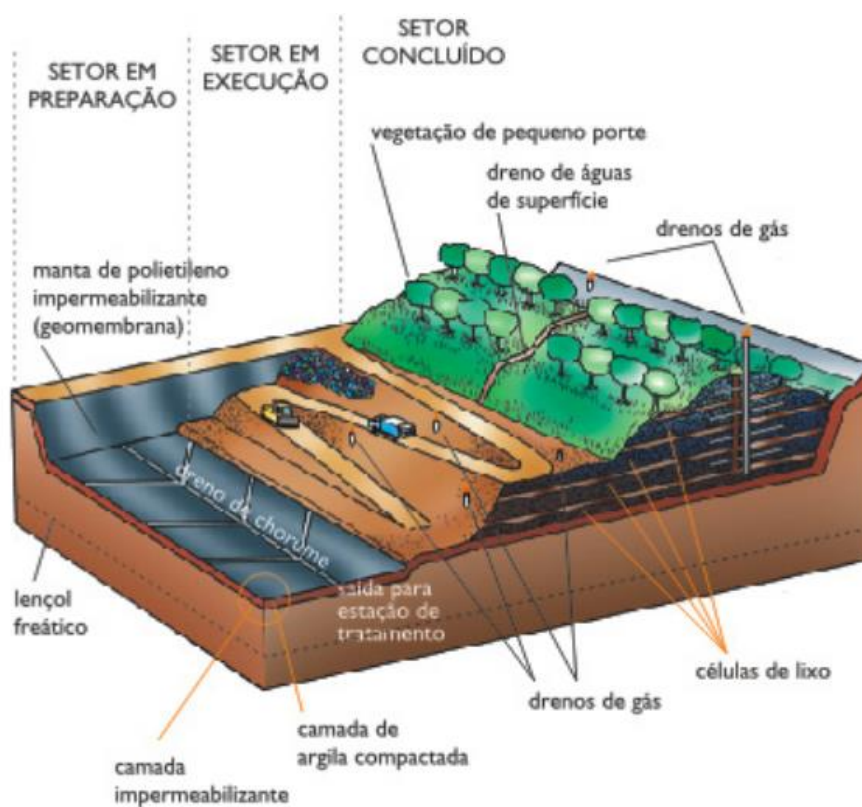
Nos aterros sanitários, as células são impermeabilizadas com geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), com 2 milímetros de espessura, para evitar contaminação do solo ou mesmo do lençol freático. Os subprodutos gerados (chorume e biogás) são orientados para drenos previamente projetados (AIRES, 2013). As Figuras 1 e 2 ilustram o funcionamento de um aterro sanitário e todos os seus sistemas.

Figura 1: Desenho esquemático de um aterro sanitário.



Fonte: Veja, 2009.

Figura 2: Ilustração de um aterro sanitário.



Fonte: IPT, 2000.

2.2.2 Reciclagem

Segundo Lajolo (2003), a reciclagem consiste num conjunto de ações realizadas por diferentes agentes, com a finalidade de reintroduzir materiais presentes nos resíduos sólidos para a cadeia produtiva.

Este método é muito eficaz na redução da quantidade de resíduo sólido, além de gerar economia de matéria prima e energia para a indústria. Porém, este método necessita de etapas para ser realizado, a separação dos resíduos por tipo e a coleta seletiva são algumas dessas etapas e dependem do gerador do resíduo e do responsável pela gestão dos resíduos nos municípios. Devido a esses fatores, a reciclagem ainda não é utilizada devidamente, pois faltam campanhas educativas para o cidadão segregar o resíduo, e falta interesse por parte da gestão pública municipal para realizar a coleta seletiva.

2.2.3 Compostagem

A compostagem é um método de tratamento de RSU no qual a porção de matéria orgânica, em condições adequadas de temperatura, umidade e aeração, é transformada em um produto estável denominado composto orgânico, que por sua vez, tem propriedades condicionadoras de solo, sendo de grande aplicabilidade na agricultura (CETESB, 1997).

Para o processo de compostagem, o lixo doméstico deve ser separado em orgânico: restos de alimento e jardinagem; e não orgânico: vidros, plástico, metais, entre outros. Esse material deve ser levado para locais apropriados onde será realizada a compostagem.

A compostagem também é dependente da coleta seletiva, e a qualidade do composto gerado está totalmente ligada a boa separação dos materiais. O composto tem valor e pode ser comercializado para agricultura, paisagismo, jardinagem, reflorestamento e cobertura de solo.

2.2.4 Insineração

A insineração é um método de tratamento de resíduos via oxidação térmica, que torna os resíduos menos volumosos, menos tóxicos ou atóxicos (ROCCA, 1993).

Não é incomum a prática de queimar os resíduos para eliminá-lo, porém, esta prática quando feita dessa forma caseira traz muitos maléficos ao meio ambiente. A insineração acontece nas usinas de insineração, de forma controlada, com temperaturas acima de 900° C, afim de garantir a queima completa e evitar liberação de gases como monóxido de carbono.

Em países europeus e no Japão, a insineração chega a ser mais utilizada que os outros métodos de tratamento. Vale ressaltar que devido a complexidade do processo, a mão de obra dessas usinas deve ser qualificada e os custos de instalação e manutenção são bastante altos, o que torna o método menos atrativo, apesar de sua eficácia na redução de volume de RSU.

2.2.5 Pirólise

A pirólise pode ser definida como a degradação térmica de qualquer material orgânico na ausência parcial ou total de um agente oxidante, ou até mesmo, em um ambiente com uma concentração de oxigênio capaz de evitar a gaseificação intensiva do material orgânico. A pirólise geralmente ocorre a uma temperatura que varia, desde os 400°C até o início do regime de gaseificação (PEDROZA et al., 2010).

A pirólise possui vantagens significativas sobre outros métodos. Ela produz produtos mais úteis como gases, óleos e material carbonáceo sólido, os quais podem ser utilizados em muitas aplicações (VIANA, 2013).

2.2.6 Logística Reversa

A legislação brasileira, através da Lei 12.305/2010, entende que a logística reversa seja um:

(...) instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

Apesar de não ser uma nova prática, apenas recentemente essa temática vem sendo incorporada nas organizações, devido à atenção dada pelas pressões sociais, agendas governamentais, literatura acadêmica e pelo público em geral. Estes,

crescentemente têm pressionado as empresas a assumir a responsabilidade por qualquer externalidade negativa que suas atividades venham a causar (STOLKA, 2014).

Como consequência deste processo, tem crescido o número de empresas que adotam esta ferramenta como uma maneira de auferir maiores lucros, ao aumentar a competitividade de maneira sustentável, além de melhorar sua imagem perante o público consumidor (AGRAWAL; SINGH; MURTAZA, 2015).

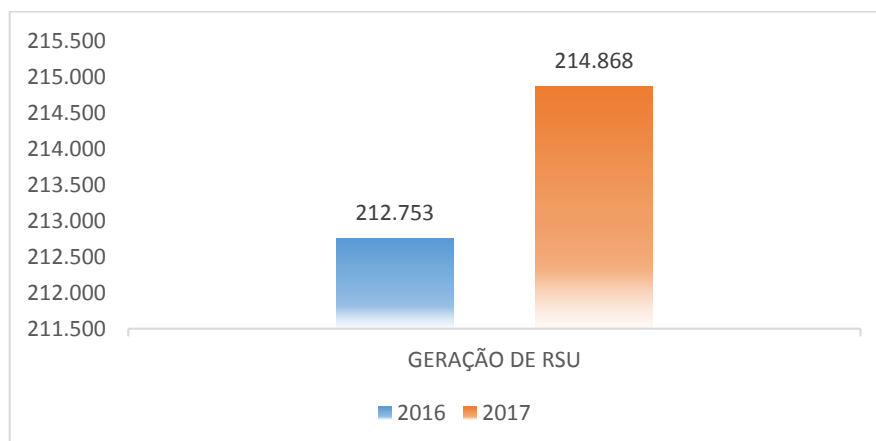
2.3 GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

Segundo ABRELPE (2017), foram gerados 78,4 milhões de toneladas de RSU neste ano, que demonstra um aumento de 1% na produção de lixo quando comparada com o ano anterior. Deste total, 71,6 milhões de toneladas foram coletados, tendo uma diferença 6,9 milhões de toneladas que não foram coletadas e consequentemente tiveram destinação imprópria.

Com relação a disposição final dos resíduos, 59,1% foram destinados a aterros sanitários, o que corresponde a 42,3 milhões de toneladas de lixo. Os outros 40,9%, foram despejados por 3352 municípios em aterros controlados ou lixões, totalizando 29 milhões de toneladas de lixo em local impróprio (ABRELPE, 2017).

De 2016 para 2017, a população brasileira teve um aumento de 0,75%, o que resultou em 1% de aumento na geração total de RSU, como demonstrado no Gráfico 1 (ABRELPE, 2017).

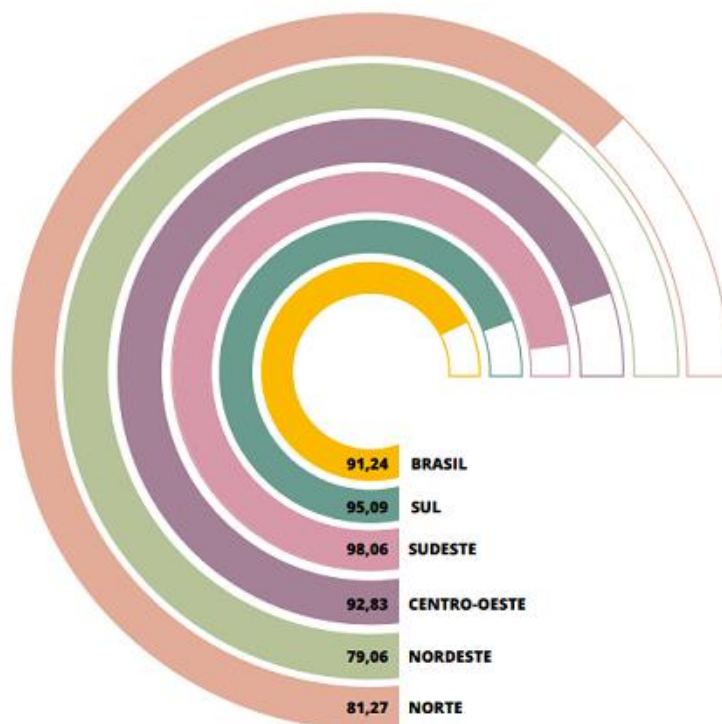
Gráfico 1: Geração de RSU no Brasil (toneladas/dia).



Fonte: Adaptado ABRELPE (2017).

Segundo ABRELPE (2017) houve aumento também na quantidade de lixo coletado, que passou de 193,64 t/dia para 196,05 t/dia. O índice de cobertura de coleta se manteve acima de 90% nos dois anos, sendo menores apenas nas regiões Norte e Nordeste conforme ilustrado na Figura 3.

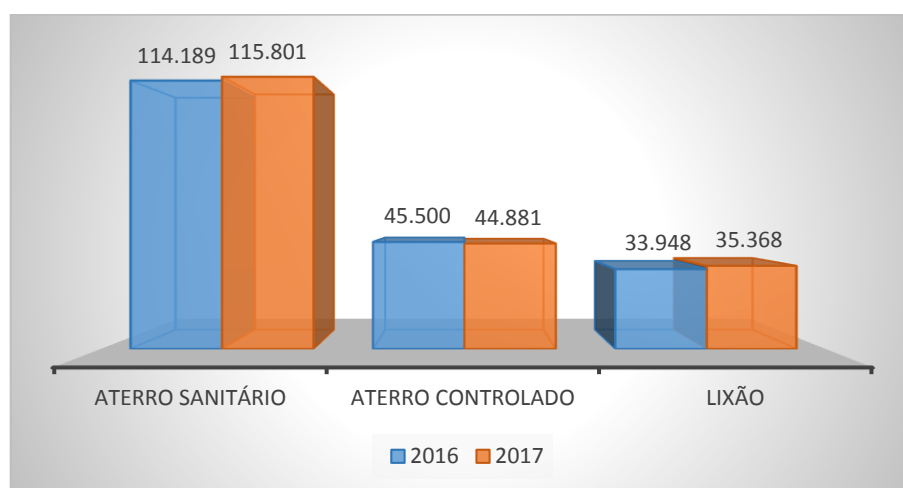
Figura 3: Gráfico de índices de cobertura de coleta por regiões no Brasil.



Fonte: ABRELPE (2017).

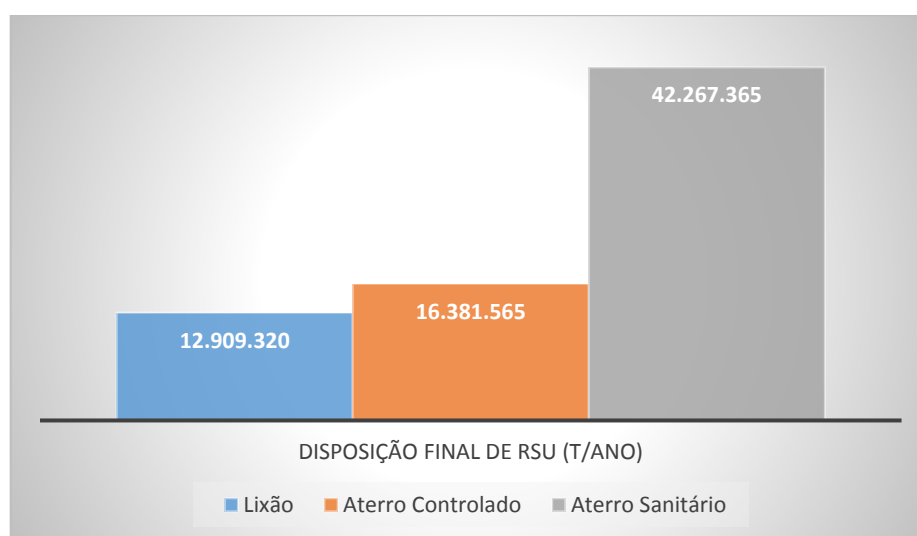
A maior parte de RSU é destinada a aterros sanitários, porém, mais de 40% deste resíduo ainda é encaminhado para aterros controlados ou lixões, o que configura graves impactos ambientais e a saúde pública (ABRELPE, 2017). O Gráfico 2 mostra as quantidades de lixo destinados diariamente a aterros sanitários, aterros controlados e lixões, comparando os anos de 2016 e 2017. O Gráfico 3 demonstra quantas toneladas de lixo foram destinadas para aterros sanitários e controlado, e lixão no ano de 2017, enquanto o Gráfico 4 demonstra o percentual desses valores, onde vê-se que apenas 59% é destinado aos aterros sanitários, enquanto cerca de 29 milhões de toneladas de RSU ainda são dispostos em locais inadequados neste ano.

Gráfico 2: Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (toneladas/dia).



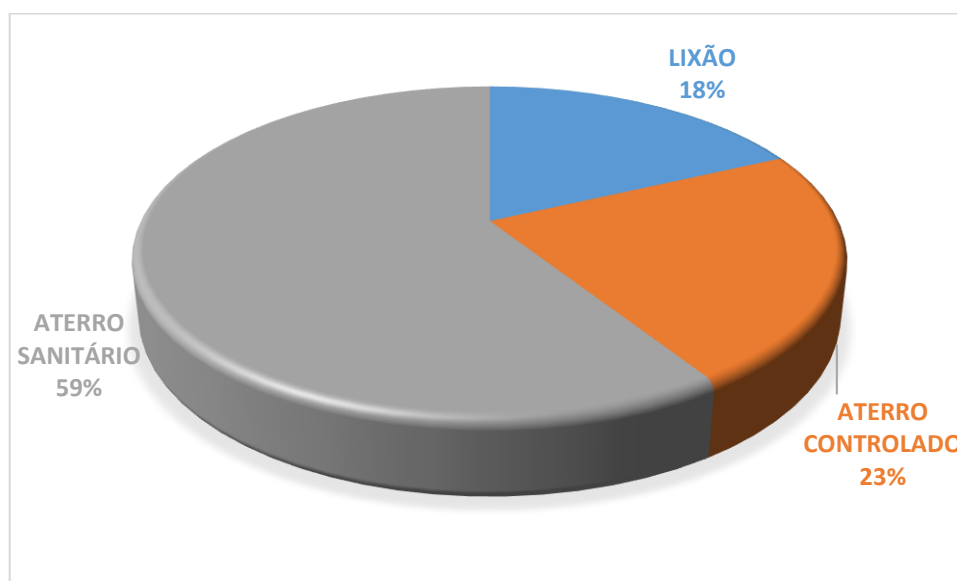
Fonte: Adaptado ABRELPE (2017).

Gráfico 3: Disposição final de RSU (toneladas/ano)



Fonte: Adaptado ABRELPE (2017).

Gráfico 4: Percentual da disposição final de RSU.

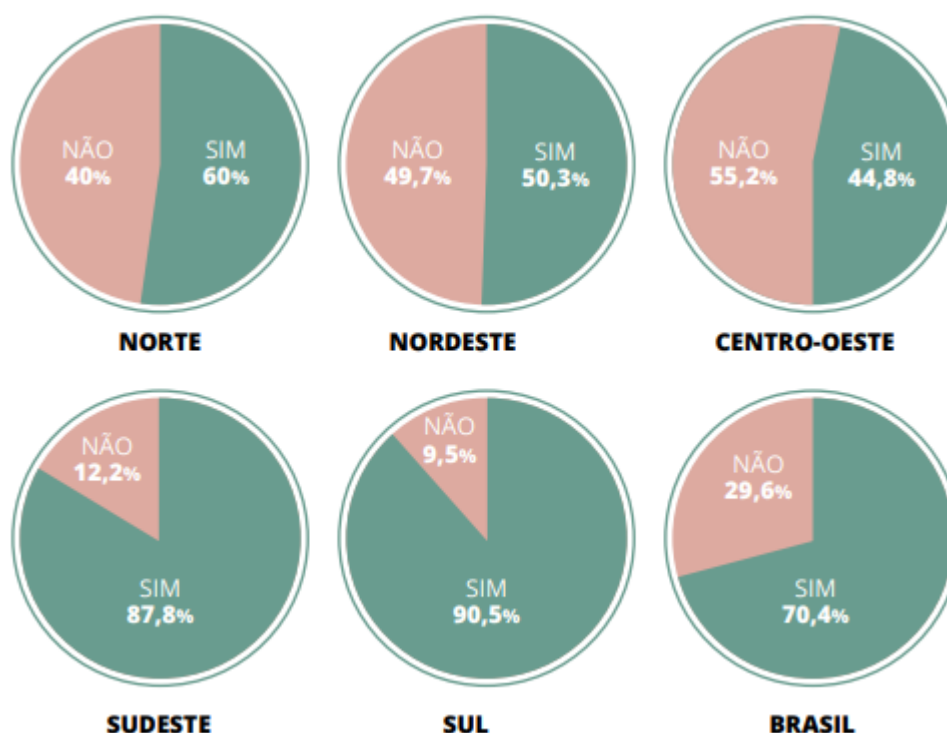


Fonte: Adaptado ABRELPE, 2017.

A reciclagem é uma das soluções mais viáveis ecologicamente para a resolução dos problemas pertinentes ao lixo. Essa prática não apenas reduz a quantidade de resíduos como também recupera produtos já produzidos, economiza matéria-prima e reduz o volume de resíduos nos aterros (PAVAN, 2010), porém ainda é pouco aplicada no Brasil. Apesar dos incentivos, falta interesse por parte dos gestores públicos na implantação da coleta seletiva.

Alguns municípios do Brasil tem iniciativas para coleta seletiva, mas vale ressaltar que essas iniciativas muitas vezes não abrangem a totalidade da área urbana do município (ABRELPE, 2017). A Figura 4 abaixo demonstra o percentual de municípios com iniciativas de coleta seletiva por regiões do Brasil.

Figura 4: Gráficos de percentual de municípios com iniciativas para coleta seletivas por regiões no Brasil.



Fonte: ABRELPE (2017).

2.4 GESTÃO DE RSU EM PALMAS-TO

Na cidade de Palmas – TO a maior parte dos resíduos é encaminhada ao Aterro Sanitário. Segundo Teixeira (2016), a produção de resíduo sólido doméstico no ano de 2014 foi de 77,8 toneladas, tendo um aumento de 74,5% quando comparado com ano de 2008 que produziu 44,6 toneladas. Esse aumento é justificado pelo crescimento populacional da capital.

Segundo a Prefeitura de Palmas, durante os meses de julho e agosto do ano de 2017, 13,1 mil toneladas de lixo comum foram recolhidas de Palmas e encaminhadas ao aterro sanitário. Foram respectivamente 6,5 mil toneladas em julho e 6,697 toneladas em agosto, resultando uma média de 221 toneladas por dia.

Os resíduos produzidos em Palmas – TO são encaminhados para o Aterro Sanitário e dispostos em valas de 180x200 metros e 2,5 metros de profundidade. O Aterro recebe diariamente cerca de 220 toneladas de RSU (TEIXEIRA, 2016).

Considerando o aumento da produção de RSU a cada ano, o Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas – TO (2014), apresentou uma estimativa de

produção de resíduos para os próximos anos, onde se estima que em 2035, será gerado cerca de 370 toneladas de resíduos.

Palmas tem avançado muito em relação ao manejo do lixo e ao descarte e destinação correta dos resíduos sólidos, alcançado principalmente com a implementação do Coleta Palmas, projeto permanente de coleta seletiva de resíduos sólidos de Palmas, sendo eles papel, plástico e metal (PREFEITURA DE PALMAS, 2017).

Os pontos de coleta seletiva recebem materiais recicláveis como papel, papelão, plástico, metal. (VIVOVERDE, 2012). Essas iniciativas cooperam para redução do volume de lixo destinado ao Aterro Sanitário.

2.5 BIOGÁS

A matéria orgânica presente em um aterro sanitário municipal é decomposta por um processo anaeróbio que produz um gás denominado biogás ou “gás de aterro” (REGATTIERE, 2003).

A concentração química do biogás é basicamente composta por gases como o metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e gás amônio (NH_3), em concentrações variáveis, a depender do tempo de vida do aterro, bem como, no estágio de degradação biológica da matéria orgânica ali confinada (BARROS, FILHO E SILVA, 2014).

A presença de metano no biogás o torna um gás combustível, e também poluente, visto que o metano é um gás do efeito estufa. A capacidade de interferir no sistema climático pode ser medida pelo potencial de aquecimento global ou *global warming potential* (GWP). Num horizonte de 100 anos, o GWP do metano é 28 vezes maior do que o do dióxido de carbono, substância de referência do IPCC, 2013.

O metano representa cerca de 45% a 50% do gás de aterros, enquanto o dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros gases compreendem os 55% a 50% remanescentes. A produção de metano em quantidades significativas inicia-se de seis meses a dois anos após a disposição dos resíduos e pode durar décadas dependendo das condições do local de disposição, das características dos resíduos e da quantidade de resíduos no aterro sanitário. O metano produzido migra do seu local de origem no aterro e através de regiões de baixa pressão no solo,

eventualmente atingindo a atmosfera (ZANETTE, 2009). A Tabela 1 demonstra a composição química de biogás de aterro.

Tabela 1: Composição típica do biogás de Aterros Sanitários de resíduos sólidos urbanos.

Gás	Composição	Massa específica (kg/m³)	Poder calorífico (kJ/m³)	Limite de explosividade	Solubilidade em água (g/l)	Propriedades gerais
CH ₄	45 - 60%	0,717	35.600	5 - 15%	0,0645	inodoro, incolor, não tóxico, inflamável
CO ₂	35 - 50%	1,977			1,688	inodoro, incolor, asfixiante
N ₂	0 - 10%	1,25			0,019	inodoro e incolor
O ₂	0 - 4%	1,429			0,043	inodoro e incolor
CO	< 0,1%	1,25	12.640	12,5 - 74%	0,028	inodoro, incolor, tóxico, inflamável
H ₂	< 0,1%	0,09	10.760	4 - 74%	0,001	inodoro, incolor, não tóxico, inflamável
H ₂ S	<0,07%	1,539	N.I	4,3 - 45,5%	3,846	inolor, muito tóxico

Fonte: Marques (2019).

2.5.1 Geração do biogás em Aterros Sanitários

A digestão anaeróbia da matéria orgânica, necessita de alguns fatores ambientais apropriados para a sua fermentação adequada segundo Marques (2019), dentre esses fatores:

- **Condição anóxica:** proporcionando as bactérias metanogênicas um ambiente propício para o seu desenvolvimento, reprodução e metabolismo ideal;

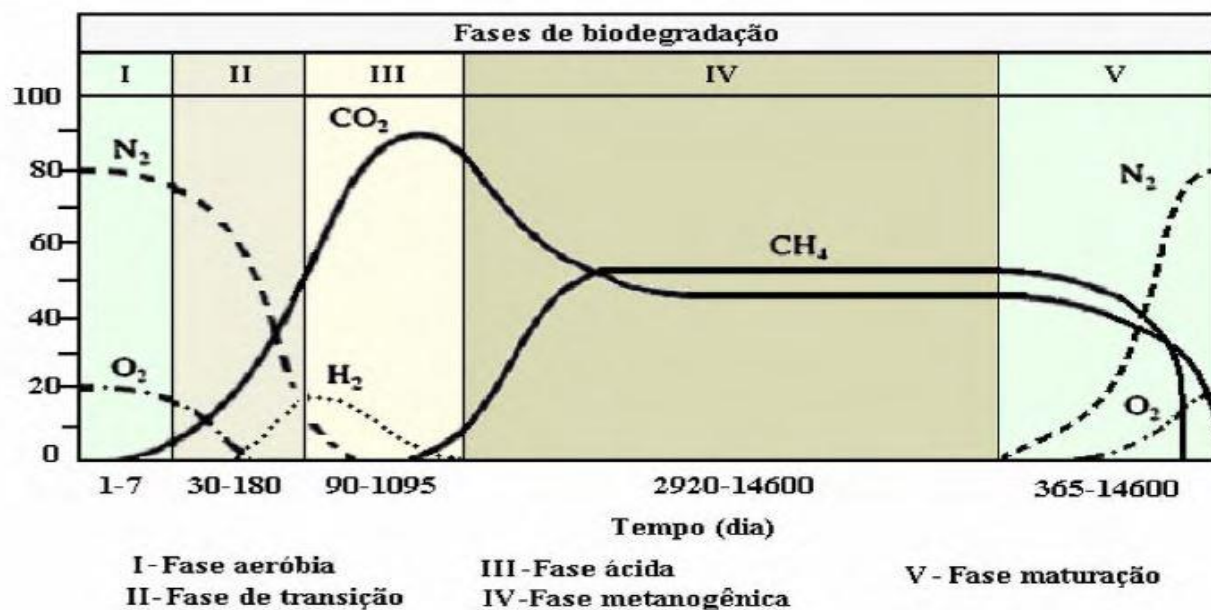
- **Temperatura ideal:** proporcionando aos microrganismos um ambiente ótimo para o seu desenvolvimento, devido a sua alta sensibilidade a alterações bruscas de temperatura;
- **Controle da alcalinidade e do pH:** que são essenciais para o controle da digestão das bactérias, e se não aferido corretamente, pode acarretar no tamponamento do meio de cultura, fazendo com que todas as bactérias presentes no meio sejam neutralizadas;
- **Presença de nutrientes básicos:** necessários para um desenvolvimento microbiológico adequado como carbono, nitrogênio e sais orgânicos;
- **Teor de umidade adequado:** pois, tanto o excesso como a falta de umidade prejudicam no desempenho da fermentação, variando de acordo com o substrato contido no interior da célula do maciço, em torno de 90% do peso total da massa de resíduos;
- **Falta obrigatória de substâncias tóxicas e inibidoras da fermentação:** como os compostos clorados, metais pesados e sais diversos, mesmo que em pequenas concentrações, interferem diretamente no processo fermentativo.

A digestão anaeróbia é realizada por um grupo de microrganismos de forma sequencial, fazendo com que o substrato seja transformado de uma forma mais complexa, nas formas mais simples de assimilação celular (MARQUES, 2019).

A geração de biogás em aterros sanitários, pode ser descrita em cinco fases, sendo a primeira o ajuste inicial de todo o processo; a segunda, consistindo em uma fase de transição; a terceira, compreendendo uma fase ácida de reação; a quarta, a fase metanogênica; e por fim, a quinta e última fase, compreendendo a fase de maturação ou estabilização da matéria orgânica confinada no interior do maciço de resíduos (PROBIOGAS, 2016).

As fases de geração de biogás em aterros sanitários, podem ser demonstradas resumidamente de acordo com a Figura 5, seguidas da sua explicitação fase a fase (MARQUES, 2019).

Figura 5: Fases da biodegradação anaeróbia da matéria orgânica em Aterros Sanitários.



Fonte: MARQUES, 2019.

A primeira fase, também denominada de ajuste inicial, consiste na deposição da matéria orgânica carbonácea presente no resíduo sólido urbano, no momento de descarte no aterro.

Essa fração biodegradável da matéria orgânica, inicia o seu processo de degradação de forma aeróbia, devido à grande quantidade de oxigênio incorporada na massa de resíduos no momento da disposição, e compactação da massa de resíduos na célula do aterro (COELHO E OLIVEIRA, 2012).

Grande parte dos microrganismos responsáveis pela fase inicial da estabilização da matéria orgânica, são obtidos por meio da cobertura de solos, proveniente da compactação diária dos resíduos sólidos urbanos, ou até mesmo de descartes de lodos de estações de tratamento de água e esgoto (SOUTO, 2009).

A duração da fase de degradação aeróbia da matéria orgânica disponível, dá-se nos primeiros dias após o recobrimento dos resíduos, e vai-se extinguindo de acordo com a falta de oxigênio no meio, migrando-se para a fase anaeróbia de degradação (CHERNICHARO, 2007).

A segunda fase, também denominada de fase de transição, consiste no decaimento dos níveis de oxigênio no maciço de resíduo, e o início da fase de degradação anaeróbia da matéria orgânica (POHLAND & HARPER, 1985). Nessa fase, há a grande presença de gás nitrogênio e sulfeto de hidrogênio, resultantes da

redução de sulfatos e nitratos pelas reações de conversão biológica da matéria orgânica em condições anóxicas (CHERNICHARO, 2007).

Com o início da fase anaeróbia, pode ser verificado a conversão da matéria orgânica presente no maciço de resíduos, em metano e dióxido de carbono, estes, resultantes da conversão de ácidos orgânicos e outros produtos intermediários na fase inicial da degradação anaeróbia da matéria orgânica (CHERNICHARO, 2007).

Esta fase é responsável pelo decaimento abrupto da faixa de pH do percolado, isso, devido à grande presença de ácidos orgânicos e dióxido de carbono confinados no interior do maciço de resíduos (SANTOS, 2018).

A terceira fase, também denominada de fase ácida, consiste na produção de grandes quantidades de ácidos orgânicos e pequenas quantidades de hidrogênio gasoso. A acidogênese, parte da conversão dos subprodutos gerados na fase de transição, em compostos de maior facilidade de assimilação pelos microrganismos das etapas posteriores, como os ácidos acético, láctico e butírico (CHERNICHARO, 2007).

A grande presença de ácidos nessa fase, faz com que a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) do percolado e sua condutividade elétrica seja altamente elevados, contribuindo assim, para o grande decaimento do pH e dissolução expressiva de compostos inorgânicos, como por exemplo, os metais pesados (MARQUES, 2019).

A quarta fase, também denominada de fase metanogênicas, consiste na conversão dos ácidos acético e gás hidrogênio em metano e dióxido de carbono, por meio de microrganismos estritamente anaeróbios (PROBIOGAS, 2016).

A formação de metano e dos ácidos, ocorrem de forma simultânea, evitando assim, que haja o acúmulo de ácidos no meio, e impedindo que haja o retardo das reações devido ao decaimento abrupto do pH, embora a taxa de produção de ácidos seja retardada consideravelmente, devido a presença de dióxido de carbono no meio (SANTOS, 2018).

Devido a diminuição da presença de ácidos no meio, nessa fase de degradação da matéria orgânica, o pH sofre um ligeiro aumento, reduzindo assim, as concentrações de DBO, DQO e condutividade elétrica no meio, e no percolado gerado nessa fase (MARQUES, 2019).

O aumento do pH, corrobora para a diminuição de compostos inorgânicos dissolvidos no percolado, tendo assim, como resultado, a diminuição da concentração de metais pesados no percolado nesta fase em específico (BRITO FILHO, 2005).

A fase metanogênica, necessita de um tempo hábil entre as etapas anteriores para a geração de seus substratos, levando cerca de alguns meses para a ignição do processo de produção de metano e dióxido de carbono (PROBIOGAS, 2016).

O tempo de produção de biogás é dependente das condições ambientais externas ao maciço de resíduos, bem como, do crescimento adequado das cepas metanogênicas, podendo durar de alguns meses a décadas de produção de biogás (BRITO FILHO, 2005).

A Tabela 2 apresenta o intervalo de duração da estabilização da matéria orgânica no interior do maciço de resíduos, bem como, o período de geração de biogás no Aterro (MARQUES, 2019)

Tabela 2: Duração das fases de degradação da matéria orgânica em Aterros Sanitários.

Fases	Intervalo de duração
I	Aproximadamente 1 semana
II	1 mês a 6 meses
III	3 meses a 3 anos
IV	8 anos a 40 anos
V	1 ano a mais de 40 anos

Fonte: MARQUES, 2019

A quinta e última fase, também denominada de fase de maturação, consiste na estabilização parcial e/ou total da matéria orgânica presente no interior do maciço de resíduos (PROBIOGAS, 2016).

Após grande parte da matéria orgânica carbonácea disponível ter sido convertida em subprodutos energéticos, como o metano e dióxido de carbono, toda umidade contida nas zonas mais superficiais do maciço de resíduos continua migrando para parte inferior do maciço reagindo com o material que até então já havia sido degradado (BRITO FILHO, 2005).

A duração de cada fase do processo de produção do biogás, está ligada intimamente na distribuição e qualidade da matéria orgânica presente no maciço de resíduos (SILVA, 2012), onde, a depender de fatores biológicos, como a concentração de nutrientes disponíveis aos microrganismos, teor de umidade da massa de resíduos

e fatores ambientais externos, como temperatura e pressão exercida diretamente na massa de resíduos, podem acelerar ou retardar o processo de produção de metano e estabilização da matéria orgânica.

Não se pode afirmar com exatidão, o tempo máximo de duração das cinco fases de produção de metano e estabilização da matéria orgânica carbonácea, presente no maciço de resíduos (MACIEL, 2009).

A velocidade da degradação da matéria orgânica é aferida de acordo com a produção do biogás, tendo seu ápice nos dois primeiros anos iniciais da operação, e sua vida útil se dá por volta de 30 anos após o encerramento da disposição dos resíduos sólidos no Aterro, podendo ainda detectar-se a produção ínfima de biogás, após 40 anos de seu encerramento (BORBA, 2006; SILVA, 2012).

As fases de estabilização da matéria orgânica não são bem definidas, uma vez que a disposição da matéria orgânica no maciço de resíduos não é realizada de forma pontual e concentrada, sendo disposta no maciço de resíduos no decorrer de todo o período de vida útil do Aterro (BORBA, 2006).

Assim, enquanto a zona inferior do maciço de resíduos está passando pela fase de degradação anaeróbia, por serem resíduos dispostos no início da operação do Aterro, os resíduos recém dispostos, estão passando por fases aeróbias, devido a incorporação do ar atmosférico no momento de disposição e compactação dos resíduos (SILVA, 2012).

A produção de metano nos períodos iniciais da geração do biogás, varia em torno de 40% logo após o início da estabilização da matéria orgânica no interior do maciço de resíduos (BRITO FILHO, 2005).

No período médio de produção, que varia de 1 ano e meio a 5 anos, a produção chega a seu ápice, variando de 60 a 65% de acordo com o grau de estabilização da matéria orgânica carbonácea no interior do maciço de resíduos (BORBA, 2006).

Estudos recentes, revelam que a geração de biogás e a produção de metano em um Aterro encerrado, pode chegar a 40 anos após o término das suas descargas diárias de matéria orgânica, revelando assim, a sua possibilidade de reaproveitamento energético por um longo período de tempo (FERNANDES, 2009).

2.5.2 Aplicação do biogás

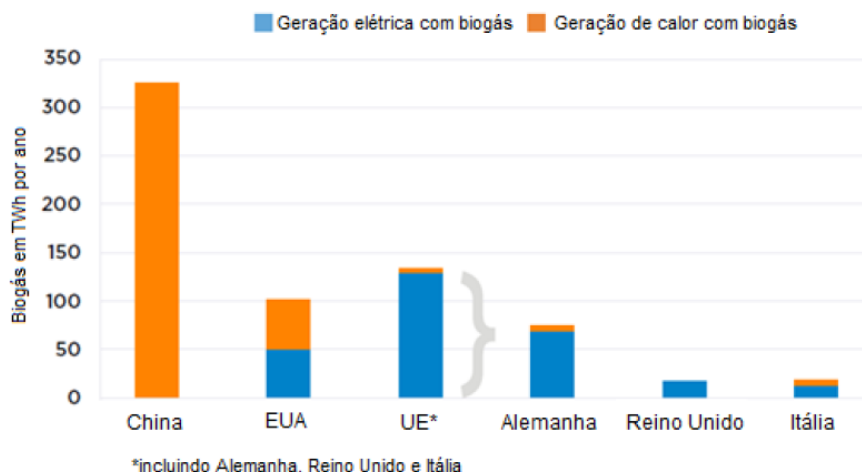
Segundo Zanette (2009), o biogás pode ser utilizado em praticamente todas as aplicações desenvolvidas para o gás natural. Para algumas aplicações, entretanto, o biogás necessita ser tratado. As formas mais comuns para utilização do biogás são: aquecimento e geração de eletricidade, podendo ser aplicado também como combustível veicular.

Para a geração de eletricidade, a utilização de biogás em sistemas de combustão interna é uma tecnologia bem estabelecida e extremamente confiável. Milhares de equipamentos são operados em estações de tratamento de efluentes, aterros e plantas de biogás. O tamanho dos equipamentos varia de 12 kW em pequenas fazendas a até vários MW em grandes aterros (IEA, 2005).

Na disposição de resíduos sólidos em aterros, a recuperação do biogás produzido tornou-se uma tecnologia padronizada na maioria dos países industrializados para recuperação de energia e por razões ambientais e de segurança. Cerca de 1000 aterros em todo o mundo realizam a recuperação do biogás, a maioria deles nos Estados Unidos e Europa (WILLUMSEN, 2003). Na figura, pode-se observar a produção de energia elétrica através do biogás em alguns países.

Na Figura 6 observa-se que a Alemanha lidera a produção de biogás na Europa, gerando aproximadamente 70TWh por ano, seguido pelos EUA que gera 50TWh e também utiliza boa parte de sua produção para geração de calor. Já a China, utiliza toda sua produção de biogás na geração de calor.

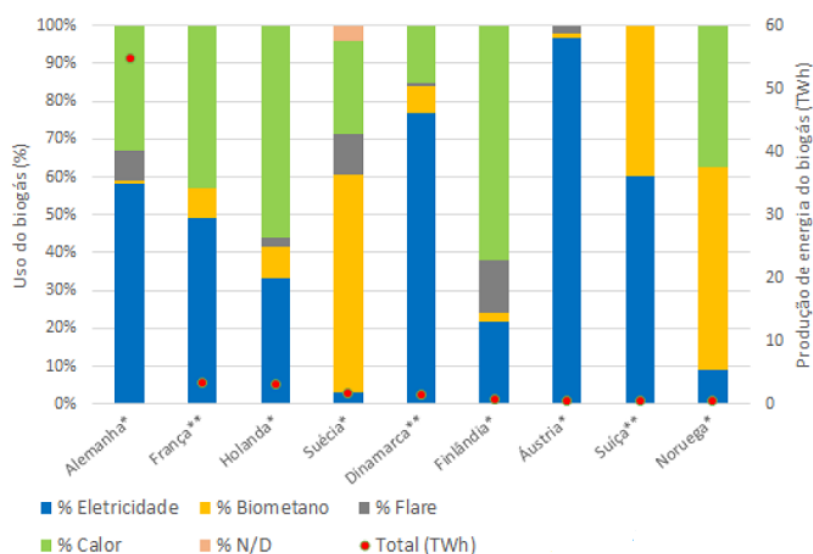
Figura 6: Geração de energia ou calor através do biogás em alguns países.



Fonte: Adaptado de IRENA (2017).

A maioria dos países demonstrados utilizam boa parte do biogás produzido na geração de energia elétrica. A Figura 7 mostra que Alemanha, Dinamarca, Áustria e Suíça tem mais de 50% de sua produção de biogás destinada à geração de eletricidade, enquanto a França, Holanda e Finlândia destinam a maior parte do biogás para produção de calor. A Suécia e Noruega utilizam o biogás em sua maioria para produção de biometano para utilização como combustível veicular.

Figura 7: Participação das formas de utilização do biogás em países da Europa.



Fonte: Elaborado a partir de IEA Bioenergy (2016).

No Brasil, já existem usinas que utilizam o biogás para geração de energia, a Usina Termoverde (Figura 8), instalada no Aterro Sanitário do município de Caieiras, produz energia a partir do metano e desponta como importante reforço energético para a região. Com potencial de geração de 29,5 megawatts (MW) de energia limpa a partir de resíduos urbanos, a maior termelétrica movida a biogás da América Latina foi recém-inaugurada na região da grande São Paulo (Gazeta do Povo, 2016).

Figura 8: Usina geradora de energia através de biogás no Aterro de Caieiras.



Fonte: Gazeta do povo (2016).

Outra usina que produz energia a partir de gás de aterro é a termoelétrica Biogás, apresentada na Figura 9. Em operação no perímetro do Aterro Sanitário Sítio São João, localizado na zona Leste da cidade de São Paulo e sob a administração da concessionária Ecurbis Ambiental, tem capacidade de extração de metano de 20 mil m³ por hora (Infraestrutura urbana, 2012).

Figura 9: Usina Biogás no Aterro Sanitário Sítio São João.

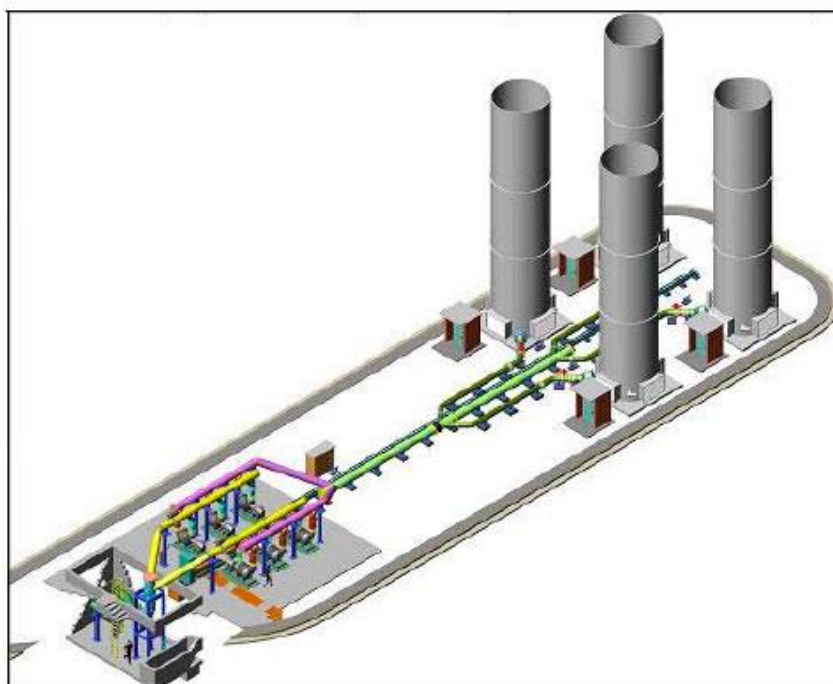


Fonte: Gasnet (2008).

Em funcionamento desde 2007, a Usina Biogás já utiliza todo o gás metano extraído do aterro, desativado em 2008, para a geração de 200 mil MWh de energia, que é vendida para a Eletropaulo, empresa estatal de distribuição de energia elétrica. A energia limpa produzida é suficiente para abastecer uma cidade de até 400 mil habitantes (Infraestrutura urbana, 2012).

A tecnologia proposta para a exploração do gás bioquímico gerado no Aterro Sanitário Sítio de São João permitirá extrair e destruir o componente metano reduzindo a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. O equipamento principal do projeto é o queimador enclausurado (flare) que destrói o componente metano do gás de aterro sanitário com taxas acima de 98% de eficiência, reduzindo a emissão de odores e impactos ambientais adversos (Embalagem sustentável, 2011). O projeto da Usina Biogás é ilustrado pela Figura 10.

Figura 10: Projeto da Usina Biogás.



Fonte: Embalagem sustentável (2011).

O aterro sanitário de Guatapar (SP) começou a gerar energia elétrica a partir de biogás, obtido das 2,2 mil toneladas de lixo doméstico recolhidas diariamente em 20

idades da região de Ribeirão Preto (SP). A usina de bioenergia (Figura 11), que iniciou as operações em maio de 2014, é a primeira do interior de São Paulo. Segundo o diretor de novos negócios da empresa, Alexandre Alvim, a planta de Guatapar tem capacidade para gerar 4,2 megawatts de energia, suficiente para abastecer uma cidade com 18 mil habitantes (G1, 2014).

Para Alvim, a energia de biogás é uma alternativa à energia gerada por hidrelétricas ou termoelétricas. “Resolvemos o problema ambiental com correto tratamento dos gases gerados por aterros sanitários e também o problema de energia, que precisa melhorar sua dependência da matriz hídrica” (G1, 2014)

Figura 11: Motogeradores da Usina de Guatapar – SP.



Fonte: G1, 2014.

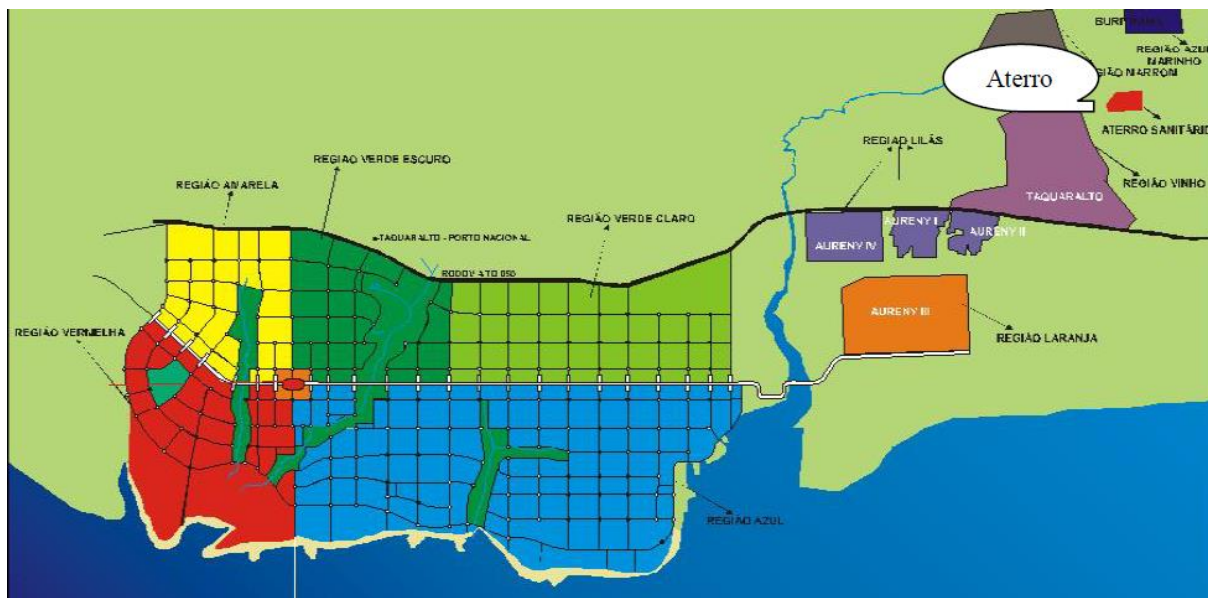
Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o Brasil tem potencial para obter energia proveniente do lixo suficiente para abastecer uma cidade com 1,5 milhão de pessoas. “O potencial de geração de energia limpa e renovável tende a ser ainda maior, pois quase 30 milhões de toneladas de resíduos por ano ainda não têm tratamento adequado”, diz o diretor executivo da Abrelpe, Carlos Silva Filho.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Local da Pesquisa

O Aterro Sanitário de Palmas está localizado na área rural, ao sul do município, distante aproximadamente 25 km do centro do plano diretor e cerca de 6 km do bairro de Taquaralto, em uma região de baixa densidade demográfica e com área original de 92.914ha, conforme o mapa da Figura 12.

Figura 12: Mapa de localização do Aterro Sanitário de Palmas.



Fonte: MARQUES (2014).

A área do aterro encontra-se cercada. Na entrada existe uma guarita de controle onde os responsáveis coletam as segundas informações: tipo de resíduos, placa, entrada e saída de veículos e pessoas (MARQUES & AZEVEDO, 2018). Após a guarita ocorre o controle de cargas por meio de balança com capacidade de 30 toneladas, permitindo conhecer quantidade dos resíduos gerados. A dispersão e compactação dos resíduos nas células, impermeabilizadas com geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) de 2mm, é realizada pelo uso permanente de trator de esteira. São empregados também equipamentos como pá mecânica, retroescavadeira e caminhão basculante. Na Figura 13, pode-se observar uma célula do Aterro Sanitário bem como a membrana utilizada para impermeabilização.

Figura 13: Vala do Aterro Sanitário de Palmas.



Fonte: MARQUES (2017).

O sistema de drenagem do chorume gerado no aterro é constituído por tubos de concreto perfurados divididos em faixas retangulares na base do aterro, os drenos são interligados aos de drenagem de gases e direcionam o chorume para o tratamento biológico (MARQUES & AZEVEDO, 2018). A drenagem de gases é realizada por tubos verticais, perfurados de concreto, de 0,40 m de diâmetro interno, protegidos com brita nº 4 e tela, conforme Figura 14.

Figura 14: Drenos de biogás



Fonte: Autor (2019).

O tratamento do chorume é realizado por dois sistemas, compostos por 03 lagoas de tratamento e uma vala de infiltração, para cada sistema, sendo as lagoas respectivamente 01 lagoa anaeróbia, 02 facultativas e uma vala de infiltração.

As lagoas ficam em uma área de 26 mil m², onde o chorume passa por um tratamento natural feito pelas próprias bactérias e micro-organismos presentes no líquido. A Figura 15 mostra um dos sistemas de lagoas do Aterro Sanitário de Palmas, na última lagoa de decantação a água já conta com mais de 80% de pureza.

Figura 15: Sistema de lagoas para tratamento de chorume.



Fonte: MARQUES, J. & AZEVEDO, A (2018).

3.2 Medição de fluxo e coleta de biogás

Para realização das medições do biogás, foi utilizado 01 dreno vertical, com medições semanais e com perfil diário. Para medir a vazão de biogás foi necessário fazer um procedimento adaptativo, conforme Figura 16, com o fechamento do dreno vertical com tampa de concreto com saída de biogás através de orifício central, adaptado através de uma conexão de aço e tubulação de interligação à válvula de saída de biogás, onde se conecta através de tubulação de cobre ao medidor de vazão.

Figura 16: Adaptação dos drenos para aplicação do medidor.



Fonte: MARQUES (2018).

A medição de vazão do biogás foi realizada através de um medidor de gás GLP, da Marca LAO G-0,6 Predial (Figura 17), interligado através de conexão de cobre maleável de 3/8, com vazão máxima de 0,016 m³/h, com sistema totalizador com modelo ciclométrico de 8 dígitos com proteção com tampa de policarbonato transparente (Figura 16).

Figura 17: Medidor de vazão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.



Fonte: MARQUES (2018).

3.3 Coleta e análise de biogás

A coleta do biogás (Figura 18) foi realizada com o auxílio de saco plástico tipo BAG e seringa plástica de 100 mL. Posteriormente, usando um recipiente de vidro à vácuo com tampa vedante pressurizada, o biogás foi armazenado e enviado para análise cromatográfica. Foram enviadas 03 amostras de biogás para análise dos principais constituintes da mistura gasosa. A coleta foi realizada as 10 h da manhã. Os ensaios foram realizados na Universidade de São Paulo.

Figura 18: Coleta de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins: (a) drenagem do biocombustível e (b) coleta de amostra para posterior análise.



(a)

(b)

Fonte: Autor (2019).

A cromatografia é uma técnica quantitativa, que tem por finalidade geral a identificação de substâncias de misturas. Usando propriedades como solubilidade, tamanho e massa. A Tabela 3 apresenta as condições a serem empregadas na análise do biogás do aterro sanitário. Serão empregados dois detectores, o FID (identificação dos hidrocarbonetos) e TCD para os demais gases (CO , CO_2 , H_2 , O_2 , N_2).

Tabela 3 - Condições operacionais do CG/TCD/FID utilizadas na análise do biogás.

Condições de Análises				
Cromatógrafo	T_{injetor}	T_{coluna}	T_{detector}	Vazão do Gás de Arraste
CG Reforma	25°C	Isotérmico	TCD1 100°C	25 mL/min
		60°C	TCD2 100°C	175 kPa
			FID 250°C	175 kPa

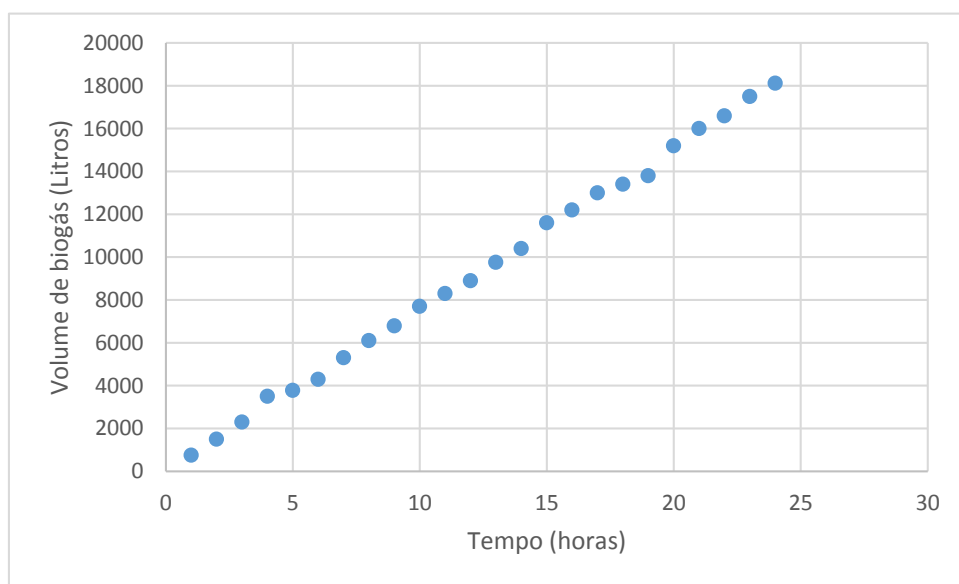
Fonte: Autor (2018)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Perfil de vazão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins

O Gráfico 5 apresenta o perfil de vazão diária de biogás no Aterro Sanitário de Palmas, Tocantins, sendo a quantidade de biocombustível aferida em um dos drenos de escape de gás do sistema. O volume de biogás acumulado diário foi de 18,12 m³ em um dreno. Atualmente, no Brasil, as principais utilizações do biogás captado nos aterros sanitários é a sua queima direta em flares apenas convertendo o metano (CH₄), presente no biogás em dióxido de carbono (CO₂), composto esse, vinte uma vez menos poluente que o metano. Já os aterros sanitários que possuem um sistema de captação e tratamento de biogás, a sua utilização é estreitamente voltada apenas para os usos internos dentro da área do aterro, como a iluminação pública das áreas de acesso, e o abastecimento de pequenas centrais elétricas instaladas dentro dos Aterros Sanitários em questão (ZANETTE, 2009).

Gráfico 5: Perfil de vazão diária de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.



Fonte: Autor (2019).

O biogás gerado em Aterros Sanitários é um combustível adequado para a geração de energia elétrica, por meio de motogeradores de combustão interna, ou turbinas movidas a gás, devido a sua estabilidade calorífica, e a sua facilidade de operação (SANTOS et al., 2018). Diversas tecnologias têm surgido a fim de comprovar

a eficácia do aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica, via sistemas de combustão interna, tecnologia essa, já bem estabelecida e extremamente confiável para a geração de eletricidade (BARROS, FILHO e SILVA, 2014).

Em países desenvolvidos, o biogás também é utilizado como gás natural veicular (GNV), necessitando de um pré-tratamento, para atingir os parâmetros necessários do gás natural, utilizado nos veículos adaptados para esse fim. Para essa utilização, o biogás precisa ser purificado, aumentando assim o seu poder calorífico e ficando livre de substâncias como o vapor de água, amônia, compostos de enxofre e os siloxanos, evitando assim, substâncias tóxicas que causam danos mecânicos nas paredes do motor a combustão, bem como, nas tubulações de distribuição do biogás. Em síntese, a purificação do biogás, significa a remoção de todos os compostos que não são aproveitados para a combustão, como dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3), siloxanos e vapor de água (H_2O), resultando apenas no gás livre de impurezas e com uma concentração de metano (CH_4) superior a 95% de pureza, ideal para o uso como gás natural veicular e distribuível e injetável na rede de gás natural convencional.

São inúmeras as vantagens ligadas a distribuição do biogás na rede de gás natural, dentre elas, a disponibilização do biogás em áreas distantes do local de produção, permitindo o alcance do biogás tratado, a novos consumidores finais, aumentando o seu aproveitamento ambiental, mesmo que, em locais com difícil acesso (PROBIOGÁS, 2016).

4.2 Análise cromatográfica do biogás produzido no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos durante a caracterização das amostras de biogás coletadas no Aterro Sanitário de Palmas, Tocantins. O principal constituinte foi o metano com um teor médio de 55,30 % em termos de abundância relativa na mistura gasosa. Os valores encontrados para os dois principais constituintes (CH_4 e CO_2) nas amostras coletadas no Aterro Sanitário de Palmas estão bem próximos dos dados experimentais obtidos por Silva (2010) e Souza-Filho (2016) para biogás de aterros sanitários.

Tabela 4: Principais constituintes de amostras de biogás do Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.

Componentes	Quantidade (%)				
	Aterro Sanitário de Palmas ⁽¹⁾			Outros autores	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Silva (2010)	Souza-Filho (2016)
CH ₄	51	55	60	50 – 75	57
CO ₂	49	45	40	25 – 40	42,9
CO	-	-	-	0 – 0,1	-
H ₂ S	-	-	-	0,1 – 0,5	-
H ₂	-	-	-	1 – 3	-
NH ₃	-	-	-	0,1 – 0,5	-
N ₂	-	-	-	0,5 – 2,5	-
O ₂	-	-	-	0,1 – 1	0,1

⁽¹⁾ valores obtidos em termos de concentração relativa entre os dois principais constituintes.

Fonte: Universidade de São Paulo (2019).

O biometano (CH₄) é um gás oriundo do biogás, sendo obtido através da retirada de vapor de água, gás carbônico, sulfeto de hidrogênio e tem alto poder de combustão. Como combustível automotivo tem comportamento semelhante ao GNV (Gás Natural Veicular).

As tecnologias existentes e comercializadas para limpeza e purificação do biogás já são empregadas para outros fins, sendo principalmente a separação por membrana, absorção física, absorção química, absorção por balanço de pressão (Pressure Swing Adsorption – PSA) e lavagem com água pressurizada (Pressured Water Scrubbing– PWS). Estas tecnologias são utilizadas em diversos países que se

destacam por serem os maiores produtores de biogás e biometano na União Europeia, como Alemanha e Suécia. Técnicas menos utilizadas incluem a separação criogênica e separação em bocal sônico (esta última ainda em desenvolvimento).

Experiências brasileiras recentes têm demonstrado a potencialidade de se gerar biogás/biometano com a qualidade exigida para sua disseminação. No interior do Paraná, a planta da GeoEnergética já gera, de maneira flexível, 7 MW de energia a partir de resíduos do setor sucroenergético. No Rio de Janeiro o aterro de Dois Arcos produz 15 mil metros cúbicos por dia de biometano de elevada qualidade, a partir de Resíduos Sólidos Urbanos.

O CIBiogás tem demonstrado os benefícios sociais, ambientais e econômicos da utilização de resíduos da pecuária a partir de diversos modelos de negócio, tais como a Granja Haacke e o Condomínio Ajuricaba. Um dos maiores projetos de aproveitamento de biogás do mundo também está instalado no Brasil, gerando com qualidade 30 MW de energia elétrica a partir dos Resíduos Sólidos Urbanos, no aterro de Caieiras. Ainda no setor de saneamento, a CS Bioenergia está investindo em uma planta de geração de energia elétrica, a partir do biogás gerado na co-digestão de lodo de esgoto e resíduos de alimentos de grandes geradores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resíduos sólidos urbanos se apresentam como uma fonte alternativa de uso energético, pois resultam em materiais com potencial para geração de energia. Por ser ambientalmente favorável, o aproveitamento energético e racional do biogás de aterro sanitário tende a promover o desenvolvimento de regiões menos favorecidas economicamente, por meio da criação de empregos e da geração de receita.

O principal constituinte no biogás da cidade de Palmas (TO) foi o metano com uma concentração de 55,30 % em termos de abundância relativa na mistura gasosa. Em termos de produção de biogás foi aferido um volume acumulado diário de 18,12 m³ no local da pesquisa, em um dos drenos. Considerando a existência de 37 drenos de biogás no Aterro Sanitário de Palmas, pode-se estimar uma produção de aproximadamente 670,44 m³ de biogás por dia.

A quantidade de biogás produzida diariamente justifica a implantação de um projeto para sua utilização, podendo ser para gerar energia e atender as demandas

do próprio aterro, para produzir calor e ser utilizado na cozinha do aterro, ou simplesmente ser queimado (flare) e reduzir a emissão deste gás na atmosfera.

O conhecimento gerado também terá grande relevância para a sociedade, no que tange uma possível exposição dos resultados obtidos bem como as recomendações para um melhor aproveitamento da energia do biogás de aterros sanitários na região Norte do Brasil. Além disso, prevê-se potencializar a formação de recursos humanos qualificados na área de recursos renováveis e biocombustíveis.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AGRAWAL, S; SINGH, R; MURTAZA,Q. **A literature review and perspectives in reverse logistics. Resources, Conservation and Recycling.** Amsterdam. 2015.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** São Paulo, 2017.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos sólidos – classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; SILVA, T. R. D. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150 - 164, february 2014.

BOSCOV, M.E.G. **Geotecnia Ambiental.** São Paulo: Oficina de texto, 2008.

BRASIL. Lei n.12.305, 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília. **Diário Oficial da União.** 2010.

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.getres.ufrj.br/pdf/FILHO_LFB_05_t_M_int.pdf>. Acesso em: 15 mar 2019.

CASTRO, M. C. A. A. **Avaliação de um sistema australiano de lagoas no tratamento conjunto de esgoto sanitário e líquidos percolados gerados em aterro sanitário.** São Carlos, 2001.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.

COELHO, T. C.; OLIVEIRA, R. M. S. D. **Estimativa da produção teórica do metano gerado no Aterro Sanitário de Palmas –TO.** Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 1, p. 177 - 189, 2012.

EMBALAGEM SUSTENTÁVEL. **Aterro Sanitário Sítio São João. Elisa Quartim.** 2011. Disponível em: <http://embalagensustentavel.com.br/2011/12/02/aterro-sanitario-sitio-sao-joao/>. Acesso em: 15 de março de 2019.

FERNANDES, J. G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental.** Belo Horizonte: Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio

Ambiente) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/516M.PDF>>. Acesso em: 15 de março de 2019.

G1. Entra em operação 1ª usina do interior de SP a gerar energia a partir do lixo. Ribeirão e Franca. 2014. Disponível em: <http://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/noticia/2014/08/entra-em-operacao-1-usina-do-interior-de-sp-gerar-energiartir-do-lixo.html>. Acesso em: 15 de março de 2019.

GASNET. Biogás gera eletricidade e créditos de carbono a partir do lixo. Revista Elo. 2008. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/conteudo/4578>. Acesso em: 15 de março de 2019.

GAZETA DO POVO. Do lixo à rede elétrica: SP ganha a maior térmica verde da América Latina. São Paulo. 2016. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/>. Acesso em 15 de março de 2019.

INFRAESTRUTURA URBANA. Energia. A partir da decomposição do lixo, usina produz energia elétrica para 800 mil habitantes. 2012. Disponível em: <http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/17/artigo262877-1.aspx>. Acesso em: 15 de março de 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, Biogas production and utilisation. 2005.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA BIOENERGY. Country Reports Summary 2015. 2016.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Guidelines for national greenhouse inventories: reference manual. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 2ª ed., São Paulo, 2000.

IRENA, Biogas for road vehicles: Technology brief. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi, 2017.

LAJOLO, R. D. Cooperativa de catadores de materiais recicláveis: guia para implantação. São Paulo: IPT, 2003.

LANZA, V.C.V; CARVALHO, A.L. Orientações básicas para a operação de aterro sanitário. Belo Horizonte, 2006. Disponível em:

<http://www.feam.br/images/stories/arquivos/Cartilha%20Aterro2.pdf>. Acesso em: 15 de março de 2019.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. Recife: Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5213>>. Acesso em: 15 de março de 2019.

MANCINI, P.J. P. **Uma avaliação do sistema de coleta informal de resíduos sólidos recicláveis no município de São Carlos, SP**. São Carlos, 1999.

MARQUES, J. & AZEVEDO, A. **O que faço com meu lixo? Resíduos sólidos da geração ao destino final**. Palmas. 2018.

MARQUES, M. S. **Qualidade ambiental e estudo da produção e aproveitamento energético do biogás produzido pelo Aterro Sanitário de Palmas – TO**. Palmas: Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Tocantins, 2019.

PAVAN, M. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: uma avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**. São Paulo, 2010.

POHLAND, F. G.; HARPER, S. R. **Critical review and summary of leachate and gas production from landfill**. Cincinnati, OH: USEPA, 1985. 212 p.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. **Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão**. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 11, p. 147 - 157, jul./dez.2010.

PETERSON. M., et al. **Guia prático do biogás: geração e utilização**. 5ª Ed. PROBIOGÁS, 2010.

PIEDADE, M.; AGUIAR P. **Opções de gestão de resíduos urbanos**. Entidade reguladora dos serviços de águas e resíduos. Série Guias técnicos. Lisboa. 2010.

PLANO DE SANAMENTO BÁSICO DE PALMAS – TOCANTINS. Palmas. 2014.

PREFEITURA DE PALMAS. **Coleta de lixo diária recolhe mais de 13 mil toneladas em dois meses na Capital**. Palmas. 2017. Disponível em: <http://www.palmas.to.gov.br/secretaria/infraestrutura/noticia/1505873/coleta-de-lixo-diaria-recolhe-mais-de-13-mil-toneladas-em-dois-meses-na-capital/>. Acesso: 15 de março de 2019.

PREFEITURA DE PALMAS. **Coleta Palmas garante descarte eficiente de papel, plástico e metal.** 2017. Disponível em: <http://www.palmas.to.gov.br/secretaria/fundacao-de-meio-ambiente/noticia>. Acesso em 15 de março de 2019.

PREFEITURA DE PALMAS. **Quinta célula do aterro sanitário da Capital já está em operação.** 2017. Disponível em: <http://www.palmas.to.gov.br/secretaria/infraestrutura/noticia/1503745/quinta-celula-do-aterro-sanitario-da-capital-ja-esta-em-operacao/> Acesso em: 15 de março de 2019.

PROBIOGÁS. **Biometano como combustível veicular.** Brasília: Ministerio das Cidades, 2016. 76 p. Disponível em: https://www.giz.de/en/downloads/giz_biogas_como_combustivel_digital_simples.pdf. Acesso em: 15 de março de 2019.

REGATTIERI, C.R. **Estudo da utilização da energia do biogás na incineração do chorume em aterros sanitários – Eliminação simultânea de duas fontes poluentes – Gasosa e líquida.** São Carlos, 2003.

ROCCA, A. C. C. **Resíduos sólidos industriais.** 2ª ed., São Paulo, 1993.

SANTOS, E. N.; NETO, J. L. S. **Caracterização operacional do Aterro Sanitário de Palmas.** Palmas.

SANTOS, I. F. S. D. et al. Combined use of biogas from sanitary landfill and wastewater treatment plants for distributed energy generation in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 376 - 388, 2018.

SILVA, A. S. **Avaliação da Toxicidade dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande – PB.** Campina Grande - PB: Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

SOUTO, G. D. B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros – estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“stripping”).** São Carlos. 2009.

SPIGOLON, L. M. G. **A otimização da rede de transporte de RSU baseada no uso do SIG e análise de decisão multicritério para a localização de aterros sanitários.** São Carlos, 2015.

STOLKA, O. S. **The development of green logistics for implementation sustainable development strategy in companies.** Procedia - Social and Behavioral Sciences, New York, v. 151, p. 302 – 309, 2014.

TEIXEIRA, G. **Análise da produção urbana de resíduos sólidos no município de Palmas – TO, Brasil.** Palmas, 2016.

VIANA, M.M. **Obtenção e utilização de produtos de pirólise de lodo de esgoto para adsorção de poluentes em meio aquoso.** São Paulo. 2013.

VIVOVERDE. **Agora Palma/TO tem pontos de entrega voluntária de materiais recicláveis.** 2012. Disponível em: <https://vivoverde.com.br/agora-palmasto-tem-pontos-de-entrega-voluntaria-de-materiais-reciclaveis%C2%A0%C2%A0/>. Acesso em: 15 de março de 2019.

WILLUMSEN H. “Experience with landfill gas recovery plants”. **Renewable Energy.** 2003

ZANETTE, A.L., 2009. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil.** Rio de Janeiro, 2009.