



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS - TO**

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

**ANTÔNIO ADELÚZIO GOMES DE AZEVEDO**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO  
DO BIOGÁS GERADO NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS - TO**

**PALMAS-TO**

**2021**

**ANTÔNIO ADELÚZIO GOMES DE AZEVEDO**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO DO  
BIOGÁS GERADO NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS - TO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS-TO

2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

D285a De Azevedo, Antonio Adelízio Gomes de Azevedo.  
ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO  
APROVEITAMENTO DO BIOGÁS GERADO NO ATERRO SANITÁRIO DE  
PALMAS - TO: APROVEITAMENTO DO BIOGÁS GERADO NO ATERRO  
SANITÁRIO DE PALMAS - TO . / Antonio Adelízio Gomes de Azevedo De  
Azevedo. – Palmas, TO, 2021.  
80 f.  
  
Relatório de Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus  
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Ambiental, 2021.  
Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza Pedroza  
Coorientador: Dr<sup>a</sup> Claudia Silva Aguiar Rezende Aguiar Rezende  
  
1. Resíduos Sólidos. 2. Aterro sanitário de Palmas - TO. 3. Viabilidade  
Técnica e Econômica. 4. Biogás em Aterro Sanitário. I. Título

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer  
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizada desde que citada a fonte.  
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184  
do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

## FOLHA DE APROVAÇÃO

ANTONIO ADELÚZIO GOMES DE AZEVEDO

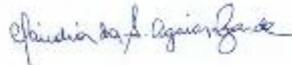
### ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS GERADO NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS - TO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

#### BANCA EXAMINADORA



Dr. Marcelo Mendes Pedroza (Presidente da Banca)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



Dr. Cláudia da Silva Aguiar Rezende (Membro Titular Interno)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



Dr. João Evangelista Marques Soares (Membro Titular Externo)  
Escola de Governo – Prefeitura Municipal de Palmas - TO

Aprovada em: 20 de janeiro de 2021  
Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas  
O evento foi realizado por meio de vídeo conferência, conforme Art. 56-A da Resolução nº 13, de 23 de março de 2017, pela necessidade cautelar de distanciamento social em virtude da pandemia causada pelo coronavírus (SARS-CoV-2)

## DEDICATÓRIA

*Ao Grande Arquiteto do Universo, DEUS, gratidão.  
Meus pais, exemplo de sabedoria.  
Meus filhos, exemplo de amor.  
Aos meus amigos, pelo incentivo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Com bastante experiência de vida, vivendo já na casa dos cinquenta, ainda assim, com muita disposição para o conhecimento.

Sou muito grato a DEUS, meus familiares, meus filhos: Filipe, Alice, Carlos e David, amigos, colegas de trabalho, pois sem os quais não chegaria onde estou.

Professor, amigo Dr. João Marques grande profissional, com o qual escrevemos um livro e vários artigos relativos ao tema dessa dissertação.

A Professora Dr<sup>a</sup>. Cláudia Resende pelas recomendações e oportunidades que ajudaram a melhorar o conteúdo desse estudo.

Ao professor Dr. Marcelo Pedroza, pessoa que conheci e a prendi a respeitar como amigo, mestre e meu orientador.

## RESUMO

A intensidade das atividades humanas e velocidade do crescimento populacional sem planejamento tem dificultado a gestão e o manejo dos sólidos urbanos, os quais na maioria das vezes são descartados de forma inadequada causando grandes problemas sócio ambientais. Esse trabalho teve como objetivo principal analisar a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do biogás produzido no Aterro Sanitário de Palmas – TO como fonte de energia renovável. A pesquisa foi desenvolvida no Aterro Sanitário de Palmas, localizado na área rural, ao sul do município, distando 25 km do centro do plano diretor. Para a concretização dos objetivos dessa pesquisa foram desenvolvidas as seguintes etapas metodológicas: (a) produção e caracterização física e química dos RSU do aterro sanitário, (b) medição de fluxo e coleta de biogás e (c) análise da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do biogás produzido no Aterro Sanitário de Palmas. Em 2008 a produção de resíduos domésticos em Palmas - TO foi de 46.317 toneladas, sendo que em 2019 o município produziu 97.200, portanto um aumento de 47,6% considerado normal em relação ao aumento populacional do município e a mudança de hábitos da população. Feita a caracterização dos resíduos através do processo de gravimetria foram encontrados os seguintes resultados: fração orgânica com 53,70%, plástico com 25,42%, papel/papelão com 6,00%, vidro com 4,55%, tecido com 1,95%, metais com 1,60%. Tendo um percentual de 53,70% de matéria orgânica, constatou-se um grande potencial de geração de metano no Aterro Sanitário de Palmas – TO. Constatado esse potencial foi feita a captação e medição do biogás cujo volume foi de 1.170m<sup>3</sup>/h. O estudo mostrou que existe viabilidade técnica para o processo de aproveitamento de biogás do aterro em questão visando a produção de energia, uma vez que nas dependências do aterro já existe a predisposição de captação dos gases. Foi estimado um período de 6 meses para implantação e início de operação de uma UTE que inicialmente funcionará com potência de 1MW o que equivale a 678.900kW, média mensal, utilizando-se um grupo gerador capaz de gerar 200kWh de energia elétrica. Na análise econômica foi constatada perfeita viabilidade levando em consideração a venda de energia elétrica para concessionária local, assim como as receitas associadas às reduções das emissões dos gases de efeito estufa geradas através da venda dos créditos de carbono.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos, Aterro Sanitário de Palmas, Viabilidade Técnica e Econômica, Biogás em Aterro Sanitário, Energia renovável de biometano (RSU).

## SUMMARY

The intensity of human activities and the speed of population growth without planning has urban solid, which most of the time are discarded inappropriately causing major environmental and social problems. This work had as main objective to analyze the technical and economic feasibility of using the biogas produced at the Landfill in Palmas - TO as a renewable energy source. The research was carried out at the Palmas Landfill, located in the rural area, south of the municipality, 25 km away from the center of the master plan. To achieve the objectives of this research, the following methodological steps were developed: (a) production and physical and chemical characterization of the MSW at the landfill, (b) flow measurement and biogas collection and (c) analysis of the technical and economic feasibility of the landfill. Utilization of the biogas produced in the Landfill of Palmas. In 2008 the production of domestic waste in Palmas - TO was 46,317 tonnes, and in 2019 the municipality produced 97,200, therefore an increase of 47.6% considered normal in relation to the population increase in the municipality and the change in population habits. After characterizing the residues through the gravimetry process, the following results were found: organic fraction with 53.70%, plastic with 25.42%, paper / cardboard with 6.00%, glass with 4.55%, fabric with 1, 95%, metals with 1.60%. Having a percentage of 53.70% of organic matter, there was a great potential for methane generation in the Landfill of Palmas - TO. Having verified this potential, the capture and measurement of biogas was carried out, whose volume was 1,170m<sup>3</sup> / h. The study showed that there is technical feasibility for the process of using biogas from the landfill in question, aiming at energy production, since in the landfill premises there is already a predisposition to capture gases. A period of 6 months was estimated for the implementation and start-up of a UTE that will initially operate with a power of 1MW which is equivalent to 678,900kW, monthly average, using a generator set capable of generating 200kWh of electric energy. In the economic analysis, perfect feasibility was found taking into account the sale of electricity to a local concessionaire, as well as the revenues associated with the reduction in emissions of greenhouse gases generated through the sale of carbon credits.

Keywords: Solid waste, Landfill of Palmas, Technical and Economic Viability, Biogas in Landfill, Renewable biomethane energy (MSW).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aterro Sanitário de Palmas .....	40
Figura 2- Pesagem dos RSU para destinação final no Aterro Sanitário de Palmas - TO.....	41
Figura 3- Disposição dos RSU na célula do Aterro Sanitário de Palmas - TO.....	42
Figura 4- Vista área do Aterro Sanitário de Palmas e do sistema de tratamento de lixiviados	43
Figura 5- Monitoramento da qualidade do lixiviado ao longo do sistema de tratamento biológico .....	43
Figura 6- Drenagem de gases no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins .....	44
Figura 7- Determinação do peso específico e composição gravimétrica de RSU no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.....	45
Figura 8- Adaptação do sistema para captação de gases no Aterro Sanitário de Palmas - TO	48
Figura 9- Medidor de vazão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas - Tocantins.....	48
Figura 10- Coleta de biogás no Aterro Sanitário de Palmas - Tocantins .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais fatores que influenciam as emissões de gases .....	26
Tabela 2- Plantas de Geração a partir do Biogás no Brasil .....	29
Tabela 3- Característica de resíduos alimentares gerados em diferentes regiões do mundo....	31
Tabela 4 - Composição gravimétrica e caracterização de resíduos sólidos urbanos do Aterro Sanitário de Palmas - TO.....	60
Tabela 5 - Principais constituintes de amostras biogás do Aterro Sanitário de Palmas – TO..	64
Tabela 6 - Custos orçamentários totais da UTE .....	67
Tabela 7 - Custos orçamentários parciais da UTE .....	70
Tabela 8 - Custos orçamentários iniciais do sistema de coleta e queima do biogás.....	71
Tabela 9 – Receitas relacionadas com a comercialização da energia elétrica do biogás .....	71
Tabela 10 – Despesas com a operação e manutenção da usina de recuperação energética .....	72
Tabela 11 - Análise Econômica do empreendimento .....	73

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Crescimento populacional de Palmas – TO .....	51
Gráfico 2 - Produção de Resíduos Domésticos na cidade de Palmas – Tocantins, Brasil .....	52
Gráfico 3 - Produção de Resíduos da Construção Civil na cidade de Palmas – Tocantins.....	54
Gráfico 4 - Produção de galhadas na cidade de Palmas – Tocantins, Brasil.....	55
Gráfico 5 - Produção de Resíduos de Saúde na cidade de Palmas – Tocantins, Brasil.....	57
Gráfico 6 - Produção de Outros Resíduos na cidade de Palmas – Tocantins, Brasil .....	58
Gráfico 7 - Perfil de vazão diária de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins .....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
ANP – Agência Nacional de Petróleo  
ASTTER – Associação Tocantinense de Empresas Transportadoras de Entulhos, Reciclagem e Afins  
CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa  
CER – Certificado de Emissões Reduzidas  
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
CIBiogás – Centro Institucional de Energias Renováveis COD – Carbono Orgânico Degradável  
CONFINS - Contribuição para Financiamento da Seguridade Social  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
COP 21 – Vigésima Primeira Conferência do Clima  
CTL – Centro de Triagem de Lixo  
EPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
ICMS – Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços  
INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária  
iNDC – Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada  
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada  
IPCC – Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas  
Kj – Quilo Joule  
KPa – Quilo Pascal  
MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo  
MMA – Ministério do Meio Ambiente  
MMGD – Mini e Micro Geração Distribuída

MW – Mega Watts

NATURATINS – Instituto Natureza do Tocantins

Nm<sup>3</sup> - Normal Metro Cúbico

OPEP- Organização dos Países Exportadores de Petróleo

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PH- Potencial Hidrogênio

PIS – Programa de Integração Social

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PROBIGÁS – Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil

RCC – Resíduos da Construção Civil

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SEISP – Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos

SEMARH – Secretaria de Estado do Meio Ambiente

TIR – Taxa Interna de Retorno

USEPA – United States Environmental Protection

USP – Universidade de São Paulo

UTE - Usina Termelétrica

VPL – Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

1.0	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
2.0	<b>JUSTIFICATIVA</b>	18
3.0	<b>OBJETIVOS</b>	20
3.1	OBJETIVO GERAL	20
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4.0	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	21
4.1	BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS	22
4.2	PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIOGÁS	23
4.3	EMISSÃO DE METANO EM ATERROS SANITÁRIOS	23
4.4	MONITORAMENTO AMBIENTAL EM ATERROS SANITÁRIOS	24
4.5	ROTA TECNOLÓGICA DO BIOGÁS: ENERGIA MAIS LIMPA	25
4.6	FATORES QUE INFLUENCIAM A EMISSÃO DE BIOGÁS	26
4.7	CENÁRIO DO BIOGÁS NO BRASIL E NO MUNDO	28
4.8	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ATRAVÉS DA BIODIGESTÃO	30
4.9	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO ESTADO DO TOCANTINS	34
4.10	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE PALMAS	36
4.11	GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA	37
4.12	ENERGIA ELÉTRICA DO BIOGÁS	37
5.0	<b>METODOLOGIA</b>	39
5.1	LOCAL DE PESQUISA	39
5.2	PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS RSU DO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS – TO	43
5.3	PESO ESPECÍFICO APARENTE	45
5.4	MEDIÇÃO DE FLUXO E COLETA DE BIOGÁS	45

5.5	COLETA E ANÁLISE DE BIOGÁS-----	47
5.6	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO NO SISTEMA EXPERIMENTAL DO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS - TO-----	48
6.0	<b>RESULTADOS DA DISCURSÃO</b> -----	50
6.1	PRODUÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE PALMAS – TO -----	50
6.2	CARACTERIZAÇÃO DE RSU E SUA INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE BIODEGRADAÇÃO E GERAÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS – TO -----	59
6.3	PERFIL DE VAZÃO E ANÁLISE CROMATOGRÁFICA DO BIOGÁS PRODUZIDO NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS – TO -----	61
6.4	ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO NO SISTEMA EXPERIMENTAL- ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS - TO -----	64
6.4.1	ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA -----	65
6.4.2	EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA DO BIOGÁS GERADO NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS –TO -----	66
6.4.3	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA-----	67
7.0	<b>CONCLUSÕES</b> -----	73
8.0	<b>REFERENCIAS</b> -----	74

## 1.0 INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento tecnológico e industrial e o crescimento econômico do mundo, aliados ao processo de urbanização e crescimento populacional, vêm modificando os modos de vida e aumentando o consumo, com a conseqüente elevação da geração de resíduos (QUERINO & PEREIRA, 2016; MILTINER, 2017).

A intensificação das atividades humanas nas últimas décadas gerou um acelerado aumento na produção de resíduos, tornando-se um grave problema para as administrações públicas. O aumento desordenado da população e o crescimento sem planejamento de grandes núcleos urbanos dificultam as ações e o manejo dos resíduos, os quais, muitas vezes são depositados em locais não preparados para recebê-los, como lixões e, pontos viciados de descarte irregular de lixos, podem provocar graves problemas socioambientais (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD, Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2010).

O setor energético brasileiro tem histórico de uso de fontes renováveis, como a hidráulica e o bagaço de cana para geração de energia elétrica e os biocombustíveis etanol e biodiesel. Porém, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 56,5 % da oferta de energia do país ainda é proveniente de fontes não renováveis (EPE, 2017).

Durante a COP-21 em 2015, em Paris, o governo brasileiro apresentou sua Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) às Nações Unidas, expressando a ambição brasileira de redução de GEE para o Acordo de Paris (MME/EPE, 2017).

Dentre as fontes alternativas disponíveis no Brasil está o biogás, proveniente da biodigestão de matéria orgânica, como resíduos e efluentes industriais, urbanos e rurais, denominados de substratos. Esse gás possui cerca de 60% de metano em sua composição e, em virtude do elevado poder calorífico, permite a sua utilização na geração de calor e de energia elétrica. Além disso, submetendo o biogás a um processo de separação é possível obter biometano e gás carbônico.

Os aterros sanitários são considerados como alternativas mais viáveis para geração de biogás (Pedott e Aguiar, 2014; Lima et al., 2017), visto que podem dispor de técnicas de

captação dos gases liberados através de dutos de captação e queima do mesmo. O biogás tem em sua composição o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o gás metano (CH<sub>4</sub>), sendo esse último o principal precursor, enquanto combustível, para utilização como fonte de energia (Cancelier *et al.*, 2015; Pereira *et al.*, 2015; Necker e Câmara, 2017).

Segundo a legislação vigente, o biometano pode ser considerado similar ao gás natural, e a ele misturado se contiver mais de 90 % de metano, permitindo o seu uso para os mesmos fins que esse combustível fóssil (ANP, 2015a; ANP, 2017).

Em todo o mundo, a urgência em se reduzir a concentração atmosférica de gases de efeito estufa provocou a adoção de quadros regulamentares favoráveis para incentivar o setor público e privado a investirem em energias renováveis.

Em 2018, o Brasil produziu, em média, 79 milhões de toneladas de lixo, uma variação de pouco menos de 1% em relação ao ano anterior. Comparado com países da América Latina, é o campeão de geração de lixo. E, conforme estimativas do relatório, a tendência de crescimento na produção de resíduos deve ser mantida nos próximos anos - o País alcançará uma geração anual de 100 milhões de toneladas por volta de 2030. (ABRELPE, 2019).

O biogás, produzido a partir da digestão anaeróbia da matéria orgânica presente em efluentes e resíduos domésticos, industriais e agropecuários, representa uma fonte alternativa e renovável de energia cada vez mais utilizada em todo o mundo. No Brasil, a elevada população e sua concentração em grandes centros urbanos e a expressiva produção agropecuária e agroindustrial indicam um potencial significativo de produção desse tipo de biocombustível (ANEEL, 2009).

Os aterros para resíduos sólidos municipais podem ser uma fonte de energia renovável. Bactérias anaeróbias podem decompor resíduos orgânicos com a produção de biogás, sendo este rico em metano. O metano é o mesmo gás rico em energia encontrado no gás natural, que é usado para aquecer, cozinhar e produzir eletricidade.

Criado em novembro de 2001, o Aterro Sanitário de Palmas é uma referência nacional. O projeto é um dos poucos da região Norte que atende as especificações ambientais exigidas pela legislação vigente, tendo sido construído com concepções do que há de mais moderno a respeito de novas tecnologias aplicadas a esse tipo de instalação no mundo (MARQUES & AZEVEDO, 2019).

O Aterro Sanitário de Palmas recebe em média 270 toneladas de resíduos sólidos urbanos diariamente em 2019. A disposição do resíduo doméstico é feita em células com

dimensões de 150,00 m X 200,00 m e profundidade 2,5 m a 4,00 m. Cada célula é revestida por uma manta geomembrana de Polietileno de Alta Densidade – PEAD de 2,00 mm que possui uma durabilidade de 100 anos, (segundo o fabricante), antes de começar a se decompor, evitando assim a contaminação do solo e do lençol freático pelo chorume, líquido preto, viscoso e malcheiroso gerado pela decomposição dos resíduos orgânicos, considerado 100 vezes mais contagioso que o esgoto doméstico (MARQUES & AZEVEDO, abut ABREU, M. F).

O metano representa cerca de 45 a 60% do biogás proveniente de aterros sanitários, enquanto o dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros gases compreendem os 40 a 55% remanescentes. A produção de metano em quantidades significativas inicia 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 (REGATTIERE, 2003). O metano produzido migra do seu local de origem no aterro e através de regiões de baixa pressão no solo, eventualmente atingindo a atmosfera.

Pesquisa desenvolvida por Coelho e Oliveira (2012) estima que a produção de biogás no aterro de Palmas vem aumentando durante os anos. Segundo os pesquisadores, Coelho e Oliveira (2012), as vazões teóricas de biogás nos anos de 2008, 2009 e 2019 foram de 40, 42 e 43 m<sup>3</sup>/h, respectivamente. O biogás deve passar por um processo de purificação com o objetivo de melhorar a sua qualidade calorífica, eliminando as impurezas presentes na mistura, antes de seu uso como biocombustível.

Diante desse contexto, o objetivo geral desse estudo é a análise de viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do biogás gerado no Aterro Sanitário de Palmas – TO, visando a geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos urbanos depositados no aterro em epígrafe.

Especificamente, pretende-se diagnosticar o potencial de resíduos sólidos produzidos na região em estudo para a geração de biogás; analisar a partir desse potencial a relação técnica e econômica da implantação de uma usina termelétrica para geração de energia no município de Palmas - TO, nas dependências do aterro sanitário e propor recomendações para subsidiar políticas públicas e/ou investimentos privados para o setor, buscando viabilizar o mercado de energia proveniente de resíduos sólidos no estado do Tocantins a partir do uso de biogás.

## 2.0 JUSTIFICATIVA

Aterro sanitário é um empreendimento construído com técnicas de engenharia para disposição final adequada de Resíduos Sólidos Urbanos no solo através do seu confinamento em camadas cobertas preferencialmente com argila, atendendo as normas ambientais, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e a segurança, minimizando os impactos ao meio ambiente.

Ao ser disposto no solo, devidamente impermeabilizado com manta geomembrana PEAD de 2,00 mm, os resíduos passam por um processo de degradação em que é liberado o gás metano e outros e, se este processo não for devidamente controlado por meio de sistema de coleta e aproveitamento ou queima em *flare*, o mesmo será liberado para atmosfera. Além disso, é um gás altamente inflamável, podendo apresentar riscos de incêndios e explosões. (FIGUEIREDO, 2011).

A crescente urbanização assistida no Brasil nos últimos anos tem contribuído para o agravamento dos conflitos socioambientais referentes ao uso e ocupação dos bens naturais de forma inadequada (MARQUES, 2016). A produção exacerbada de RSU, resultantes do processo de consumo desenfreado, assim como, no estilo de criação de produtos com baixo ciclo de vida, tem contribuído negativamente para a criação de áreas de descarte inadequado dos RSU, depreciando ambientalmente a área de influência direta desse descarte, e desvalorizando financeiramente o local de descarte inadequado (LOPES, 2007).

No Brasil, com a crise do petróleo na década de 1970, foram feitas experiências pioneiras na utilização do biogás, chegando a canalizar o gás até as residências e indústrias. Devido à crise energética no país, estudiosos retomaram as pesquisas para produzir energia elétrica através de turbinas especiais que funcionam por meio da queima do biogás, transformando essa energia em eletricidade.

O modelo de urbanização em curso no Brasil e o modelo de sociedade baseada no consumismo, resultou em sérios problemas no que se refere a produção e tratamento dos resíduos urbanos, que foram durante os últimos anos descartados na natureza, provocando impactos socioambientais irremediáveis (VIEIRA *et al.*, 2015).

As degradações físicas e biológicas desses resíduos, além de proporcionarem a proliferação de odores, também apresentam como subproduto, emissões de gases atmosféricos, em especial o CH<sub>4</sub>, correspondendo valores equivalentes a 60% de concentração nessa mistura gasosa (AGEITEC, 2018).

O aproveitamento ambiental do biogás, produzido por aterros sanitários, além de contribuir para a redução das emissões atmosféricas, diminuição do aquecimento global, uma vez que o CH<sub>4</sub> presente na mistura gasosa é cerca de 21 vezes mais poluente que o CO<sub>2</sub> (IPCC, 2007), ainda contribui para a diversificação da matriz energética brasileira, para o franco desenvolvimento de um modelo energético sustentável, e possibilitando que um combustível antes descartado, sem nenhum aproveitamento energético, seja aproveitado para a geração de potencial elétrico (MACIEL, 2009).

Segundo Johannsen (1999), são gerados, em média, 200 Nm<sup>3</sup> de biogás para cada tonelada de resíduos sólidos dispostas em aterro sanitário. Para que torne viável explorar a recuperação energética do biogás, o aterro deve receber, no mínimo, 200 toneladas diariamente e ter uma capacidade mínima de 500 mil toneladas ao longo de sua vida útil.

Diante do exposto acima, justifica-se tal análise sabendo-se que o Aterro Sanitário de Palmas recebe aproximadamente 270 toneladas de RSU diariamente e durante sua vida útil, no ano de 2041, aproximadamente, pode suportar aproximadamente 4,2 milhões de toneladas. Portanto, esse empreendimento atende as condições mínimas de viabilidade técnica e econômica de captação e transformação de biogás em energia elétrica.

### **3.0 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do biogás produzido no Aterro Sanitário de Palmas – TO como fonte de energia renovável.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar a caracterização física e química dos RSU e a sua influência no processo de biodegradação e geração de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – TO;
- Medir o volume de biogás gerado na área delimitada do Aterro Sanitário de Palmas (TO);
- Avaliar a viabilidade técnica e econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no sistema experimental.

#### **4.0 REVISÃO DE LITERATURA**

Em um contexto de crise energética e ambiental, existe um forte interesse em ampliar a oferta de energia proveniente de fontes alternativas e/ou renováveis. O conceito de energia nesse caso não está limitado à energia elétrica, pois abrange outras formas como os combustíveis e a energia térmica. Embora a energia solar e a eólica estejam em evidência como fontes renováveis, uma fonte que atualmente se destaca no Brasil é a biomassa.

Além disso, é abordada a técnica utilizada para o aproveitamento ambiental energético do biogás, sua transformação em energia elétrica e os principais fatores que influenciam diretamente nesse processo. Levando-se em consideração sua captação, classificação, caracterização, e transformação em energia elétrica e o seu monitoramento.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2015), lenha, álcool e bagaço de cana representam juntos 22,2% do consumo final de energia do país. São valores expressivos que evidenciam a importância da biomassa na matriz energética nacional.

#### 4.1 BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS

O biogás gerado em Aterros Sanitários é proveniente da degradação biológica da matéria orgânica, confinada no interior do maciço de resíduos (PECORA, FIGUEIREDO e VELAZQUES, 2008).

A composição do biogás é relativa, a depender da qualidade e quantidade dos resíduos ali dispostos, como por exemplo, a concentração de matéria orgânica e concentração de resíduos não degradáveis, como plástico e materiais ferrosos, dentre outros.

Sua produção é possível a partir de uma grande variedade de resíduos orgânicos, como lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, lodo de esgoto doméstico, dentre outros.

A concentração química do biogás é basicamente composta por gases como o metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e gás amônia ( $\text{NH}_3$ ), 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).

No aterro sanitário, a decomposição da matéria orgânica ocorre por meio de dois processos: inicialmente, durante a deposição de resíduos no solo, tem início a decomposição aeróbia e após a cobertura dos resíduos, com a redução de oxigênio presente, inicia-se a fase de decomposição anaeróbia (FIGUEIREDO, 2011).

A captação desses gases é realizada pelo sistema de captação de gases instalado na fase inicial de operação do Aterro, onde, por meio das características físico-químicas de cada componente, são encaminhados para o seu caminho preferencial de escoamento e posterior tratamento.

## 4.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIOGÁS

O biogás é um gás incolor, odorífero e tóxico, seu principal componente o metano, é um gás incolor, inodoro e atóxico à temperatura ambiente. A fórmula do metano é  $\text{CH}_4$ , um hidrocarboneto simples com um átomo de carbono combinado com quatro átomos de hidrogênio. A relação de peso do metano para o ar é de 0,54, o que é cerca de metade mais leve que o ar. A solubilidade do metano é muito pequena: a 20 °C e 0,1 kPa, 100 unidades de água só podem dissolver 3 volumes unitários de metano (CENBIO, 2006). O metano é um composto orgânico simples que é um combustível gasoso de boa qualidade. Queima com uma chama azul e a temperatura máxima é de aproximadamente de 1400 °C. O valor calorífico do metano puro por metro cúbico é de 36,8 kJ.

O valor calorífico por metro cúbico de biogás é de cerca de 23,4 quilo joules, o que equivale a 0,55 kg de diesel ou 0,8 kg de carvão. A partir da análise da eficiência térmica, a quantidade de calor que pode ser utilizada por metro cúbico de biogás é equivalente à quantidade de calor que pode ser usada para queimar 3,03 kg de carvão (COSTA, 2012).

## 4.3 EMISSÃO DE METANO EM ATERROS SANITÁRIOS

Como o  $\text{CH}_4$  possui maior potencial que o  $\text{CO}_2$  para aumento do efeito estufa, pois, o  $\text{CH}_4$  é mais eficiente na captura de radiação solar, a queima do biogás na produção de energia gera emissões evitadas deste gás. Estas emissões evitadas podem ser credenciadas para a geração de créditos de carbono, que serão certificados e comercializados no mercado (cenário entre países). (MIGUEZ, 2000),

De acordo com Meneguín (2012), um crédito de carbono equivale a uma tonelada de  $\text{CO}_2$  que deixou de ser emitido para a atmosfera e aos demais gases reduzidos também são emitidos os créditos, através de uma equivalência entre os respectivos gases e o  $\text{CO}_2$ . Os créditos de carbono representam então, uma segunda fonte de receita para os aterros que geram energia por meio do biogás, complementando assim a receita oriunda da geração e comercialização da energia elétrica.

O aterro sanitário pode ser conceituado como um reator bioquímico, sendo suas principais entradas os resíduos sólidos e água e suas saídas os biogases e os líquidos lixiviados. O biogás produzido em aterros sanitários é composto de 45 a 60% de metano, a porcentagem restante é composta de CO<sub>2</sub>, vapor de água e alguns gases traço (MENEGUIN, 2012).

Reinhart e Cooper (1992) afirmaram que a produção de metano em aterros sanitários de resíduos sólidos foi de aproximadamente 10,5 milhões de toneladas/ano. Segundo Bahr et al. (2006) a emissão mundial de metano em aterros sanitários de resíduos sólidos é estimada em 60 milhões de toneladas por ano, sendo 15% deste proveniente de aterros chineses.

#### 4.4 MONITORAMENTO AMBIENTAL EM ATERROS SANITÁRIOS

O biogás é o produto da decomposição por microrganismos em condições anaeróbias de matéria orgânica, proveniente de diferentes fontes, como aterros sanitários, biodigestores e resíduos animais, podendo ser usado como combustível, devido à alta porcentagem de metano em sua composição (KHALAF *et al.*, 2011).

Geralmente, a geração de biogás inicia-se, após a disposição dos resíduos sólidos, encontrando-se registros de metano, ainda nos primeiros três meses, após a disposição, podendo continuar por um período de 20, 30 ou até mais anos, depois do encerramento do aterro (BRASIL, 2012).

Os métodos biológicos para a produção de combustíveis, a partir do lixo, baseiam-se no rendimento da atividade microbiana, principalmente de bactérias anaeróbias que, através do seu metabolismo, transformam a matéria orgânica em produtos combustíveis, como o gás metano e o hidrogênio (LIMA, 1995).

Os fatores que podem influenciar na produção de biogás são: composição dos resíduos dispostos, umidade, tamanho das partículas, temperatura, pH, idade dos resíduos, projeto do aterro e sua operação (BRASIL, 2012).

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente. Essas substâncias entram com o combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. Dessa forma, o

poder calorífico do biogás se torna menor, à medida que se eleva a concentração das impurezas (ALVES, 2000).

Em função da participação percentual do metano na composição do biogás, o poder calorífico desse pode variar de 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico. Esse poder calorífico pode chegar a 12.000 kcal/m<sup>3</sup>, se eliminado todo o gás carbônico da mistura (DEGANUTTI; PALHACI, ROSSI, 2002).

O objetivo do aproveitamento energético do biogás, produzido pela degradação dos resíduos, é convertê-lo em uma forma de energia útil (BRASIL, 2012). O biogás tem sido utilizado por meio da combustão em fogões, aquecedores, incubadora e pequenos motores, etc., normalmente, equipamentos de uso estacionário.

Em motores estacionários, pode-se utilizar o biogás diretamente produzido nos biodigestores, sem purificação, para o acionamento de bombas hidráulicas e geradores de energia, sendo assim, uma grande vantagem ao seu uso no meio rural (SOUZA; SILVA; BASTOS, 2010).

#### 4.5 ROTA TECNOLÓGICA DO BIOGÁS: ENERGIA MAIS LIMPA

A matriz energética brasileira já possui forte participação das fontes renováveis de energia e contará com uma predominância ainda maior dessas fontes dentro de um prazo de dez anos (TOLMASQUIM, 2012). O Plano Decenal de Expansão de Energia 2020 (BRASIL, 2011), aponta para uma participação das fontes renováveis de 46,3% em 2020, ante os 44,8% apresentados em 2010.

Desde agosto de 2012, a Lei Federal 12.305/2010 obriga elaboração dos planos estaduais e municipais de resíduos sólidos, visando organizar a gestão integrada de resíduos sólidos no Brasil. Tais planos favorecem a implantação de tecnologias que utilizem os produtos inseridos na cadeia de destinação dos rejeitos.

O Brasil é um dos líderes em produção de energias a partir de biomassa, como a produção do biogás. O investimento das políticas públicas seria um passo importante para garantir a manutenção dos sistemas de fabricação do biogás, além de manter a liderança do país no cenário internacional, como a criação do Proálcool nos anos 1980, e outros programas de

incentivo ao uso de combustíveis alternativos, como óleo vegetal, gasogênio, gás natural, biogás, entre outros (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

O monitoramento ambiental em Aterros Sanitários é de suma importância para o gerenciamento ambiental dos RSU locais, pois, além de detectar possíveis falhas na fase de projeto e implementação do Aterro, também informa ao gestor, possíveis falhas em sua operação (LOPES, 2007), estando em concordância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

A qualidade ambiental da área de instalação e interferência direta do maciço de resíduos deve obedecer às legislações ambientais vigentes inerentes à temática. A qualidade das águas subterrâneas e superficiais deverá atender o padrão de qualidade exigida pela Portaria Ministério da Saúde nº 2.914/2011 conforme Artigo 7º. Esta Portaria se aplica à água destinada ao consumo humano proveniente de sistema e solução alternativa de abastecimento de água. Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

De acordo com MOURA, 2013, em seu artigo sobre “O aproveitamento energético nos aterros sanitários e o mercado de carbonos” conclui: “O aterro sanitário revela-se como uma solução eficiente de saneamento porquanto evita as externalidades negativas do descarte irresponsável do lixo”. Além disso, o biogás extraído dos aterros sanitários pode ser aproveitado para geração de eletricidade, ao mesmo tempo em que reduz a emissão de gases intensificadores do efeito estufa.

O biogás se mostra competitivo quando comparado com os combustíveis fósseis utilizados na indústria e no setor de transporte. Apesar dos mecanismos de incentivo existentes ao aproveitamento energético do biogás, como o MDL e os incentivos às fontes alternativas renováveis de energia no Brasil, há diversas barreiras institucionais, econômicas e tecnológicas que dificultam o efetivo aproveitamento desta fonte no Brasil (MONTEIRO, 2001).

#### 4.6 FATORES QUE INFLUENCIAM AS EMISSÕES DE BIOGÁS

Segundo McBain (2005), é evidente na literatura que a migração do biogás e o seu fluxo variam espacialmente e temporalmente, provavelmente pela variação de fatores tais como condições ambientais, geotécnicas e atmosféricas no aterro. Além desses fatores, a geometria,

operação e ambiente externo ao aterro também interferem neste processo (MACIEL, 2003). A Tabela 1 apresenta os principais fatores que influenciam as emissões de gases em aterros, segundo sua natureza.

**Tabela 1.** Principais fatores que influenciam as emissões de gases.

Fatores do ambiente interno da massa de resíduos	Fatores da camada de cobertura	Fatores climáticos ou sazonais
Decomposição dos resíduos	Aspectos geotécnicos	Precipitação
Drenagem interna de gases	Aspectos microbiológicos	Pressão atmosférica
Recalques diferenciais	Composição da cobertura	Velocidade dos ventos

Fonte: Maciel (2003).

A decomposição dos resíduos e a drenagem interna dos gases são os principais fatores relativos ao ambiente interno da massa de resíduos. Esses fatores influenciam diretamente os níveis de pressão e concentração dos gases que atingem a camada de cobertura. Esses parâmetros são fundamentais para descrever o fluxo dos gases por advecção e difusão, no solo da camada de cobertura (Maciel, 2003).

Os recalques diferenciais que ocorrem em aterros, se não monitorados, podem gerar grandes fissuras. Estas expostas à atmosfera por um elevado tempo facilitam a emissão de gases, diminuindo as barreiras que devem ser percorridas até chegar à superfície do aterro. Um dos principais aspectos microbiológicos presente na camada de cobertura, capaz de influenciar a emissão de gases é a oxidação do metano na camada de cobertura que podem ocorrer em grandes quantidades ou apenas em resíduo-traço (BRASIL, 2016).

O metano (CH<sub>4</sub>) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são os principais componentes do biogás de Aterro Sanitário, e sua pureza/concentração/qualidade depende do estágio de decomposição da matéria orgânica ali confinada, e do tipo de resíduos ali dispostos (IBAM, 2014).

O biogás se mostra competitivo quando comparado com os combustíveis fósseis utilizados na indústria e no setor de transporte. Apesar dos mecanismos de incentivo existentes

ao aproveitamento energético do biogás, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL e os incentivos às fontes alternativas renováveis de energia no Brasil, há diversas barreiras institucionais, econômicas e tecnológicas que dificultam o efetivo aproveitamento desta fonte no Brasil (MONTEIRO, 2001).

A geração e o uso eficiente da energia se apresentam como um dos grandes desafios da sociedade deste século. A atual matriz energética mundial é baseada principalmente em fontes não renováveis, tendo como principal matéria-prima o petróleo, principalmente após a revolução industrial.

A emissão de gases de efeito estufa ocasionada pelo uso das fontes de energia não renováveis pode provocar mudanças climáticas globais causando grande impacto ambiental. Assim, a busca de fontes de energia alternativas, em especial as renováveis, é de fundamental importância para a preservação do planeta (BRIDGWATER, 2001).

O dever da União restringe-se a formatação de leis, normas e diretrizes orientadoras acerca do gerenciamento ambiental adequado dos RSU, cabendo assim, aos estados e municípios, a fiscalização e cumprimento das legislações federais em relação ao resguardo da qualidade ambiental as gerações futuras (BRASIL, 1988).

#### 4.7 CENÁRIO DO BIOGÁS NO BRASIL E NO MUNDO

No Brasil, a cana-de-açúcar destaca-se como cultura energética, mas seu cultivo não é adequado para todas as regiões do planeta. Nos EUA, por exemplo, um país com diferentes condições de clima e solo, a cultura que se destaca como biomassa para uso com fins energéticos é o milho. (MENEZES *et al.*, 2011).

Em regiões semiáridas como a região nordeste do Brasil, as condições climáticas limitam o cultivo das fontes de biomassa tradicionalmente utilizadas, como soja e cana-de-açúcar. Para ampliar a produção de energia proveniente da biomassa nessas condições é necessário o uso de culturas mais adaptadas à região. (MENEZES *et al.*, 2011).

Na região semiárida de Pernambuco, que ocupa mais de 85% do território do estado, a palma forrageira destaca-se em termos de produtividade, estabilidade na produção e resistência

à irregularidade das chuvas nos anos secos, podendo ser uma opção de cultivo de biomassa para fins energéticos (MENEZES *et al.*, 2011).

A tecnologia para geração de energia através do biogás no Brasil, ainda é incipiente e isolada, e considerando os anos de 1970 até 2010 este produto não recebeu valorização e importância devida (Freitas *et al.*, 2019; Mathias, 2015). Portanto, esta tecnologia vem se desenvolvendo gradualmente (Santos, *et al.*, 2018).

Atualmente, existem plantas que utilizam o biogás em variados pontos no país. A Tabela 2 apresenta as cidades que possuem plantas de biogás e sua capacidade instalada para geração de energia.

**Tabela 2.** Plantas de geração de energia a partir do biogás no Brasil.

<b>PLANTA DE GERAÇÃO DE ENERGIA</b>	<b>CIDADE / ESTADO</b>	<b>CAPACIDADE INSTALADA (KW/H)</b>
Salvador	Salvador / BA	19,73
São João biogás	São Paulo/SP	21,56
Energia Biogás	Barueri/SP	30
ASJA – BH	Belo Horizonte/MG	30
Arrudas	Belo Horizonte/MG	2,278
Ambient	Ribeirão Preto/SP	2,400
Biotérmica Recreio	Minas do Leão /RS	1,500
Uberlândia	Uberlândia/MG	8,556
ASJA Sabará	Sabará/MG	2,852
CTR Juiz de Fora	Juiz de Fora/MG	4,278
Itajaí Biogás	Itajaí/SC	1,065
Termoverde Caieiras	Caieiras/SP	29,547
Guarapará	Guarapará/SP	5,704
Bandeirantes	São Paulo/SP	4,624
Curitiba Energia	Fazenda Rio Grand/PR	4,278
Tecipar	Santana de Paranaíba/SP	4,278
Ronaldo de Freitas Silva	Uberlândia/MG	120
Unidade Industrial Alves	Matelândia/PR	160

Fazenda Nossa Senhora de Fátima	Perdizes - MG	175.2
Unidade Industrial de Vegetais	Itaipulândia/PR	40
ETE Ouro Verde	Foz do Iguaçu/PR	20
Star Milk	Céu Azul/PR	110
Fazenda da Luz	Abelardo Luz/PR	810
Granja Makena	Patrocínio/MG	80
Ajuricaba	Marechal Candido Rondon/PR	80
Fazenda Nossa Senhora do Carmo	Ituiutaba/MG	80
Granja São Roque	Videira/SC	424
Cogeração Biospringer	Valinhos/SP	848
Adelar Piaia	Três Passos/RS	100
Cetrel Bioenergia JB	Cachoeirinha/PE	874
<b>T O T A L</b>		<b>121,453,2</b>

Fonte: Freitas (2019).

#### 4.8 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS ATRAVÉS DA BIODIGESTÃO

Além das culturas energéticas, uma alternativa promissora para ampliar a oferta de energia é o aproveitamento de resíduos como fonte de biomassa. Trata-se de uma realidade nas usinas de processamento de cana-de-açúcar, em que o bagaço de cana deixou de ser considerado resíduo e passou a ser utilizado como fonte de biomassa para produção de energia térmica e/ou elétrica (PIACENTE e PIACENTE, 2012).

Bagaço de cana, vinhaça, esterco bovino, lenha da caatinga e resíduos sólidos urbanos (RSU) estão entre as principais fontes de biomassa geradas na região Nordeste, segundo levantamento realizado por Lima Júnior et al. (2014). Depois do bagaço, o maior potencial energético foi atribuído à lenha, seguido dos RSU e do coco-da-bahia. Esses potenciais foram calculados considerando-se processos térmicos de conversão, em que a biomassa é convertida à energia elétrica através da combustão direta.

Segundo Salomon e Lora (2009), as fontes de resíduos orgânicos com maior potencial de geração de energia elétrica no Brasil através da biodigestão são a vinhaça e os RSU, com potencial total estimado em 880 e 285 MW por ano, respectivamente. As demais fontes avaliadas (dejetos bovinos, suínos e de estação de tratamento de esgotos) somariam menos de 50 MW por ano. No total, o potencial de mais de 1200 MW por ano corresponderia a 1,3% do potencial de geração de energia elétrica instalada no país.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2014 foram gerados quase 80 milhões de toneladas de RSU no Brasil, o que significa que cada brasileiro gerou em média quase 390 kg de resíduo ao longo do ano, ou seja, pouco mais de 1 kg por dia. Cerca de 90% dessa quantidade são coletadas de forma indiferenciada e destinadas para aterros (sanitário ou controlados) ou para lixões.

De acordo com relatório do IPEA (2012), estima-se que cerca de 50% dos RSU sejam compostos por matéria orgânica. Isso representa um montante de 40 milhões de toneladas de biomassa, dos quais menos de 3% são destinados à compostagem, existindo também algumas experiências de aproveitamento do biogás gerado durante a degradação desse resíduo em aterros sanitários.

Atualmente, no Brasil, as principais utilizações do biogás captado nos Aterros Sanitários é a sua queima direta em *flares* apenas convertendo o metano (CH<sub>4</sub>), presente no biogás em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), composto esse, vinte uma vez menos poluentes 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).

Se todo o resíduo fosse aproveitado para produção de energia por biodigestão anaeróbia seguida da queima do biogás, seria possível produzir 1100 MW por ano no Brasil, considerando uma produção média de 120 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de resíduo, poder calorífico do biogás de 4900 kcal.m<sup>-3</sup> e rendimento da transformação da energia térmica para energia elétrica de 35%.

A quantidade de energia dispendida para evaporar a água do resíduo é maior do que a quantidade de energia liberada em sua queima, tornando o processo energeticamente desfavorável. Na Tabela 3 estão reunidas algumas das principais características da fração

orgânica dos RSU ou de resíduos alimentares proveniente de outras fontes, como cantinas, restaurantes e feiras.

**Tabela 3.** Característica de resíduos alimentares gerados em diferentes regiões do mundo.

Parâmetros	China	China	Coreia	EUA	EUA	EUA	Europa	Alemanha
pH	5,2	-	4	4,1	-	4,2	-	-
DQO <sub>gl</sub> <sup>-1</sup>	-	-	24	-	-	368,4	-	350
ST <sub>gl</sub> <sup>-1</sup>	185	166,3	208	152	280	291	170-370	255
SV <sub>gl</sub> <sup>-1</sup>	170	149	189	138	241	260	140-340	255
C% ms	46,5	48,2	-	-	-	-	42-52	-
N	2,2 <sup>a</sup>	2,8 <sup>a</sup>	-	11,4	-	15,4 <sup>a</sup>	22,2-3,1 <sup>a</sup>	7,8 <sup>a</sup>
C/N	21,1	7,4	-	-	-	-	15,5-20,5	-

Fonte: Santos (2018).

DQO= Demanda química de oxigênio;

ST = sólidos totais;

SV = sólidos voláteis;

C = Carbono;

N= Nitrogênio;

K = Potássio;

pH= Potencial Hidrogênico

A participação de energias renováveis na matriz energética brasileira mantém-se entre as mais elevadas do mundo, mesmo com uma pequena redução entre 2010 e 2011, devido a

menor oferta do etanol. Mesmo assim a participação de renováveis foi mantida em 44,1% bem acima da média mundial que é de apenas 13,3% (FREITAS; MAKIYA, 2012).

Um estudo apresentado por Freitas e Makiya 2012, no XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção estima que, em um cenário otimista, o estado de São Paulo tem um potencial energético de fornecer energia a 1.122,105 famílias compostas por quatro pessoas, por ano, o que geraria um fornecimento elétrico para uma média de 4.488.420 pessoas, porém, boa parte de todo esse metano é perdido, e pior, lançado de forma imprudente na atmosfera, sem ao menos realizar sua queima.

O tema ainda é novo e pouco explorado no país, contudo, alguns Estados como São Paulo, Pernambuco e Santa Catarina têm instaurado técnicas de recuperação energética a partir do biogás de aterros sanitários. Em São Paulo, a empresa Biogás Energia Ambiental, capta o metano gerado no aterro da CTL, recupera a energia e vende para empresas que buscam compensação ambiental com os créditos de carbono (FREITAS, 2012).

Ainda em São Paulo, na cidade de Caieiras, foi inaugurada no mês de setembro de 2016 a Termoverde Caieiras que, conforme Boehm (2016), "Considerando possíveis perdas, a média para a geração de energia deve chegar a 26 MW por hora, o que é o mesmo quantitativo consumido por uma cidade de 300 mil habitantes". A cidade tem uma população de 97.016 habitantes, de acordo com dados do IBGE, 2016.

No estado de Pernambuco, segundo Freitas (2016), o Shopping Camará manteve durante a fase de construção 30% de sua energia consumida advinda de biogás. Em 2017 quando o shopping foi inaugurado, a energia do biogás passou a atender um total de 10% das lojas, o que equivale a 12 residências com consumo médio de 159 kWh/mês".

Em Santa Catarina a Usina de Itajaí tem capacidade de fornecer energia para 3.500 residências (G1, 2014), ainda na região Sul do país, o laboratório de biogás do Paraná tornou-se referência no assunto na América Latina (CIBiogás, 2016), além dos demais já supracitados, ou seja, o país tem grande potencial em energia limpa e a técnica é promissora, podendo vir a crescer em implementação.

O Aterro Sanitário de Brusque em Santa Catarina após estudo concluído por Mariane Wolff Pereira e Armando Borges de Castilhos Jr e publicado pela Revista Eletrônica do PRODEMA, com o tema, "Simulação da geração de biogás: estudo de caso Aterro Sanitário de

Brusque / SC, onde foi analisado três cenários de cálculos no software landGEM, observou-se que a geração máxima obtida por esse modelo é 3, 79.107m<sup>3</sup> e ocorrerá no ano de 2032.

Entretanto, um estudo conduzido pela Faculdade de Tecnologia de Botucatu, demonstrou que há a viabilidade no processo de conversão energética do biogás, porém o custo está acima do lucro esperado, ou seja, o empresário que investisse em tal tecnologia teria um prejuízo de R\$ 1.592,14 por ano (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2011).

Em um cenário internacional, a conversão energética do biogás tem sido implantada em países desenvolvidos, como por exemplo, na Noruega, que é a primeira colocada no ranking do IDH do ano passado e em 2014 ficou na colocação 24<sup>a</sup> no ranking de maiores economias do mundo. Neste país até o ano de 2013, importava - se lixo de outros locais para alimentar seus biodigestores anaeróbios (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2011).

Segundo Bonfiglioli em entrevista ao Interfac EHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade - Vol. 12 – Junho de 2017 jornal Estadão (2010), parte do lixo da cidade de Barcelona, é incinerado e compostado e o restante é situado em aterros controlados. Apesar de eficiente, a técnica de recuperação energética é cara. Nesse empreendimento em Barcelona, foi gasto em torno de 156 milhões e ainda contou-se com 92% de financiamento público, ou seja, a empresa não consegue se sustentar com a venda da energia.

Apesar de limpa, eficiente e ter grande potencial, a tecnologia ainda é muito cara, portanto, pouco viável economicamente.

Na Alemanha, os biodigestores encontram-se em operação para fornecer energias às fazendas. No estado de Saxônia-Anhalt foi investido em torno de 31,5 milhões de euros em uma usina para a geração de energia do Parque Nordmethan Produktion Könnern Süd GmbH, conforme Fachverband Biogás (2014), apud SECCHI (2015). A refinaria do parque tem capacidade de fornecer energia para pelo menos 10 mil famílias.

#### 4.9 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO ESTADO DO TOCANTINS

Segundo dados disponibilizados pelo Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Tocantins (SEMARH, 2016 ), dos 139 (cento e trinta e nove) municípios visitados, 129 (cento e vinte e nove), ou seja 92,8%, destinam seus resíduos em vazadouros a céu aberto, 7 (sete),

que corresponde a 5,03% destinam em aterros controlados e apenas 3 (três), ou seja, 2,16% destinam em aterros sanitários.

O maior problema está relacionado à gestão ineficiente dos resíduos sólidos urbanos, desde o acondicionamento, a coleta, transporte e destinação final.

As normas inerentes a proteção ao meio ambiente para o estado do Tocantins, são regulamentadas por meio da Lei Estadual nº 071 de 31 de julho de 1989 (TOCANTINS, 1989). A referida lei descreve normas e orientações inerentes a Constituição de 1988 (BRASIL, 1988).

A Lei Estadual nº 261 de 20 de fevereiro de 1991 (TOCANTINS, 1991), instituída por meio do Decreto nº 10.459/1994, promulga a Política Ambiental do Estado do Tocantins que, em seu Art. 28, destaca o gerenciamento ambiental dos resíduos sólidos produzidos no Estado, dando as diretrizes para uma gestão assertiva, garantindo as gerações futuras uma boa qualidade ambiental. Além disso, a referida lei também orienta como deve ser realizado o gerenciamento de resíduos especiais no estado, transmitindo a obrigatoriedade do seguimento das normas técnicas inerentes à temática pelos gestores municipais (TOCANTINS, 1994).

Houve a constatação de que os municípios tocantinenses ainda não dispõem de mão de obra especializada no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, a prova disso é a má gestão dos diversos aterros, ditos como sanitários, no interior do estado, e que são transformados em verdadeiros lixões, os quais possuem a disposição final dos resíduos de forma diária, sem nenhuma medida de controle ambiental e resguardamento da qualidade ambiental as gerações futuras (NATURATINS, 2014).

Segundo o NATURATINS, o Estado do Tocantins é composto em sua maioria por municípios de pequeno porte que, necessitam de mais atenção do estado para a sua adequação as novas diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos e do próprio Plano Estadual de Resíduos Sólidos.

De forma geral, os municípios de pequeno porte não possuem estruturas técnicas e administrativas capazes de atender a destinação final e ambientalmente adequada dos resíduos sólidos urbanos como, por exemplo, a coleta total dos resíduos gerados nas áreas urbanas do município, sistemas de triagem e tratamento dos resíduos coletados, e ações eficazes de limpeza pública (MARQUES, LOPES, *et al.*, 2016).

Por não possuírem estruturas essenciais para o gerenciamento ambiental adequado dos resíduos sólidos urbanos, esses municípios ainda continuarão por um bom tempo a disporem seus resíduos em áreas inapropriadas, degradando assim, a qualidade ambiental da área de influência direta desse descarte inapropriado (MARQUES e LOPES, 2015).

#### 4.10 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE PALMAS - TO

O Estado do Tocantins foi criado pela constituição de 1988, desmembrado de Goiás e, em 20 de maio do ano seguinte, foi lançada a pedra fundamental da futura capital, Palmas (MARQUES, 2009).

Com a construção da Usina Hidrelétrica Luiz Eduardo Magalhães, e o fechamento das comportas, formou-se o Lago de Palmas, aumentando o nível do lençol freático e comprometendo a distância regulamentar entre o lixo e o lençol freático, preconizada pela Resolução CONAMA n° 237/1997 para a construção de aterro sanitário (MARQUES & AZEVEDO, 2019a).

Como compensação ambiental, a INVESTICO – empresa responsável pela construção da Usina, construiu o Aterro Sanitário provisório de Palmas, localizado numa área cedida pelo INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, denominada PA - São João, a 25 km do centro da capital, com uma área total de 95,7784 hectares (MARQUES & AZEVEDO, 2019 b).

Em novembro de 2001, o primeiro caminhão coletor compactador fez a primeira descarga de resíduos sólidos no atual Aterro Sanitário de Palmas. A partir desse momento a cidade de Palmas – TO passa a ter um aterro sanitário, onde os resíduos sólidos urbanos coletados eram dispostos em local ambientalmente correto (MARQUES & AZEVEDO, 2019c).

Atualmente Palmas com seus 299.127 habitantes (IBGE, 2019) gera 270 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia e conta com uma equipe multidisciplinar comprometida o suficiente para manter a cidade em níveis satisfatórios dentro do contexto de limpeza urbana, com destaque por ser a capital número um da região Norte, de acordo com informações da Revista Limpeza Pública n° 94 de 2016 com o título de Termômetro da Limpeza Pública (MARQUES & AZEVEDO, 2019 d).

#### 4.11 GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA

O processo de tratamento anaeróbico produz biogás, um combustível gasoso que pode ser convertido em energia limpa e renovável. O biogás pode ser usado para gerar calor assim pode ser utilizado na geração de vapor nas caldeiras, economizando com isso óleo combustível (TORRES, 2017).

Para algumas aplicações, entretanto, o biogás deve ser tratado, pois existem diferenças consideráveis entre os requerimentos para as aplicações estacionárias do biogás e como combustível ou para a distribuição em tubulações (CANEVER, 2017). As aplicações mais comuns para o biogás são o aquecimento e a geração de eletricidade. Além dessas aplicações, a utilização como combustível veicular e a injeção na rede de gás natural são aplicações que vêm atraindo um interesse cada vez maior (ZANETTE, 2009).

Gases com as propriedades físico-químicas semelhantes à do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), possuem alta polaridade, sendo altamente solúveis em água, resultando assim, na sua dispersão no sistema de circulação dos líquidos e percolados do aterro, sendo encaminhados para o sistema de tratamento de percolados (PROBIOGAS, 2016).

O objetivo do aproveitamento energético do biogás, produzido pela degradação dos resíduos, é convertê-lo em uma forma de energia útil (BRASIL, 2012). O biogás tem sido utilizado por meio da combustão em fogões, aquecedores, incubadora e pequenos motores, etc., normalmente, equipamentos de uso estacionário.

Em motores estacionários, pode-se utilizar o biogás diretamente produzido nos biodigestores, sem purificação, para o acionamento de bombas hidráulicas e geradores de energia, sendo assim, uma grande vantagem ao seu uso no meio rural (SOUZA; SILVA; BASTOS, 2010).

#### 4.12 ENERGIA ELÉTRICA DE BIOGÁS

Os projetos de tratamento e aproveitamento energético de biogás em aterros no Brasil têm sido promovidos com base na sustentabilidade ambiental e econômica do próprio

empreendimento, no atendimento às normas e políticas públicas, na necessidade de estabelecer relações positivas com a vizinhança do aterro, na necessidade de diversificação da matriz energética, na comercialização de energia elétrica e ainda na existência de diversas inovações tecnológicas envolvidas no setor (FIRMO, 2013a).

A previsão da geração de gases advindos da decomposição dos resíduos vem sendo realizada no Brasil desde 1970, com a utilização de modelos simplificados (EPA, Banco Mundial, IPCC e outros), que não consideram a particularidade de cada local como morfologia, procedimentos operacionais, condições climáticas etc. (FIRMO, 2013b).

Entretanto, com a atraente oportunidade de aproveitamento energético do biogás em aterros de resíduos sólidos associada à realização de análises comparativas de dados de geração de biogás obtidos com a utilização de modelos matemáticos e ensaios de campo, pode-se perceber que existem diferenças significativas entre os dados quantitativos de biogás estimados pelos modelos e os analisados em campo (FIRMO, 2013c).

A captação do biogás produzido no Aterro Sanitário de Palmas – TO com a finalidade de estudo de viabilidade econômica, embora houvesse essa predisposição desde seu projeto inicial em 2001, somente foi realizada em 2019, sendo uma iniciativa pioneira na região norte do Brasil (MARQUES e AZEVEDO).

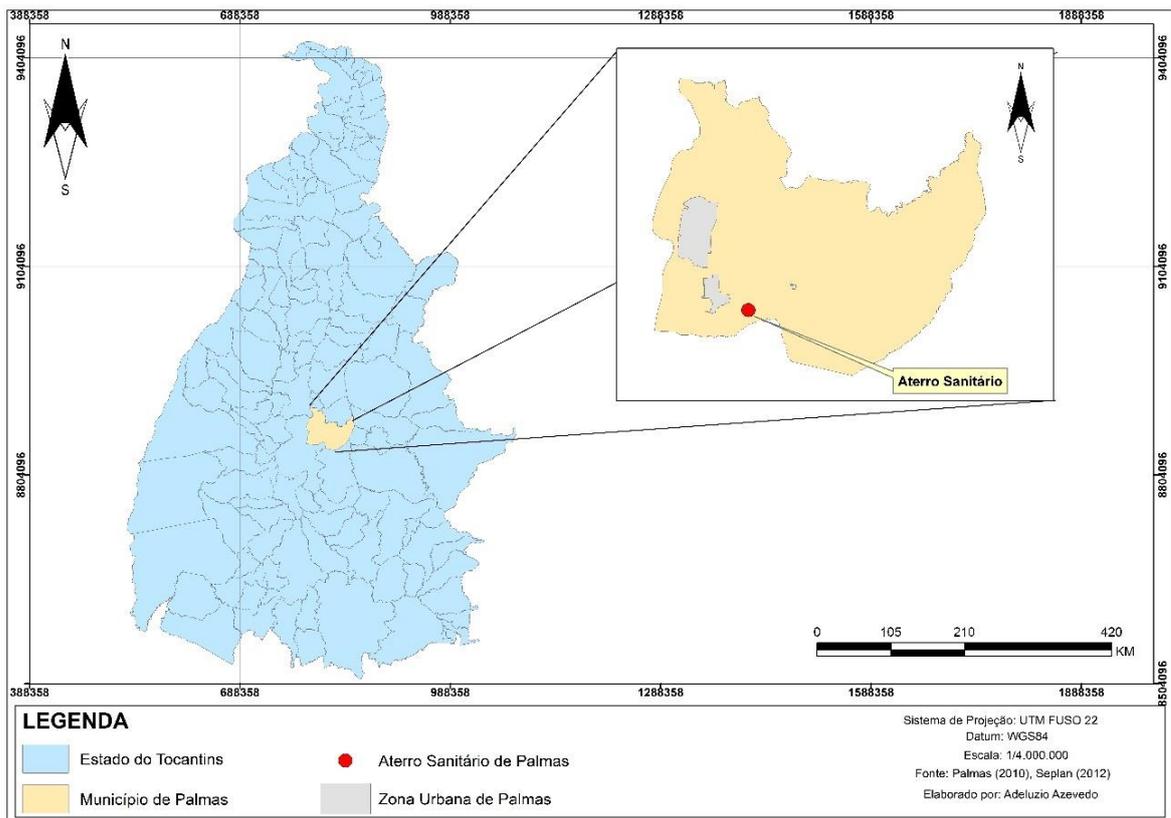
Para realização das medições do biogás, utilizou-se um dreno vertical, com medições semanais e com perfil diário. Para medir a vazão de biogás necessitou-se fazer um procedimento adaptativo, com o fechamento do dreno vertical com tampa de concreto com saída de biogás através de orifício central, adaptado 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 (MARQUES e AZEVEDO, 2019).

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 LOCAL DA PESQUISA

O Aterro Sanitário de Palmas foi escolhido como estudo de caso devido a sua importância para a cidade (Figura 1). O mesmo encontra-se localizado na área rural, ao sul do município, distando 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 95,7784 ha (MARQUES & AZEVEDO, 2019).

**Figura 1** – Aterro Sanitário de Palmas - TO.



Fonte: Autor, (2019).

A área do aterro, com seus 4,1km, encontra-se cercada em sua totalidade. Na entrada existe uma guarita de controle de cargas por meio de balança de 30 toneladas permitindo conhecer quantidade dos resíduos gerados onde os responsáveis coletam as seguintes informações: tipo de resíduos, placa e modelo de veículos e caminhões, pesagem, horário de entrada e saída (Figura 2). Não é permitida entrada de pessoas não autorizadas (MARQUES & AZEVEDO, 2019).

**Figura 2** - Pesagem dos RSU para destinação final no Aterro Sanitário de Palmas – TO.



Fonte: Marques e Azevedo (2019).

A disposição, compactação e cobertura dos resíduos nas células, impermeabilizadas com geomembrana PEAD de 2,00 mm, é realizada pelo uso permanente de trator de esteira D-61 CAT. São empregados outros equipamentos no processo, a saber: pá carregadeira, escavadeira hidráulica, retroescavadeira e caminhões basculantes (MARQUES & AZEVEDO, 2019).

Para realização da análise de viabilidade técnica e econômica, foi realizado um levantamento de dados técnicos para analisar as alternativas de geração de eletricidade a partir do biogás, bem como a determinação do potencial de biogás a ser produzido e do potencial e eletricidade a ser gerado. Para isso o modelo a ser utilizado foi recomendado pela Agencia Ambiental dos estados Unidos - USEPA (MARQUES & AZEVEDO, 2019).

Segundo Marques (2019), o Aterro Sanitário de Palmas recebe atualmente cerca de 270 ton/dia de RSU, com funcionamento durante 24 horas por dia, com exceção da compactação,

que somente é realizada no período diurno. No mês de abril do ano de 2018, o Aterro Sanitário de Palmas recebeu cerca de 8.348 toneladas de RSU.

O Aterro Sanitário de Palmas conta atualmente com 30 colaboradores, distribuídos em dois turnos de trabalho com escala de 12/36 horas, que são remanejados nas diversas funções de operação e manutenção do referido local.

Ao chegar ao Aterro, o resíduo é pesado na guarita, para aferir-se o peso da massa que é disposta no local diariamente. Após a emissão do ticket eletrônico com a pesagem dos resíduos, eles são encaminhados diretamente para a célula em operação do Aterro (Figura 3).

Segundo informações disponibilizadas pela Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos (SEISP, 2017), o Aterro Sanitário de Palmas – TO conta atualmente com cinco células de disposição final de resíduos sólidos urbanos sendo, quatro já encerradas e uma em operação.

**Figura 3** - Disposição dos RSU na célula do Aterro Sanitário de Palmas – TO.



Fonte: Marques e Azevedo (2019).

O sistema de drenagem do chorume gerado no aterro é constituído por tubos de PEAD corrugados e perfurados para melhor absorção do chorume, NBR – 13.896/1997, geralmente com 160 mm de diâmetro, divididos em faixas retangulares na base do aterro, os drenos são

interligados à drenagem de gases e direcionam o chorume para o sistema de tratamento biológico (Figura 4).

**Figura 4** – Vista área do Aterro Sanitário de Palmas - TO e do sistema de tratamento de lixiviados.



Fonte: Marques e Azevedo (2019).

O tratamento do lixiviado produzido pelas células do Aterro Sanitário de Palmas - TO está disposto ajusante do local, aproveitando o desnível natural do terreno, e foi projetado na seguinte configuração: primeira lagoa anaeróbia, segunda de maturação, a terceira lagoa facultativa, a quarta lagoa de polimento seguida de tanque de infiltração (Figura 5).

**Figura 5** – Monitoramento da qualidade do lixiviado ao longo do sistema de tratamento biológico.



Fonte: Marques e Azevedo (2019).

O sistema de coleta e transporte das emissões atmosféricas instalado no Aterro Sanitário de Palmas é o vertical, composto atualmente por sessenta e cinco pontos de coleta de biogás prontos a serem acoplados em um sistema de tratamento/aproveitamento energético do biogás gerado pelo Aterro (Figura 6). Atualmente, nenhum tipo de tratamento/aproveitamento energético do biogás é adotado pelo Aterro Sanitário de Palmas, lançando todo o biogás gerado, sem nenhuma forma de tratamento, na atmosfera local.

**Figura 6** - Drenagem de gases no Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins.



Fonte: Marques e Azevedo (2019).

## 5.2 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS RSU DO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS TO.

Na opinião de Consoni *et al* (2000), o gerenciamento integrado deve começar pelo conhecimento dos resíduos gerados pelo município, uma vez que, vários fatores influenciam na sua composição: sazonalidade, aspectos climáticos, regionais, temporais e possíveis flutuações na economia. Portanto, as amostragens devem ser realizadas sistematicamente. Caracterizar os diversos componentes dos resíduos sólidos subsidia a elaboração de planos de gestão que abrangem a expansão dos serviços de coleta regular, a viabilidade de implantação de coleta seletiva e compostagem, além da especificação de equipamentos e definição de sistemas de eliminação. (COMCAP, 2002, p. 31).

Segundo Guadagnin *et al* (2001), a identificação e caracterização dos constituintes de cada localidade são fundamentais na determinação da alternativa tecnológica mais adequada, desde a etapa de coleta, transporte, reaproveitamento, reciclagem até a destinação final dos rejeitos em aterros sanitários.

A composição gravimétrica identifica o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de lixo analisada. Os componentes mais comuns são: matéria orgânica, metal ferroso, borracha, papel, metal não ferroso, couro, papelão, alumínio, pano/trapo, plástico rígido, vidro, madeira, plástico mole, cerâmica e agregados finos. Portanto, é possível identificar o aproveitamento tanto das frações recicláveis para comercialização quanto da matéria orgânica para a produção de composto orgânico. (MONTEIRO *et al*, 2001).

Para se determinar o tamanho da amostra de resíduos foi empregado o método do quarteamento, que tem como finalidade diminuir o tamanho da amostra coletada, até que esteja facilmente trabalhável. A amostra foi homogeneizada, e em seguida foi feita a sua divisão em 4 partes descartando-se 2 dessas partes (*vis-à-vis*), sendo repetida a operação até que se chegue ao tamanho de amostra ideal. (Figura 7).

**Figura 7** – Determinação do peso específico e composição gravimétrica de RSU no Aterro Sanitário de Palmas – TO.



Fonte: Marques e Azevedo (2019).

A geração per capita (kg/habitante/dia) foi realizada levando-se em conta a pesagem de todos os resíduos produzidos diariamente com a divisão do valor obtido pelo número de habitantes do município, tendo como base os dados de população do IBGE (2019).

### 5.3 PESO ESPECÍFICO APARENTE

Uma das características determinantes no comportamento geotécnico de qualquer aterro é o estado de tensões induzido pelo peso próprio dos materiais que o constituem. Desta forma, torna-se incoerente o estudo do comportamento mecânico de qualquer material aterrado sem que seja conhecido seu peso específico (CALLEGARO, 2019).

O Peso específico é o parâmetro quantitativo que reflete a densidade dos resíduos, estimado por meio da amostragem realizada, procedendo-se à pesagem de certa fração da amostra depois de acondicioná-la, sem promover a compactação dos resíduos, em medida rasa e sem coroamento, em um recipiente de volume conhecido.

É o peso do lixo solto em função do volume ocupado livremente expresso em  $\text{kg/m}^3$ . Sua determinação é fundamental para o dimensionamento de equipamentos e instalações. Nesta análise depois de medidos e pesados constatou-se que o peso específico do lixo domiciliar disposto no Aterro sanitário de Palmas – TO varia numa média de 230 a 246  $\text{kg/m}^3$ .

Na análise da composição gravimétrica foi efetuada a divisão dos resíduos em 6 categorias, a saber: material orgânico, vidro, metais, plástico, papel (papelão) e tecidos.

Notou-se que quanto maior o volume de resíduos orgânico maior a umidade e consequentemente maior a densidade desses resíduos.

Percebeu-se que os resíduos sólidos orgânicos de Palmas - TO representam um percentual de variação entre 40% e 60%, aproximadamente, relativo a todos os resíduos gerados o que corresponde a um enorme potencial para a compostagem. Já os resíduos sólidos recicláveis variam 28% e 46% aproximadamente, do total de resíduos gerados o que considerou-se um quantitativo bastante favorável para desenvolvimento do mecanismo de reciclagem no município.

### 5.4 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, 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, conectada através de tubulação de cobre ao medidor de vazão (Figura 8).

**Figura 8** – Adaptação do sistema para captação de gases no Aterro Sanitário de Palmas – TO.



Fonte: Marques e Azevedo (2019)

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 m<sup>3</sup>/h, com sistema totalizador com modelo ciclométrico de 8 dígitos protegido com tampa de policarbonato transparente (Figura 9).

**Figura 9** – Medidor de vazão de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – TO.



Fonte: Marques e Azevedo (2019)

### 5.5 COLETA E ANÁLISE DE BIOGÁS

A coleta do biogás foi realizada com o auxílio de saco plástico tipo BAG e seringa plástica de 100 mL (Figura 10). Posteriormente foi usado um recipiente de vidro a 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 sob a orientação do Dr. Marcelo Mendes Pedroza às 10 h da manhã e os ensaios foram concluídos na Universidade de São Paulo em Campinas - SP.

**Figura 10** – Coleta de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – TO: (a) drenagem do biocombustível e (b) estoque de amostra para posterior análise.



Fonte: Marques e Azevedo (2019)

## 5.6 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO NO SISTEMA EXPERIMENTAL NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS – TO.

A geração de energia elétrica a partir do biogás agrega vários benefícios ambientais e sociais, não se descarta a avaliação da viabilidade econômica do investimento (VANZIN, 2006).

Bruni e Fama (2007) afirmam que a análise econômico financeira de investimentos tem justamente a preocupação de verificar se os benefícios gerados com o investimento compensam os gastos realizados.

A etapa do estudo de viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no Aterro Sanitário de Palmas - TO foi dividida nas seguintes etapas, a saber: (a) cálculo de produção de biogás ao longo do tempo;

(b) cálculo da curva de geração de energia elétrica;

(c) investimento da usina de geração de energia elétrica;

(d) cálculos de TIR (taxa interna de retorno) e VPL (valor presente líquido).

A vazão do biogás ao longo do tempo será determinado através da Equação 1.

$$Q = L_o R (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Equação 1

Sendo:

Q: geração de metano no ano ( $m^3$ /ano);

$L_o$ : potencial de geração de metano dos resíduos ( $m^3$ /t de lixo);

R: média anual de deposição dos resíduos durante a vida útil do aterro (t/ano);

K: constante de decaimento ( $ano^{-1}$ );

c: tempo desde o fechamento do aterro (anos);

t: tempo desde a abertura do aterro (anos).

Segundo Marques (2019), o fator  $L_0$  depende da composição dos resíduos e das condições do aterro para o processo de metanização, estando os valores encontrados em bibliografia técnica entre 6,2 e 270 m<sup>3</sup> de metano por tonelada de resíduos para aterros americanos. A constante de decaimento ( $k$ ) está relacionada com o tempo necessário para a fração de carbono orgânico degradável (COD) do lixo, decair para metade de sua massa inicial, podendo ser obtida por processo iterativo quando são conhecidas as vazões do gás metano do aterro, o valor “ $L_0$ ” e a quantidade e o tempo de deposição do lixo no local.

A curva de geração de energia elétrica a partir do biogás foi realizada segundo recomendações da CETESB (1999), observando os seguintes detalhes: (a) densidade do biocombustível igual a 0,716 kg/m<sup>3</sup>, (b) percentual de metano na mistura igual a 55%, (c) recuperação típica de 90%, (d) poder calorífico do biogás igual a 5.800 kcal/m<sup>3</sup>.

Após definida a potência da usina de geração de energia elétrica, foi simulado o valor necessário para o investimento do empreendimento, com base nos estudos de pré-viabilidade do Banco Mundial (2005), com a inclusão dos seguintes itens:

- (a) estudo dos investimentos necessários à instalação de uma usina geradora de energia;
- (b) forma de financiamento;
- (c) formação do fluxo de caixa, com receitas e despesas;
- (d) análise de viabilidade técnica-econômica do investimento.

Para a análise de viabilidade econômica do investimento, foi calculada a Taxa Interna de Retorno (TIR).

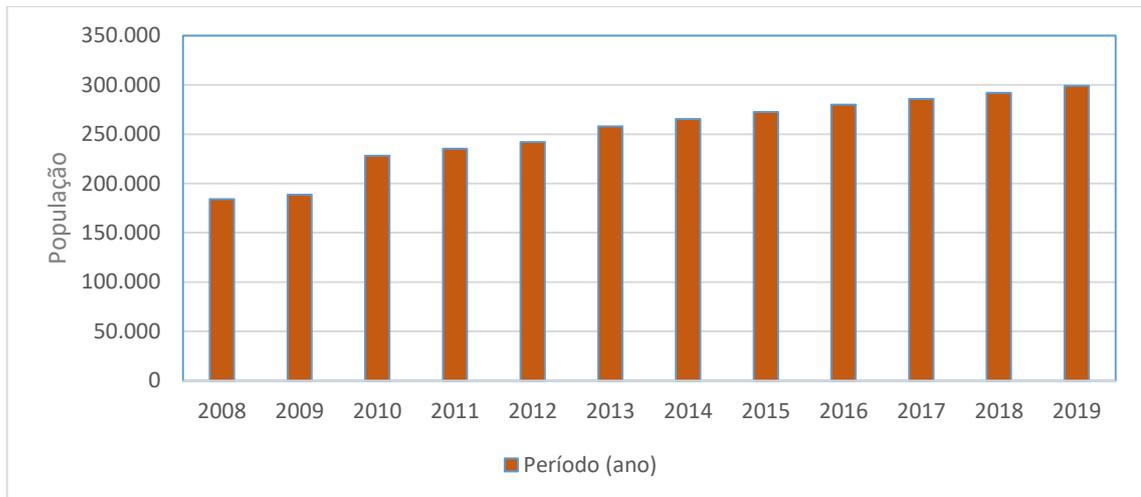
## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 PRODUÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE PALMAS – TO**

Através da análise minuciosa de dados estatísticos, percebeu-se um aumento significativo da produção de RSU nos últimos 10 anos. Este aumento pode estar relacionado diretamente com o aumento da população, que segue em ritmo acelerado desde 2008, conforme Gráfico 1.

Com um quantitativo de aproximadamente 97.200 toneladas em 2019, o aterro recebe diversos tipos de resíduos que, de acordo com as normas ambientais foram separados por classe, e tratados de forma específica.

**Gráfico 1 - Crescimento populacional de Palmas – TO.**



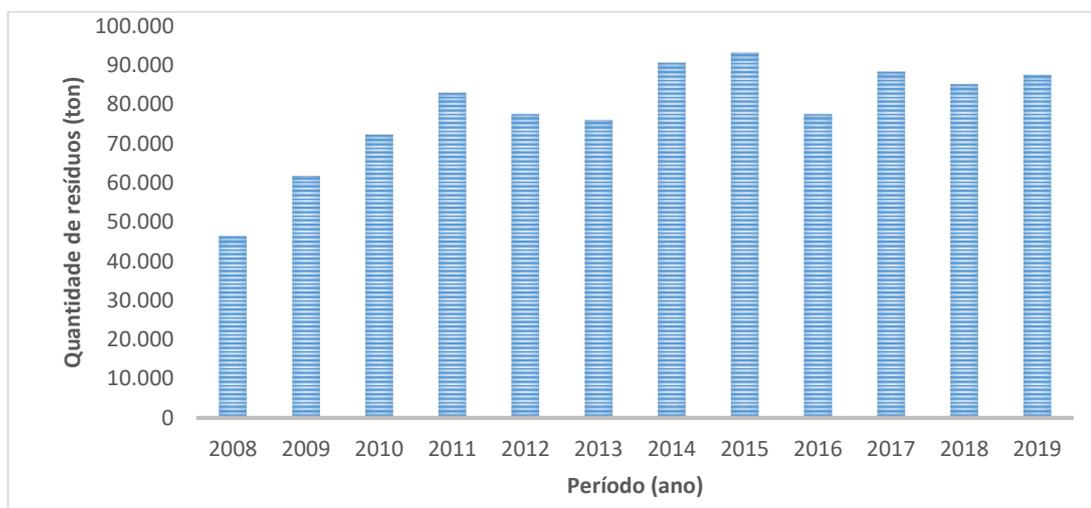
Fonte: Marques e Azevedo (2019)

Em 2019 a produção de resíduos domésticos na cidade de aproximadamente 97.200 toneladas. Quando comparado com a produção no ano de 2008 que foi de 46.317 toneladas, observa-se um crescimento de 47,6%. Conforme observado no Gráfico 2, esse crescimento na quantidade de resíduos domésticos pode estar relacionado a um aumento populacional de 61,52% no mesmo período (Gráfico 1) (MARQUES & AZEVEDO, 2019).

O Município de Palmas - TO atendeu no em 2019, 98% de toda a população com procedimentos voltados à gestão de resíduos sólidos urbanos, o que diz respeito à coleta e transporte. Utilizando-se dessas informações citadas, calculou-se a geração per capita, pela relação entre o peso médio dos resíduos e a população atendida pelo serviço de coleta. Foi possível perceber que a população do Município possui uma geração per capita média de 0,99kg/hab./dia de resíduos sólidos, valor compatível à média nacional, situada em torno de 1 kg/hab./dia (MARQUES & AZEVEDO, 2019).

Os resíduos domésticos produzem um líquido preto, viscoso e mau cheiroso denominado chorume, cem vezes mais contagioso que o esgoto doméstico (ABREU, 2001). Este líquido é drenado do fundo das células e levado para um sistema de tratamento constituído por 5 lagoas de estabilização, anaeróbia, facultativas, e polimento, após atingir 80% de purificação, é lançado ao solo, através da lagoa de infiltração. Segundo Pedroza *et al.*, (2014) estes resíduos possuem grande potencial energético e podem ser transformados pelo processo de pirólise assim como outros processos gerando produtos altamente energéticos, tais como carvão ativado, bio-óleo, e biogás.

**Gráfico 2:** Produção de Resíduos Domésticos na cidade de Palmas – TO.



Fonte: Marques e Azevedo (2019).

Segundo Arraes *et al.* (2006) e Demajorovic *et al.* (2012), as cidades mais ricas produzem mais lixo. Afirmam que a relação positiva entre crescimento da renda e poluição é intuitiva, pois indivíduos com mais renda consomem mais e, portanto geram, inevitavelmente mais resíduos. Sendo assim a quantidade de resíduos que um habitante produz pode ser usada como indicativo econômico.

Sabe-se que a produção de lixo é um indicador importante, para que se possa observar as oscilações econômicas de um país. Se a economia vai bem a produção de lixo aumenta, se está em decadência a produção diminui (MARQUES e AZEVEDO, 2019).

Em 2016, observou-se em Palmas, uma considerável baixa na geração de lixo em relação a 2015, a qual se atribui não a conscientização ambiental da população, mas sim da crise deflagrada nesse período que afetou o Brasil, Tocantins e, conseqüentemente, Palmas -TO.

Existe uma quantidade mínima de produtos alimentícios necessários ao provimento de um adulto, que é a composição de uma cesta básica. É de se supor que famílias que vivem até a linha da pobreza (US\$ 1,90/dia), quando tem seus rendimentos aumentados tendem a aumentar seu consumo. (MARQUES e AZEVEDO, 2019).

Em 2015 a produção de resíduos domésticos na cidade foi de aproximadamente 93.000 toneladas. Quando comparado com a produção no ano de 2008 que foi de 46.317 toneladas, observa-se um crescimento de 53 %. Os resíduos domésticos produzem um líquido percolado

denominado chorume, que possui potencial poluidor de até cem vezes mais que o esgoto doméstico.

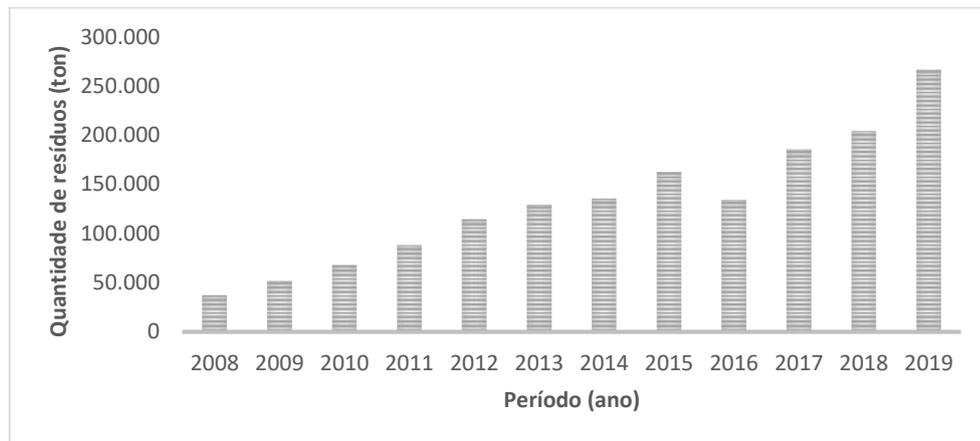
O incentivo a industrialização do interior do Brasil, impulsionada em meados de 2008, ocasionou uma ampliação da ocupação das cidades. Neste cenário, foi necessário investimento em infraestrutura urbana e em ampliação de unidades residenciais. A construção civil acompanhou uma fase de desenvolvimento seguida de uma estabilização, o que provocou elevação em números de geração postos de trabalho e aumento de renda (PINTO, 2016).

A indústria da construção civil exerce uma grande contribuição para o desenvolvimento da economia dos países, principalmente se considerada a quantidade de empregos gerados e a influência direta em todos os setores que produzem insumos, equipamentos e serviços para a utilização no seu processo produtivo (BARRETO, 2016).

A estimativa de geração de RCC pode assumir métodos distintos para cada município. Alguns gestores municipais, por exemplo, adotam a elaboração do método de Xavier e Rocha (2001), que faz menção a geração per capita de RCC entre 0,66 a 2,43 kg/hab por dia. Outro método, de autoria de Pinto (1999), utiliza como padrão uma taxa de geração de 150 kg de resíduo por cada metro quadrado construído (BARRETO, 2016). O Gráfico 3 apresenta a produção de RCC na cidade de Palmas (TOCANTINS, 2018).

A mensuração dos materiais dispensados na construção civil per capita traz uma reflexão do que pode ser modificado a partir do canteiro de obras até a destinação final, onde toneladas de materiais são desperdiçadas, seja pela má utilização e má administração ou pela falta de uma política de incentivo a reutilização (BARRETO, 2016).

**Gráfico 3:** Produção de Resíduos da Construção Civil na cidade de Palmas – TO.



Fonte: ASTTER (2018).

No município de Palmas - TO de acordo com informações da Associação Tocantinense de Empresas Transportadoras de Entulhos, Reciclagens e Afins – ASTETER, em 2014 foram coletadas aproximadamente 21.144 caçambas, o que representa um volume estimado de 1.074.820 m<sup>3</sup> de resíduos, como a densidade do RCC igual a 1,28 ton/m<sup>3</sup> (ABNT), portanto tem-se aproximadamente uma quantidade de 14.308.003 toneladas. A destinação final dos RCC coletados pelas empresas pertencentes a ASTETER é o aterro de inertes, com prévia triagem manual de alguns materiais. O pátio operacional da empresa conta com 2 funcionários que fazem as anotações e orientam a descarga além de 07 triadores que fazem a triagem de materiais recicláveis (PALMAS, 2018).

No período de (2008 a 2019), em Palmas - TO houve um aumento progressivo dos Resíduos da Construção Civil levando-se em consideração o crescimento populacional do município, conseqüentemente a construção de grandes obras habitacionais, comerciais e pequenas reformas nas unidades já existentes. Portanto observa-se esse aumento levando-se em consideração esses fatores.

A Prefeitura de Palmas - TO, através da Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos (SEISP), executa os serviços de poda e coleta de galhadas no município de Palmas - TO tanto das podas feitas pela SEISP quanto as efetuadas pela comunidade. Os trabalhos de coleta atendem todas as regiões da Capital, obedecendo ao cronograma estruturado pela própria secretaria, no qual a primeira dezena de cada mês (do dia 1<sup>a</sup> ao dia 10), o Plano

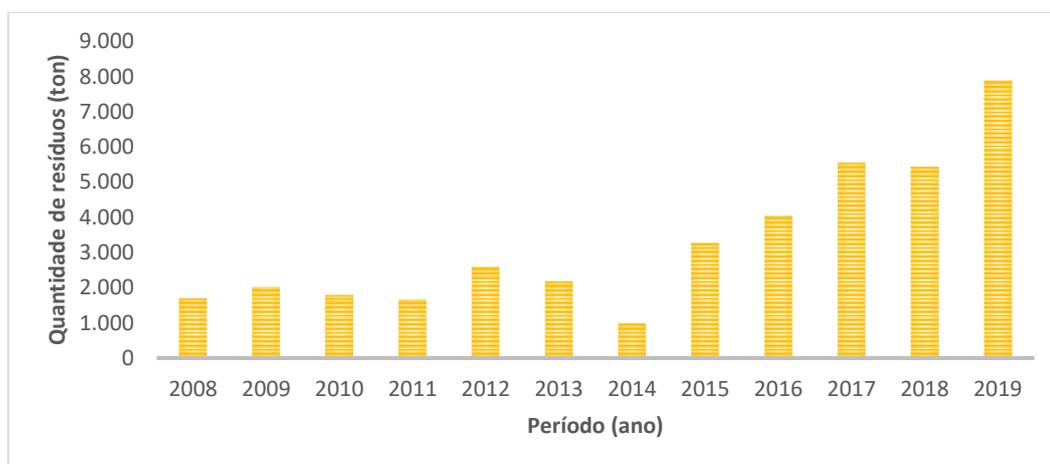
Diretor Norte recebe o serviço de coleta de galhadas; na segunda dezena (do dia 11 ao dia 20) é a vez do Plano Diretor Sul; na última dezena (do dia 21 ao dia 30 / 31) a região Sul da Capital é beneficiada com a ação (SEISP, 2019).

As equipes de coleta de galhadas percorrem as ruas internas das quadras e avenidas à procura de galhadas descartadas após a poda das árvores.

Além de ser um cuidado para a saúde e funcionalidade, a poda de árvore deve ser uma prática periódica, sejam para proporcionar mais vitalidade as árvores ou por motivo de segurança, já que galhos muito baixos ou compridos e copas muito altas ou fechadas podem causar problemas, como dificultar a locomoção dos pedestres e a passagem de veículos nas ruas, cobrir a iluminação pública ou ainda provocar danos à fiação elétrica ou telefônica.

O Gráfico 4 apresenta a produção de resíduos da poda de árvores na cidade de Palmas (Tocantins).

**Gráfico 4:** Produção de galhadas na cidade de Palmas – TO.



Fonte: SEISP (2019).

As cidades não parecem, à primeira vista, o ambiente mais propício para o desenvolvimento de vegetação. Mas, de acordo com um estudo recente da Universidade Técnica de Munique, na Alemanha, as árvores crescem curiosamente mais rápido em áreas urbanas e metropolitanas do que em bosques ou zonas rurais.

O crescimento acelerado da vegetação em áreas urbanas se deve aos efeitos das "ilhas de calor" - fenômeno climático em que a temperatura aumenta em cidades com alto grau de

urbanização, devido à concentração de edifícios, ruas asfaltadas, sistemas de aquecimento e intensa circulação de veículos, entre outros fatores.

Segundo a literatura, as "ilhas de calor" aceleram o crescimento das árvores de duas maneiras. Por um lado, o aumento da temperatura estimula a fotossíntese. Por outro, prolonga o período de vegetação, estendendo a época do ano em que as árvores podem crescer.

O crescimento acelerado vem acompanhado, no entanto, de um ponto negativo: as árvores também envelhecem mais rapidamente.

Isso significa que, quando as árvores são plantadas na cidade para melhorar o ar e a qualidade de vida, elas vivem menos tempo e, por isso, precisam ser substituídas com maior frequência.

Apesar de todas as vantagens da arborização dos espaços urbanos, esta deve ser planejada e mantida. Isso porque, muitas vezes, o crescimento dos galhos faz com que estes se choquem com calhas, fios elétricos, muros e postes. Além disso, pode prejudicar a dinâmica urbana, pois podem atrapalhar a iluminação e a sinalização das vias e a circulação de pedestres nas calçadas (PRETZSCH, 2019).

Em invernos muito rigorosos, árvores que não são podadas podem cair sobre pessoas e veículos. Ademais, acarretam acidentes graves envolvendo a fiação de postes de eletricidade. O contato dos fios com os galhos das árvores pode terminar por desgastar o revestimento da fiação, deixando esta desprotegida. Por isso, antes de se realizar o plantio das árvores, é necessário que se desenvolva um planejamento que considere inúmeras variáveis (PRETZSCH, 2019).

Portanto, ao analisar a produção de galhadas na Cidade de Palmas (TO), observa-se um crescimento contínuo, a partir de 2014 desse tipo de resíduo. Esse crescimento é atribuído justamente pela idade das árvores plantadas na cidade e a necessidade do serviço de podas e também os serviços de substituição daquelas que já completaram seu ciclo de vida. Conseqüentemente esses serviços geram esse tipo de resíduos. E a única forma de diminuir a produção desses resíduos é não plantar árvores nas cidades, o que considera-se prejudicial a qualidade de vida da população e agressão ao meio ambiente.

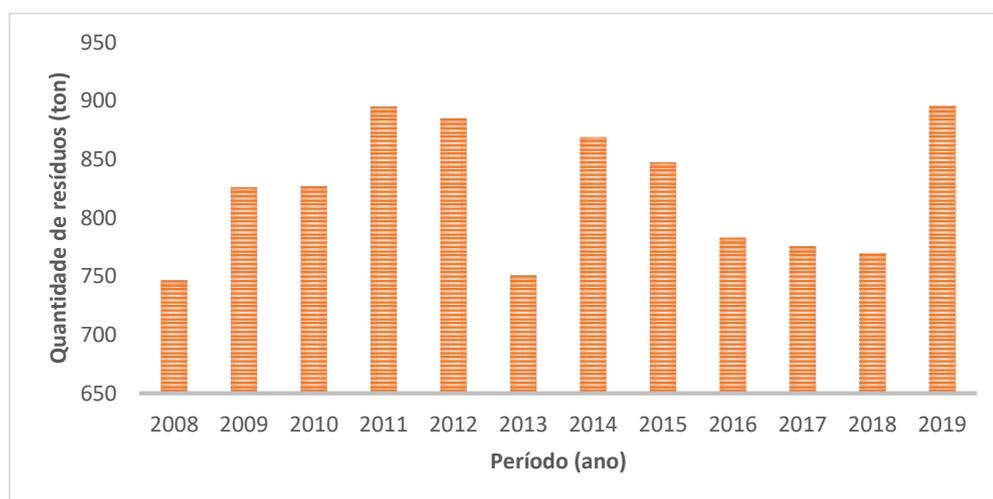
Segundo estudo realizado por Moreira (2015) as cascas das árvores dos centros urbanos podem ser utilizadas para o biomonitoramento de poluentes em diferentes tipos de via, visto que a disposição dos poluentes nas cascas ocorre principalmente pela deposição seca, quando as partículas são impactadas no tronco.

De acordo Silva (2016) no campus da Universidade de São Paulo – USP na capital, são geradas 6,5 toneladas de resíduos de poda de árvores as quais são transformadas em material adensado para fabricação de *pellets*.

A cidade de Gurupi localizada ao sul do estado do Tocantins utiliza toda a produção dos resíduos de poda de arvores, como fonte de energia para abastecer o setor de cerâmicas do município.

O Gráfico 5 apresenta a produção de resíduos sólidos de saúde (RSS) na cidade de Palmas (Tocantins).

**Gráfico 5:** Produção de Resíduos de Saúde na cidade de Palmas – TO.



Fonte: SEISP (2019).

O gerenciamento dos Resíduos Sólidos de Saúde - RSS do município de Palmas - TO é efetuado pelos poderes públicos, municipal e estadual. Os órgãos de vigilância sanitária e secretarias de saúde tanto municipal quanto estadual. No caso do município apoiada pela Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos, formam um complexo administrativo gerenciador desses resíduos, que por meio da Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 306/2004 (BRASIL, 2004) e o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução 308/2005, são os responsáveis pelo correto gerenciamento de todos os resíduos de saúde gerados no município, de modo a atender aos requisitos ambientais.

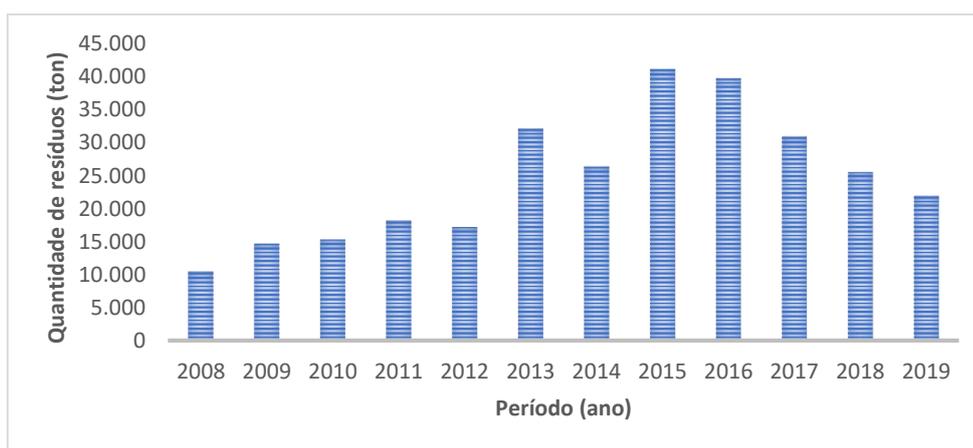
Até o ano de 2013 os RSS do município de Palmas eram coletados e destinados ao Aterro Sanitário de Palmas onde eram enterrados em valas, e as quais denominavam de valas ,

hermeticamente fechadas, devidamente revestidas com Geomembrana de PEAD de 2 mm. Após esse período, atendendo uma recomendação do Ministério Público Estadual – MPE, esses resíduos passaram a ser direcionados corretamente à sua destinação final (incineradores), portanto sem riscos à saúde da população e a partir daí o Aterro Sanitário do município passou a receber apenas as cinzas dos resíduos incinerados.

Dando continuidade à análise do Gráfico 5, percebe-se um considerável aumento desses resíduos em 2019, o qual atribui-se ao grande número de atendimentos hospitalares de pacientes de outros estados vizinhos, tais como: Maranhão, Piauí, Mato Grosso, Pará e Bahia, onde consideram a capital Palmas como referência no atendimento à saúde (AMORIM, L. M. 2003).

Consideram-se “outros resíduos” aqueles que não se enquadram na classificação de domésticos, de saúde, da construção civil ou industrial. Esses resíduos geralmente são descartados de maneira inadequada pela própria população. O Aterro Sanitário de Palmas, apesar de ser licenciado apenas para disposição final de resíduos domésticos, acaba recebendo esses resíduos por entender que mesmo não sendo um descarte adequado, o dano ambiental é menor que seu lançamento em um local qualquer da cidade. O Gráfico 6 apresenta a produção de outros resíduos na cidade de Palmas (Tocantins).

**Gráfico 6:** Produção de Outros Resíduos na cidade de Palmas – TO.



Fonte: SEISP (2019).

## 6.2 CARACTERIZAÇÃO DE RSU E SUA INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE BIODEGRADAÇÃO E GERAÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS – TO.

A análise gravimétrica consiste na separação e classificação dos materiais coletados. É uma técnica amplamente utilizada, pois permite a obtenção de resultados confiáveis a partir da aplicação de metodologias relativamente simples e que não demandam elevados investimentos nem mão de obra qualificada (COSTA, 2012).

A adequada caracterização dos RSU permite subsidiar o planejamento das atividades do setor de limpeza urbana, prever a vida útil dos aterros sanitários, bem como avaliar o potencial de reutilização, reciclagem e recuperação dos resíduos gerados. É a partir dessas informações que as medidas de melhoria relacionadas à limpeza pública e as ações de gerenciamento já adotadas são tomadas (FRANCO, 2012).

A Tabela 4 mostra os dados experimentais obtidos durante a análise gravimétrica e caracterização de resíduos sólidos urbanos da cidade de Palmas no ano de 2019.

**Tabela 4** – Composição gravimétrica e caracterização de resíduos sólidos urbanos do Aterro Sanitário de Palmas – TO.

Composição Gravimétrica dos Resíduos (%)	Atual Pesquisa	Outras Referências		
		Palmas (2013)	Coelho et al (2010)	ABRELPE (2017)
Matéria orgânica	53,70	44,37	58,60	51,4
Papel / papelão	6,00	8,59	13,4	13,1
Vidro	4,55	7,77	0,70	2,4
Metal	1,60	3,68	1,60	2,9
Plástico	25,40	26,18	13,20	13,5
Outros	5,75	9,41	12,50	16,7
Caracterização dos Resíduos				
Umidade (%)	49	35	53	-
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	200	142	218	-

Fonte: Autor (2019).

Nota-se que quanto maior o volume de resíduos orgânicos maior a umidade e consequentemente maior a densidade desses resíduos.

Percebe-se que os resíduos sólidos orgânicos de Palmas –TO representam um potencial de 53,70 % de todos os resíduos gerados o que corresponde a um enorme potencial para a compostagem e para a geração de biogás no aterro sanitário. Já os resíduos sólidos recicláveis (papel/papelão, vidro, metal e plástico) representam 37,55 % do total de resíduos gerados o que se considera um quantitativo bastante favorável para desenvolvimento do mecanismo de reciclagem no município.

O conhecimento da composição gravimétrica dos RSU é uma ferramenta essencial para a definição das providências a serem tomadas em relação aos resíduos, desde sua coleta até a destinação final, de uma forma sanitária correta, economicamente viável e que considere a variabilidade dos componentes e seus possíveis usos futuros. A coleta da amostra de resíduos não deve ser realizada no domingo ou na segunda-feira, e nem em períodos de férias escolares ou feriados/festividades, pois nessa época a geração é alterada, o que compromete a representatividade da amostra (GONÇALVES, 2007).

O teor de matéria orgânica obtido nessa pesquisa (53,70 %) foi bem superior ao valor 51,40 % reportado por ABRELPE (2017) e o teor de 44,37 % indicado por Palmas (2013). A determinação do conteúdo de material orgânico no resíduo na entrada do aterro é de grande importância pois o seu percentual está relacionado com a produção de biogás no sistema. De acordo com Clister (2002) a qualidade da matéria orgânica interfere na geração de biogás em aterro sanitário. Resíduos orgânicos com baixo teor de lignina geram uma quantidade significativa de biogás em espaço de tempo relativamente curto, e que, aterros que recebem grandes quantidades de madeiras também podem gerar biogás, mas numa taxa relativamente baixa quando comparada com aterros que tratam resíduos altamente putrescíveis.

Segundo Borba (2006), a duração das fases de produção do biogás, está ligada intimamente na distribuição e qualidade da matéria orgânica presente no maciço de resíduos, 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.

O teor de umidade dos resíduos sólidos urbanos na chegada do Aterro Sanitário de Palmas (2019) foi de 49 %. Uma possível explicação para o aumento da emissão de biogás é o

incremento da umidade na massa de resíduos, conseqüentemente a maior taxa de produção de biogás pelos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica.

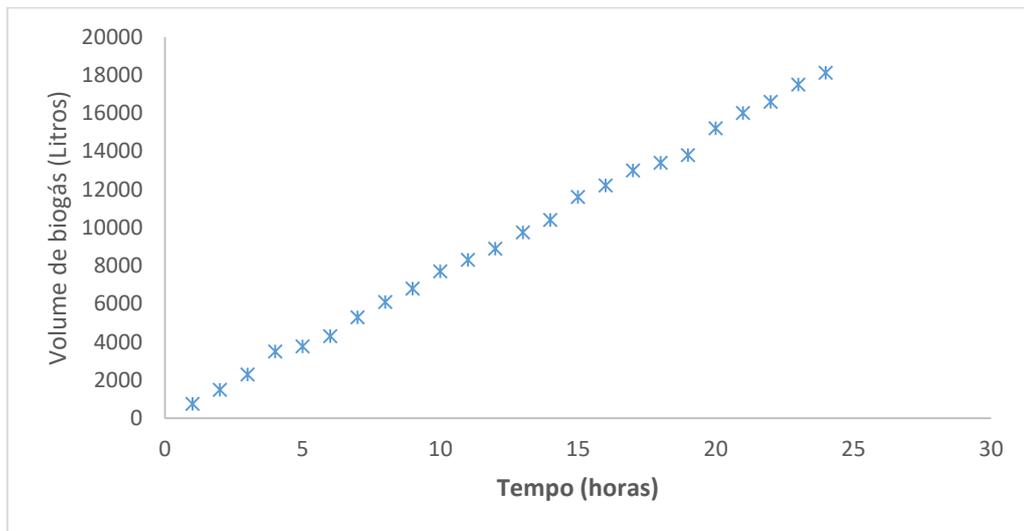
De acordo com Andrade (2014), o teor de umidade inicial do RSU depende da composição do resíduo produzido e do tempo de exposição às intempéries antes e durante a coleta do RSU, enquanto que o teor de umidade do RSU já depositado depende da quantidade de água que infiltra no aterro, da evaporação, dos procedimentos de operação do aterro, idade do RSU, profundidade de aterramento, funcionamento do sistema de drenagem de lixiviados, água de constituição do RSU liberada por processos biológicos e umidade removida com os gases do aterro.

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 (SOUZA, 1984; BORBA, 2006; SILVA, 2012).

### 6.3 PERFIL DE VAZÃO E ANÁLISE CROMATOGRÁFICA DO BIOGÁS PRODUZIDO NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS – TO.

O Gráfico 7 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 m<sup>3</sup>. Atualmente, no Brasil, as principais utilizações do biogás captado nos Aterros Sanitários é a sua queima direta em *flares* apenas convertendo o metano (CH<sub>4</sub>), presente no biogás em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 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 7** – Perfil de vazão diária de biogás no Aterro Sanitário de Palmas – TO.



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 ( $\text{CO}_2$ ), ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ), siloxanos e vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), resultando apenas no gás livre de impurezas e

com uma concentração de metano (CH<sub>4</sub>) 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).

Durante a determinação do perfil de vazão de biogás do Aterro Sanitário de Palmas parte do vapor de água presente no biocombustível condensou na tubulação e no medidor de vazão, impossibilitando a aferição da vazão do biogás com precisão. Isso indica que, em se tratando de aproveitamento energético do biogás torna-se necessária como etapa preliminar constituída de um sistema de condensação de água antes da tubulação de transporte e dispositivo de queima para geração de energia. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos durante a caracterização das amostras de biogás coletadas no Aterro Sanitário de Palmas. O principal constituinte foi o metano com um teor médio de 55,3 % em termos de abundância relativa na mistura gasosa. Os valores encontrados para os dois principais constituintes (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>) nas amostras coletadas no Aterro Sanitário de Palmas - TO estão bem próximos dos dados experimentais obtidos por Silva (2010) e Souza-Filho (2016) para biogás de aterros sanitários.

**Tabela 5** – Principais constituintes de amostras de biogás do Aterro Sanitário de Palmas – TO.

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

<sup>(1)</sup> Valores obtidos em termos de concentração relativas entre os dois principais constituintes.

Fonte: Autor (2019).

Biometano ( $\text{CH}_4$ ) 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) (MARQUES & AZEVEDO, 2019a).

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) (MARQUES & AZEVEDO, 2019b).

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) (MARQUES & AZEVEDO, 2019c).

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.

#### 6.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO NO SISTEMA EXPERIMENTAL- ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS - TO.

Essa parte da dissertação abordou os aspectos relacionados a geração de energia elétrica a partir do uso do biogás do Aterro Sanitário de Palmas - TO, destacando os detalhes: (a) análise de viabilidade técnica, (b) equivalência energética do biogás gerado e (c) análise de viabilidade econômica.

#### 6.4.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA

Na análise de viabilidade técnica foram estimados os custos de capital para o desenvolvimento de um projeto de recuperação de biogás e sua utilização no Aterro Sanitário de Palmas - TO. Foram levantados também os custos anuais esperados para a operação, manutenção e expansão regular do sistema de coleta de biogás.

Levando-se em consideração a perfeita estrutura do sistema drenante de gases do Aterro Sanitário de Palmas -TO estima-se o tempo de 6 meses para implantação e início de operação de uma UTE que inicialmente funcionará com 1 MW de potência o que equivale a 678.900kWh médio mensal usando-se um grupo gerador capaz de gerar 200 kW de energia elétrica.

Será injetada 920 kWh na rede de distribuição local, que representa aproximadamente 671.600 kWh/mês para ser compensado através do sistema de compensação de crédito da Mini e Micro Geração Distribuída - MMGD.

Definida a potência da usina de geração de energia elétrica, chegou-se ao valor necessário para o investimento do empreendimento, com base nos estudos de pré-viabilidade aplicados na Tabela 6.

Definida a potência da usina de geração de energia elétrica chegou-se a um valor estimado de 18.440.000,00 financiado em 100% pelo investidor referindo-se ao custo inicial para implantação baseada em motores a combustão interna abastecidos com biogás, para substituir o consumo de energia local e vender o excedente à concessionária de energia elétrica do município de Palmas - TO.

**Tabela 6 - Custos orçamentários totais da UTE.**

<b>Itens</b>	<b>Custos Estimados (R\$)</b>
Projetos	200.000,00
Usina de 1 MW abastecida com biogás	8.000.000,00
Construção da usina trabalho no local incluindo tubulação	900.000,00
Medição do biogás e equipamento de registro	100.000,00
Engenharia contingencia e 10% de outros serviços	440.000,00
Mobilização e gestão do projeto	500.000,00
Tubulação principal de coleta de gás	3.500.000,00
Tubulação lateral	2.900.000,00
Passarelas	100.000,00
Coletores horizontais	100.000,00
Equipamentos de ventilação e queima	800.000,00
Pré tratamento do biogás	200.000,00
Engenharia contingencia e custos iniciais de transação com MDL	400.000,00
Conexão perante a distribuidora	300.000,00
<b>Custo estimado total</b>	<b>18.440.000,00</b>

Fonte: Autor (2019).

#### 6.4.2 EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA DO BIOGÁS GERADO NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS –TO.

Para a modelagem matemática da equivalência energética do biogás gerado no Aterro Sanitário de Palmas – TO, foram utilizados os dados referentes ao motogerador LANDSET, que segundo informações do fabricante, possui uma eficiência de conversão elétrica de 28%, gerando uma potência de 200 kW em cada módulo operante a ser instalado (BRASMETANO,2018).

Assim, a partir do cálculo da potência gerado pelo motogerador, tornou-se possível obter a vazão mínima de aproximadamente 134 m<sup>3</sup>/h, para abastecer um motogerador de 200kW.

Segundo Figueiredo (2007), a eficiência da coleta do biogás é de aproximadamente 75%. Entretanto, a maioria dos cálculos de equivalência energética para biogás de aterros sanitários, consideram que 100% do biogás coletado é direcionado para o sistema de distribuição, tratamento e aproveitamento energético, sendo assim, impossível de considerar-se uma alta eficiência devido as perdas inerentes ao processo.

O funcionamento do conjunto motogerador LANDSET, proporciona a geração de 200 kW de energia elétrica, se o conjunto operar de forma ininterrupta em todo o mês, sendo possível gerar 432 MW de energia elétrica mensais com a produção atual de biogás gerado pelo Aterro Sanitário de Palmas – TO.

#### 6.4.3 A ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A viabilidade econômica determina se a empresa ou cliente interessado terá condições de arcar com o projeto de um empreendimento, assim como se ele será bem-sucedido e se proporcionará rentabilidade e lucratividade evitando que um projeto não rentável seja levado a diante.

Realizando a análise econômica foram presumidos que os fluxos de receita incluem as relativas à de venda de eletricidade e a economia de não mais ser necessário compra-la para atender as necessidades do aterro; incluem também as receitas associadas às reduções das emissões dos gases de efeito estufa, que são receitas geradas através da venda de créditos de carbono.

Foram usados os seguintes pressupostos gerais para avaliar as questões econômicas do estudo:

- Investimento inicial na UTE.
- Compra do biogás do proprietário do aterro.
- Custo anual para operação e manutenção do sistema de coleta e queima do biogás e da UTE, bem como para o registro anual de CER, monitorização e verificação.
- Avaliação econômica para esse tipo de negócio é para um período de 20 anos.
- Taxa de atratividade de 15%

- Considerada apenas uma opção de financiamento, sem nenhum custo para a municipalidade, onde o investidor financiará 100% do capital investido sem contrapartida.
- Considerado os cenários para avaliação dos Certificados de Emissões Reduzidas (CER), com o preço de vendas R\$ 14,85 por tonelada de CO2 equivalente.
- Mesma taxa de juros de 8% para análise de VPL e para o financiamento do empréstimo.
- Para esta análise, foi considerado o pagamento de aproximadamente 20% de receitas de CER ao proprietário do aterro sanitário pelo uso de biogás. Tem-se como base na experiência internacional que o pagamento ao proprietário do aterro pelo biogás pode variar entre 10 e 30% das receitas de CER.
- O valor do biogás tem reajuste anual de 3%
- Gastos futuros com operação e manutenção e com melhoria do sistema tem reajuste anual de 3%.

Além desses pressupostos gerais, para a implantação da UTE, aplicam-se os seguintes critérios técnicos e econômicos:

- A usina consistirá inicialmente de dois motores a combustão interna de 1,433MW, que são adquiridos no 1º ano. Conforme o aumento na produção do biogás vai-se aumentando a quantidade de motores conforme seja necessário.

- O valor dos motores que são adquiridos à medida que a produção do biogás aumenta será incluído na análise financeira.

- Redução de 7% na produção de eletricidade da usina para cobrir a carga parasítica, bem como um fator de capacidade da usina de 90% devido a períodos rotineiros e não rotineiros de inatividade. O biogás coletado durante o tempo de manutenção da usina será direcionado para queima.

Supõe-se que toda eletricidade gerada pelo projeto seja vendida fora do aterro (a eletricidade gerada irá suprir as necessidades energéticas do aterro, e isso é considerado um aumento de receitas, já que a eletricidade comprada da rede é mais cara que a eletricidade gerada e vendida pelo projeto).

Ressalta-se que durante a comercialização da eletricidade no mercado cativo incidem impostos, precipuamente o ICMS do Tocantins (25%) e PIS/CONFINS (5,509%). Com isso é notável que a energia gerada para consumo próprio não terá o desembolso dessa elevada carga tributária, o que contribui para a viabilidade do projeto.

Na viabilidade econômica são consideradas as seguintes despesas relativas a UTE (Tabela 7) e custos orçamentários iniciais do sistema de coleta e queima do biogás (Tabela 8).

**Tabela 7 - Custos orçamentários parciais da UTE.**

<b>Itens</b>	<b>Custo total estimado (R\$)</b>
Projetos	200.000,00
Mobilização e gestão do projeto	500.000,00
Usina de 1 MW abastecida com biogás	8.000.000,00
Construção/instalação da usina	900.000,00
Medição do biogás	100.000,00
Pré tratamento do biogás	
Engenharia contingencia e 10% de outros serviços	200.000,00
	440.000,00
<b>Custo total estimado</b>	<b>10.340.000,00</b>

Fonte: Autor (2020).

Para a instalação do sistema de captação do biogás em aterros sanitários os custos são estimados em até R\$ 20.000.000,00. Esses custos estão ligados a todos os equipamentos necessários para a implantação do sistema de coleta e queima do biogás (VANZIN, *et al.* 2006).

**Tabela 8** - Custos orçamentários iniciais do sistema de coleta e queima do biogás.

<b>Itens</b>	<b>Custo total estimado (R\$)</b>
Tubulação principal de coleta de gás	3.500.000,00
Tubulação lateral	2.900.000,00
Passarelas	100.000,00
Coletores horizontais	100.000,00
Equipamentos de ventilação e queima	800.000,00
Engenharia, contingência e custos iniciais de transação com MDL	400.000,00
Conexão perante a distribuição	300.000,00
<b>Custo total estimado</b>	<b>8.100.000,00</b>

Fonte: Autor (2020).

Na Tabela 9 são apresentadas as receitas relacionadas com a comercialização da energia elétrica obtida a partir do biogás, e na Tabela 10 estão disponíveis as despesas com a operação e manutenção da usina de recuperação energética.

**Tabela 9** – Receitas relacionadas com a comercialização da energia elétrica do biogás.

<b>Itens</b>	<b>Quant/mês</b>	<b>Custo/mês (r\$)</b>	<b>Total/mês (R\$)</b>
Comercialização de energia elétrica com a concessionária	671.600 kW	0,93155	625.628,98
Comercialização com MDL (créditos de carbono)	13.824,00m <sup>3</sup>	14,85	205.286,40
<b>Receita Mensal</b>			<b>830.915,38</b>
<b>Receita Anual</b>			<b>9.970.984,56</b>

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 10** – Despesas com a operação e manutenção da usina de recuperação energética.

<b>Itens</b>	<b>Custo Mensal R\$)</b>
Operação e manutenção da usina	50.400,00
Operação e manutenção da captação do biogás	43.200,00
Operação e manutenção do tratamento do biogás	46.800,00
Tributação ICMS (25%)	164.995,33
Tributação PIS/CONFINS (5.5091%)	34.466,52
<b>Despesa Mensal</b>	<b>339.861,85</b>
<b>Despesa Anual</b>	<b>4.078.342,20</b>

Fonte: Autor (2020).

De posse dessas informações e baseando-se no valor do capital investido foi possível estabelecer a receita líquida estimada com a geração de energia elétrica a partir da recuperação de metano (CH<sub>4</sub>) no Aterro Sanitário de Palmas –TO, bem com a queima de CO<sub>2</sub>, assim como a TIR, o VPL e o tempo de retorno do capital investido.

Ainda dentro dessa análise foi realizada a medição do biogás partido do princípio do conservadorismo (O Princípio do Conservadorismo Contábil (ou Prudência) determina a adoção do menor valor para os componentes do ATIVO e do maior para os do PASSIVO, sempre que se apresentem alternativas igualmente válidas para a quantificação das mutações patrimoniais que alterem o patrimônio líquido.

Desta forma não se contabilizam, por exemplo, expectativas de ganhos futuros (receitas ou resultados) que dependem de eventos que irão transcorrer. (Regras Contábeis), para calcular o percentual de recuperação do metano, considerando a taxa mínima de presença desse, no gás, ou seja 55,3%. O percentual de presença de CO<sub>2</sub> considerado foi de 44,6% sendo as emissões reduzidas parcialmente.

Na Tabela 11 são apresentados os detalhes da análise da viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no sistema experimental- Aterro Sanitário de Palmas –TO.

**Tabela 11 - Análise Econômica do empreendimento.**

<b>Capital Investido (R\$)</b>	<b>18.440.000,00</b>
<b>Receita Líquida (R\$)</b>	<b>491.053,53</b>
<b>VPL (R\$)</b>	<b>1.170.777,23</b>
<b>TIR (%)</b>	<b>4,31</b>
<b>Tempo de retorno (Capital Investido)</b>	<b>3 anos</b>

Fonte: Autor (2020).

O preço de venda da eletricidade gerada foi projetado com base nos valores praticados pela concessionária local.

Os custos e despesas da UTE são reduzidos. Os gastos fixos compostos de mão-de-obra, serviços contábeis, água, telefone e serviços pessoais, custo com energia, apesar de ser suprimida pela usina, todos já estão inclusos nas despesas operacionais do empreendimento.

O biogás e a eletricidade gerada serão reajustados a 3% aa, conforme já descrito anteriormente.

De acordo o que foi analisado conclui-se que o projeto é viável para um cenário de 75% de recuperação do biogás chegando a atingir um VPL acima de 1 milhão de reais.

Segundo dados disponibilizados pelo último Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2017 – ano base 2016, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), o consumo médio mensal de energia elétrica domiciliar no Brasil foi de 132,872kWh. Assim, com base nos valores de energia elétrica a ser gerada no Aterro Sanitário de Palmas, torna-se possível abastecer, com energia elétrica, 3.251 unidades habitacionais, com a geração de biogás atual no Aterro.

## 7.0 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na aplicação do procedimento para a captação, aproveitamento e transformação em energia elétrica do biogás produzido no Aterro Sanitário de Palmas - TO o qual recebe um volume de resíduos sólidos de 270 toneladas dia, aproximadamente, as análises de viabilidade técnica e econômica mostrou-se perfeitamente viável.

Feita a análise gravimétrica e a caracterização dos resíduos urbanos no Aterro Sanitário de Palmas –TO chegou-se à conclusão que a parte orgânica de todos os resíduos sólidos dispostos no Aterro representa 53,70%, o que corresponde a um potencial bastante favorável a geração de biogás.

De acordo com a modelagem ambiental do método de estimativa de geração de biogás para aterros sanitários de resíduos sólidos, chegou-se à conclusão que o município de Palmas – TO possui uma considerável geração de biogás em seu Aterro Sanitário, que é de aproximadamente 1.170m<sup>3</sup>/h. Considerando que o consumo médio mensal de energia elétrica no Brasil, por residência foi de 132,872kWh, é possível afirmar que a energia a ser gerada no Aterro Sanitário de Palmas – TO através da transformação do biogás, é suficiente para o abastecimento de 3.251 unidades habitacionais no município.

Desta forma confirma-se a viabilidade técnica e econômica desta análise, mesmo sabendo-se que o investimento é alto, mas com uma TIR de 4,31%, num período de 3 (três) anos o empreendimento terá um retorno financeiro bastante satisfatório.

Como sugestão de estudos futuros recomenda-se a purificação do biogás, aproveitamento do Gás Natural Veicular (GNV) e a transformação do gás metano (CH<sub>4</sub>) em gás butano(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) ou o chamado gás de cozinha.

## 8.0 REFERÊNCIAS

ABRELPE- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**: 2014. São Paulo: 2014.

ABREU, F. V; COSTA FILHO, M. A. F; SOUZA, M. C. L. **Biogás de aterros sanitários para a geração de energia renovável e limpa – um estudo de viabilidade técnica e econômica**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro Faculdade de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2009.

ABREU, M. F. **Do lixo à cidadania – Estratégias para a Ação**. Edição Caixa, 2001.

AGEITEC. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica**. Brasília: EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn102wx5e00sawqe3qf9d0sy.html>>.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. São Paulo: Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-09032012-090952/pt-br.php>>. Acesso em: 15 mar 2019.

AMORIM, L. M. **Estudos Vida e Saúde**, Universidade Católica de Goiás – Editora da UCG – 2003 v. 30, n. 2, p. 221 – 436, fev. 2003.

BARRETO, O. A. C. **Resíduos da Construção Civil em Palmas-TO**: Proposição de um modelo de boas práticas e manejo, 2016

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.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Lei 12.305, Política Nacional de Resíduos Sólidos**, 02 Agosto 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Lei 12.305, Política Nacional de Resíduos Sólidos**, 02 Agosto 2010b. Disponível em: Acesso em: 01 Novembro 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 430**, 13 mai 2011a. Disponível em: . Acesso em: 11 dez 2019.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Constituição da República Federativa do Brasil**, Brasília - DF, p. 292, 1988. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicaocompilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm)>. Acesso em: 23 dez 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário**, 2016. Disponível em: <<http://mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>>. Acesso em: 09 fev 2019.

BRIDGWATER, A. V. **Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Energy**, v.1, p.1 – 27, 2011.

CANCELIER, A.; SOTO, U.P.D.; COSTELLI, M.C.; LOPES, T.J.; SILVA, A. 2015. **Avaliação da produção de biogás de dejetos de suínos utilizando a metodologia de superfície de resposta. Engenharia Sanitária e Ambiental (Online)**, 20, 209-217

CARVALHO, J. L. V., JESUS, C. S., PORTELA, B. R. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais do centro da cidade de Barreiras, BA**, 2008.

CENBIO. **Centro Nacional de Referência em Biomassa. Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENERGBIOG**. Relatório Técnico Final. São Paulo, 2006.

COELHO T. C. ALENCAR R. OLIVEIRA R. M. S. **Caracterização física dos resíduos sólidos de Palmas -TO destinados ao Aterro Sanitário Municipal**.

COELHO, M. G. et al. **Disposição Inadequada De Resíduos Sólidos Urbanos E A Suas Consequências Na Contaminação De Águas Subterrâneas**, 2012.

CONSONI, A. J; PERES, C. S; CASTRO, A. P. de. **Origem e Composição do Lixo. In: D'ALMEIDA, M. L. O; VILHENA, A. Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), e Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), 2000. p. 29-40.

COSTA, D. F. **Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização**. (Monografia). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

COSTA, A. L. S; MARINHO, D. S; <sup>2</sup> ALVES<sup>3</sup>, R. M. T.; MACIEL, V. A. MELO<sup>4</sup>. **Gestão dos Resíduos de Serviço de Saúde do Hemocentro e Aterro Sanitário de Palmas/TO**. Acadêmicos do 3º Período do Curso de Tecnologia em Gestão Ambiental da Faculdade Católica do Tocantins, 2017.

COSTA, B. E. L. et al. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos e domiciliares e perfil socioeconômico no município de Salinas, Minas Gerais**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, Aguidabã, v. 10, n. 2, p. 73-90, 2012.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. do C.J.P.; ROSSI, M. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. In: **ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, 4., 2002, Campinas. *Anais eletrônicos*. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=pt&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=pt&nrm=abn)>. Acesso em:

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogas no aterro sanitario Delta em Campinas - SP**. Campinas: Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Campinas, 2003. 129 p. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264904>>.

FIGUEREDO, V. J. N. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica**. São Paulo, 2011.

FIRMO, A. L. B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**, Recife / PE, 2013.

FRANCO, S. C. **Caracterização Gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares e percepção dos hábitos de descarte no Sul de Minas Gerais**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (Concentração em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

FREITAS, C.; MAKIYA, I. K. **Potencial energético a partir do biogás proveniente de aterros sanitários do Estado de São Paulo**. XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Desenvolvimento Sustentável e Responsabilidade Social: as contribuições da Engenharia de Produção. Anais. Bento Gonçalves/RS, 2012.

GONÇALVES, T. T. A. **Potencialidade energética dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais do município de Itajubá – MG**. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

GUADAGNIN, M. R. et al. **Classificação, determinação e análise da composição gravimétrica dos resíduos urbanos dos municípios de Criciúma, Içara e Nova Veneza, do Estado de Santa Catarina, Brasil**. Rev. Tecnologia e Ambiente, Universidade do Extremo Sul Catarinense, v. 7, n. 2, 2001.

IBAM. **Planos de resíduos sólidos: desafios e oportunidades no contexto da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro - RJ: Instituto Brasileiro de Administração Municipal, 2014. Disponível em: <[http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/publicacao\\_residuos\\_final.pdf](http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/publicacao_residuos_final.pdf)>. Acesso em: 1 nov 2019.

IPCC. **Mudança do Clima 2007: Mitigação da Mudança do Clima**. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Genebra, p. 42. 2007.

LIMA, L. M. Q. **Lixo: tratamento e biorremediação**. 3.ed. São Paulo: Hemus Editora Ltda, 1995.

LOPES, A. A. **Estudo da gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos na bacia Tietê Jacaré (UGRHI-13)**. São Carlos - SP: Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

KHALAF, P. I. et al. **Produção de gás de síntese por plasma térmico via pirólise de metano e dióxido de carbono.** Revista Química Nova, v. 34, n. 9, p. 1491-1495, 2011.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE.** Recife: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5806>>.

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>>.

MARQUES e AZEVEDO, **O que faço com meu lixo? Da geração a destinação final.** Editora Kelps 1ª edição - Goiânia – GO, 2019.

MARQUES, S. M.; PEDROZA, M. M.; SOARES, M. E. J.; PICANÇO, P. A.; AZEVEDO, G. A. A.; RODRIGUES, R. C. **Study of the production and use of biogas generated in the Landfill of Palmas - TO** - 8th Inter-American Congress of Solid Waste, Asunción, PY - 2019.

MARQUES, M. S. et al. **Avaliação Área de Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Rio Verde – GO.** 10º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental SQA/ABES-RS, Porto Alegre - RS, 2016.

MARQUES, M. S.; LOPES, A. A. **Avaliação da Área de Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Rio Verde – Goiás.** IV SIRS – Simpósio sobre Resíduos Sólidos. Anais. EESC/USP, São Carlos - São Paulo, v. 4, p. 151-156, out 2015.

MARQUES M. S.; **Monitoramento ambiental e estudo de viabilidade técnica do aproveitamento energético do biogás gerado no Aterro Sanitário de Palmas – TO – Palmas – Tocantins,** 2018.

MCBAIN, M.C.; WARLAND, J.S.; MCBRIDE, R.A.; RIDDLE, C. W. **Micrometeorological measurements of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from a municipal solid waste landfill.** Waste Management & Research. n° 23. p 409-419, 2005.

MME/EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026.** Brasília/DF, 2017.

MONTEIRO, José Henrique Penido et al. **Gestão integrada de resíduos sólidos: manual gerenciamento integrado de resíduos sólidos.** In: Gestão integrada de resíduos sólidos: manual gerenciamento integrado de resíduos sólidos. IBAM, 2001.

MONTEIRO, T. C. N. (Coord.). **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Municipais e Impacto Ambiental: Guia para Preparação, Avaliação e Gestão de Projetos de Resíduos Sólidos Residenciais.** Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 2001. 417 p.

MOREIRA, T. C. L. **Biomonitoramento infra urbano da poluição de origem veicular: utilização de cascas de árvores na identificação de fontes de poluição atmosférica,** 2015.

Tese (Doutorado em Ciências) Programa de Patologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MOURA, Elisângela Santos de. **O aproveitamento energético nos aterros sanitários e o mercado de carbonos**. In: Âmbito Jurídico, Rio Grande, XVI, n. 114, jul 2013. Acesso: [http://www.ambito-juridico.com.br/site/?n\\_link=revista\\_artigos\\_leitura & artigo\\_id=13418](http://www.ambito-juridico.com.br/site/?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=13418).

NATURATINS. **Situação de Licenciamento Ambiental Aterros Sanitários nos Municípios do Estado do Tocantins**. Palmas: Instituto Natureza do Tocantins, 2014. Disponível em: <https://central3.to.gov.br/arquivo/194663/>. Acesso em: 07 fev 2019.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Biogás: Potencial de geração de Energia Elétrica e Iluminação a gás por meio do aproveitamento de Biogás proveniente de Aterro**. IEE USP, São Paulo, 2008.

PEDOTT, J.G.J.; AGUIAR, A.O. 2014. **Biogás em aterros sanitários: comparando a geração estimada com a quantidade validada em projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo**. Holos, 4, 195-211

PEQUI AMBIENTAL – **A importância de podar árvores nas cidades**, março de 2019. Acesso em 30 de setembro de 2020.

PEDROZA, M. M.; GOMES, M. C. F. A.; PAZ, E. C. S.; PEDROZA, L. A.; M.; VIEIRA, E. G.; SOARES, J. E. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em processo de pirólise** – Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 6, n. 2, p. 184 – 207, 2007.

PERS - **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins** (2017, p. 47)

PIACENTE, F. J.; PIACENTE, E. A. **Desenvolvimento sustentável na agroindústria canavieira: uma discussão sobre resíduos**. Disponível em: Acesso em: 15/05/2019.

PINTO, T. P.; GONZÁLEZ, J.L.R. **Manejo e gestão de resíduos da construção civil. Manual de orientação: como implementar um sistema de manejo e gestão nos municípios**. V.01. Brasília: Caixa, 2005.

PROBIOGÁS. **Biometano como combustível veicular**. Brasília: Ministério das Cidades, 2016. 76 p. Disponível em: [https://www.giz.de/en/downloads/giz\\_biogas\\_como\\_combustivel\\_digital\\_simples.pdf](https://www.giz.de/en/downloads/giz_biogas_como_combustivel_digital_simples.pdf).

QUERINO, L.A.L.; PEREIRA, J.P.G. **Geração de resíduos sólidos: a percepção da população de São Sebastião de Lagoa de Roça**. Revista Monografias Ambientais, 15, 404-415 Paraíba, 2016. **Resíduos sólidos urbanos de Maceió/AL: análise da composição gravimétrica sob influências sazonais**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais. Maceió - AL, 2020

RIO GRANDE DO SUL. 2014. PERS-RS **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul** (2015-2034). Disponível em: <http://www.pers.rs.gov.br/>. Acesso em: 10 mar. 2019.

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, september 2018.

SILVA, Dafne Pereira. **Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvores o aproveitamento energético**: Caso do campus da USP na apital de São Paulo, 2016.

TOCANTINS. LEI Nº 071, 31 jul 1989. Disponível em: <gov.br/arquivo/345037/>. Acesso em: 24 fev 2019.

TOCANTINS. **Lei Estadual nº 261, de 20 de fevereiro de 1991**. Palmas: Diário Oficial do Estado do Tocantins, 1991. 60 p. Disponível em: <https://central3.to.gov.br/arquivo/225856/>. Acesso em: 07 fev 2019.

TOCANTINS. **Decreto nº 10.459 de 08 de junho 1994**. Palmas: Publicado no Diário Oficial do Estado do Tocantins, 1994. Acesso em: 24 fev 2019.

TOCANTINS. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Tocantins**. Palmas: [s.n.], 2017. Disponível em: <https://central3.to.gov.br/arquivo/377360/>. Acesso em: 07 fev 2019.

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno. **Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. Estudos Avançados**, São Paulo, 26 (74), p. 249–260, 2012.  
<https://central3.to

URBANA - **Companhia de Serviços Urbano de Natal. Coleta Especial 2015**. URBANA, 2015 Disponível em: Acessado em: 06 ago. 2016.

VANZIN, E. MARTINS, M. S., MACULAN, S. L. ROJAS, J. W. J., CAVALCANTI, J. **Análise da viabilidade econômica do uso do biogás em aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no Aterro Metropolitano de Santa Tecla na busca da sustentabilidade**. Publicado no 1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, Bento Gonçalves- Brasil, 29 a 31 de outubro de 2008.

VIEIRA, G.E.G.; CAMPOS, C.E.A.; TEIXEIRA, L.F.; COLEN, A.G.N. 2015. **Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão. Revista Liberato (Novo Hamburgo), 16, 101-220.**

XAVIER, L.L.; ROCHA, J. C. **Diagnóstico do resíduo da construção civil – Início do caminho para o uso potencial do entulho**. In:IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. CT206 - IBRACON. São Paulo - SP. 2001

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. 105 p. Disponível em: <http://ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/zanette\_luiz.pdf>. Acesso em: 12 maio 2019.