



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – DCET
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – BACHARELADO**

**ALEXSANDER RICARDINO MIRA
IGOR NAVAHA DA SILVA FURTADO**

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS
PROVENIENTE DO CENTRO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACAPÁ-AP**

MACAPÁ

2019

ALEXSANDER RICARDINO MIRA
IGOR NAVAH DA SILVA FURTADO

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS
PROVENIENTE DO CENTRO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACAPÁ-AP**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal do
Amapá como exigência parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Reinaldo
Cardoso Nery

MACAPÁ
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá
Elaborada por Orinete Costa Souza – CRB-11/920

Mira, Alexsander Ricardino.

Potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do centro de tratamento de resíduos de Macapá-AP / Alexsander Ricardino Mira, Igor Navah da Silva Furtado ; orientador, José Reinaldo Cardoso Nery. – Macapá, 2019.

101 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Geração de eletricidade - Biogás. 3. Resíduos sólidos urbanos. 4. Aterro sanitário. I. Furtado, Igor Navah da Silva. II. Nery, José Reinaldo Cardoso, orientador. III. Fundação Universidade Federal do Amapá. IV. Título.

333.79 M671
CDD: 22. ed.

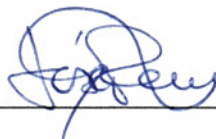
ALEXSANDER RICARDINO MIRA
IGOR NAVAHA DA SILVA FURTADO

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS
PROVENIENTE DO CENTRO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACAPÁ-AP**

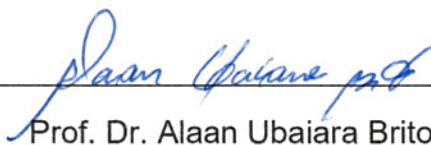
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Amapá
como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Reinaldo Cardoso Nery

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Reinaldo Cardoso Nery
Orientador



Prof. Dr. Alaam Ubaiara Brito
Membro



Prof. Dr. Helyelson Paredes Moura
Membro

Aprovado em: 07/05/2019

Dedicamos este trabalho a Deus por ser o guia dos nossos caminhos, por ser o sustento nos momentos de dificuldade e angústia, por nos dar a força necessária quando já se pensávamos não ter mais forças, pela sua essencialidade em nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Eu Igor Navah da Silva Furtado, agradeço a Deus pela conquista da conclusão da graduação, agradeço aos meus familiares por todo o apoio ao longo do curso em especial ao meu pai João Célio das Neves Furtado, minha mãe Maria Nilma Oliveira da Silva Furtado e minha irmã Ana Júlia da Silva dos Santos. Agradeço aos amigos e colegas que sempre me apoiaram em minha trajetória dando força, sempre apresentando um conselho inspirador e revigorante, agradeço aos meus professores pelos conhecimentos transmitidos, estes foram fundamentais ao crescimento não apenas dos meus conhecimentos em relação a engenharia, mas também em relação a maturidade para lidar e exercer minha função em uma profissão tão nobre. Agradeço a todos aqueles que de alguma forma, seja ela mínima que fosse, me ajudaram a chegar até aqui, agradeço pelo simples bom dia e o simples boa noite dos desconhecidos que sempre nos fizeram sorrir.

Eu Alexsander Ricardino Mira, agradeço primeiramente a Deus por mais essa luta vencida, pois sem ele nada disso seria possível. Agradeço ao meu pai Sr. Pedro dos Reis Mira, minha mãe Sra. Deolires Maciel Ricardino e minha namorada Tainara da Silva Leal por todo o apoio, motivação e dedicação que investiram em mim ao longo destes 5 anos de graduação. Agradeço também aos amigos e colegas que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta grande fase de minha vida. Agradeço a todos os envolvidos no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amapá, professores e alunos, que todos os dias dedicavam seu tempo e completos esforços para me orientar e ajudar, cada um a sua maneira. A todos, o meu muito obrigado.

“Que os nossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”.

(Charles Chaplin)

RESUMO

As atividades humanas apresentam uma elevação no processo de produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), tornando-se um problema à administração pública e à sociedade. O tratamento adequado do RSU pode trazer de volta uma gama de energia que se encontra inerte na matéria orgânica desses resíduos, com isso este trabalho apresenta um estudo sobre o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do centro de tratamento de resíduos de Macapá-AP, realizando uma análise técnica e financeira a respeito da instalação de um projeto de geração de energia elétrica. Para estimar esse potencial de geração de energia elétrica foi realizado o levantamento de dados e características a respeito do Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de Macapá-AP, e com esses, foram realizadas as estimativas de produção de biogás pelo CTR através do LandGEM, com isso sendo estimado também o potencial de geração energia elétrica. Para verificação da viabilidade financeira realizou-se a análise dos custos de instalação e operação de uma unidade de geração de energia elétrica equivalente ao potencial de geração estimado. Contudo verificou-se que o melhor caso para geração de energia elétrica seria uma usina de 3MW instalada na célula de aterro sanitário com tempo de funcionamento de 17 anos com disponibilidade de 7920 horas por ano, gerando 23.760 MWh/ano, com um custo de geração de R\$229,56 por MWh viável economicamente que não considera as despesas indiretas a geração de energia, e um custo de R\$546,97 por MWh inviável economicamente que considera as despesas indiretas a geração de energia.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Geração de Energia. Biogás. Aterro.

ABSTRACT

Human activities show an increase in the process of production of urban solid waste (MSW), becoming a problem for public administration and society. The adequate treatment of the MSW can bring back a range of energy that is inert in the organic matter of these residues, with this work presents a study on the potential of electric energy generation from the biogas from the MSW of the controlled landfill / sanitary of Macapa-AP, conducting a technical and financial analysis regarding the installation of an electric power generation project. In order to estimate this potential for electric power generation, data and characteristics were collected regarding the controlled / sanitary landfill of Macapa-AP, and with these, estimates of biogas production were made through the landfill through LandGEM. Also estimated the potential of electric power generation. In order to verify financial viability, an analysis of the costs of installing and operating an electric power generation unit equivalent to the estimated generation potential was carried out. However, it was verified that the best case for electric power generation would be a 3MW plant installed in the landfill cell with an operating time of 17 years with availability of 7920 hours per year, generating 23,760 MWh / year, with a generation cost of R \$ 229.56 per economically viable MWh that does not consider the indirect costs of power generation, and a cost of R \$ 546.97 per MWh economically unviable that considers indirect costs to generate power.

Keywords: Urban Solid Waste. Power generation. Biogas, Landfill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do processo de formação dos gases de aterro	388
Figura 2 - Instalação de poços drenantes verticais em aterro finalizado	466
Figura 3 - Tubos de coleta de biogás I	488
Figura 4 - Tubos de coleta de biogás II	488
Figura 5 - Tubo de coleta de biogás do Aterro Bandeirantes I	499
Figura 6 - Tubo de coleta de biogás do Aterro Bandeirantes II	499
Figura 7 - Compressores para flare	50
Figura 8 - Flare enclausurado	511
Figura 9 - Grupo Motor Gerador	555
Figura 10 - Localização do CTR de Macapá.....	58
Figura 11 - Vista superior do CTR de Macapá.....	58
Figura 12 - Entrada do CTR de Macapá	599
Figura 13 - Primeira célula de aterro sanitário de Macapá.....	599
Figura 14 - Tratamento e disposição dos RSU no aterro sanitário de Macapá	60
Figura 15 - Lagoas de chorume do aterro sanitário de Macapá	60
Figura 16 - Área para tratamento de resíduos hospitalares CTR de Macapá	61
Figura 17 - Balança de pesagem dos caminhões no CTR de Macapá	62
Figura 18 - Aterro controlado de Macapá.....	62
Figura 19 - Drenos do aterro controlado de Macapá.....	633
Figura 20 - Dreno do aterro sanitário de Macapá.....	633
Figura 21 - Drenos de tubo de PEAD do aterro sanitário de Macapá	644
Figura 22 - Queimador de gás do aterro sanitário de Macapá	644
Figura 23 - Geração de metano por ano do aterro controlado de Macapá	70
Figura 24 - Geração de metano por hora do aterro controlado de Macapá	70
Figura 25 - Geração de metano por ano do aterro sanitário de Macapá.....	72
Figura 26 - Geração de metano por hora do aterro sanitário de Macapá.....	722
Figura 27 - Potência disponível em MW no aterro controlado de Macapá.....	766
Figura 28 - Energia disponível em MW no aterro controlado de Macapá.....	766
Figura 29 - Potência disponível em MW no aterro sanitário de Macapá	788
Figura 30 - Energia disponível em MW no aterro sanitário de Macapá.....	788

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais gases do efeito estufa.....	311
Tabela 2 - Composição comum dos gases de aterro sanitário.....	399
Tabela 3 - Valores de k em função da precipitação e disponibilidade de nutrientes	422
Tabela 4 - Valores propostos para k em função da precipitação.....	433
Tabela 5 - Variações de k e L_0	433
Tabela 6 - Valores de L_0 sugeridos em função da degradabilidade	433
Tabela 7 - Valores de FCMi recomendados para aterros não controlados	444
Tabela 8 - Valores de porcentagem de CODi em massa	444
Tabela 9 - Quantitativo de RSU no aterro controlado de Macapá	655
Tabela 10 - Gravimetria dos RSU no aterro de Macapá	666
Tabela 11 - Estimativa de deposição de RSU no aterro de Macapá.....	677
Tabela 12 - Vazão de metano do aterro controlado de Macapá.....	699
Tabela 13 - Vazão de metano do aterro sanitário de Macapá.....	71
Tabela 14 - Propriedades físicas e químicas do metano.....	733
Tabela 15 - Potência e energia disponível no aterro controlado de Macapá.....	755
Tabela 16 - Potência e energia disponível no aterro sanitário de Macapá.....	777
Tabela 17 - Unidades de geração por intervalo em anos.....	799
Tabela 18 - Custos indiretos a geração de energia elétrica	833
Tabela 19 - Custo da Energia Gerada sem Considerar Custos Indiretas.....	877
Tabela 20 - Custo da Energia Gerada Considerando Custos Indiretas.....	877
Tabela 21 - Comparativo de Custos de Geração de Energia	888
Tabela 22 - Valor Médio de Venda do MWh por Fonte em 2017	888

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACAM	Associação dos Catadores de Macapá
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANVISA	Agencia Nacional de Vigilância Sanitária
BEM	Balanco Energético Nacional
CEG	Companhia Estadual do Gás do Rio de Janeiro
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMTC	Companhia Municipal de Transportes Coletivos
COD	Carbono Orgânico Degradável
COMGÁS	Companhia de Gás do Município de São Paulo
COMLURB	Companhia Municipal de Limpeza Urbana
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTC	Control Technology Center
CTR	Centro de Tratamento de Resíduos
DBO	Demanda bioquímica
DQO	Demanda química de oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança no Clima
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica

LandGEM	Landfill Gas Emissions Model
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SEMUR	Secretaria Municipal de Manutenção Urbanística
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis
VPL	Valor Presente Líquido
VPLa	Valor Presente Líquido Anualizado

LISTA DE SÍMBOLOS

CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
SO ₂	Dióxido de enxofre
N ₂	Dióxido nitroso
β	Coefficiente de eficiência de coleta dos gases
Nm ³	Normal metro cúbico
pH	Potencial hidrogeniônico
H ₂ S	Ácido sulfídrico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 APRESENTAÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO	18
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	20
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 OS RESÍDUOS SÓLIDOS	22
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS: DEFINIÇÕES	22
2.2 TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	26
2.2.1 Reciclagem	26
2.2.2 Compostagem	27
2.2.3 Incineração	28
2.2.4 Aterro sanitário	29
2.3 OS RESÍDUOS SÓLIDOS: EFEITO ESTUFA	30
3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DE ATERRO SANITÁRIO	33
3.1 TECNOLOGIA PARA CONVERSÃO DE ENERGIA	33
3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA: ATERRO SANITÁRIO	35
3.3 FORMAÇÃO DOS GASES NOS ATERROS SANITÁRIOS	36
3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA QUANTIFICAÇÃO DE METANO GERADO EM ATERROS	40
3.4.1 Modelo School Canyon	40
3.4.2 Modelo LandGEM	41
3.5 TECNOLOGIA DE RECUPERAÇÃO DE METANO DE ATERROS SANITÁRIOS	45
3.5.1 Sistema de coleta	45
3.5.1.1 Poços de coleta para drenagem do gás do aterro	45

3.5.1.2 Tubos de coleta para captação e condução do gás do aterro	47
3.5.1.3 Compressor ou sistema de compressão	49
3.5.1.4 Flare ou Queimador.....	50
3.5.2 Sistema de tratamento e purificação	51
3.5.3 Sistema com equipamentos de geração de energia elétrica	53
3.5.3.1 Motores de combustão interna	54
3.5.3.2 Turbinas a gás.....	55
3.5.3.3 Microturbinas	56
4 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO CENTRO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACAPÁ	57
4.1 CENTRO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACAPÁ.....	57
4.2 QUANTITATIVO E ANÁLISE GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS.....	65
4.3 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS	68
4.4 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	73
4.4.1 Potencial de geração de energia elétrica da célula de aterro controlado	74
4.4.2 Potencial de geração de energia elétrica da célula de aterro sanitário.....	77
5 VIABILIDADE ECONÔMICA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS DO CENTRO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS MACAPÁ.....	80
5.1 DESPESA INICIAL: IMPLANTAÇÃO DA USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, SISTEMA DE CAPTAÇÃO E SISTEMA DE TRATAMENTO.....	81
5.2 DESPESAS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DA USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	82
5.3 DESPESAS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DO SISTEMA DE CAPTAÇÃO E GERENCIAMENTO DO BIOGÁS	82
5.4 DESPESAS COM COMPRA DE BIOGÁS	82
5.5 DESPESAS INDIRETAS A GERAÇÃO DE ENERGIA	83
5.6 VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL).....	83
5.7 VALOR PRESENTE LÍQUIDO ANUALIZADO (VPLA).....	85
5.8 CÁLCULO DO CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA.....	85
5.9 RESULTADOS DOS CUSTOS	86
6 CONCLUSÃO	90
BIBLIOGRAFIA.....	93

APÊNDICE A - Dados de entrada do LandGEM e layout do software para célula de aterro controlado de Macapá-AP	99
APÊNDICE B - Dados de entrada do LandGEM e layout do software para a célula de aterro sanitário de Macapá-AP	100
APÊNDICE C - Fluxo de caixa do projeto de geração de energia elétrica no aterro sanitário de Macapá-AP	101

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Atualmente o processo de urbanização tem se tornado cada vez mais acelerado, e juntamente com esse processo cresce também o consumo de materiais e produtos duráveis e descartáveis, esse aumento no consumo ocasiona o aumento da diversificação e também do volume dos resíduos sólidos gerados pela população como um todo. Com isso, a questão do gerenciamento dos resíduos tornou-se uma atividade que precisa ser eficiente economicamente, segura na visão ambiental e que esteja dentro dos parâmetros de adequação às questões sociais.

Desta forma, estes resíduos, sendo gerenciados de maneira correta e adequada, podem vir a ser aproveitados no que se refere à geração de energia elétrica. No mundo, diversos países utilizam os resíduos sólidos como um combustível para aproveitamento em sistemas como de aquecimento, geração de energia elétrica, entre outros processos que tiram proveito da grande gama de energia proveniente da matéria principalmente orgânica presente nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

Pode-se considerar outros benefícios muito importantes com relação a recuperação de energia dos resíduos, com:

- (a) geração de emprego seja com mão de obra qualificada ou não, as diversas etapas do processo de recuperação de energia a partir dos resíduos sólidos precisam de mão de obra;
- (b) socioeconômico, tendo em vista que a corrida por informação a respeito desse processo de recuperação de energia tende a produzir equipamentos com tecnologia nacional;
- (c) benefícios ambientais, pois o gerenciamento adequado ajuda na diminuição dos gases do efeito estufa citando o gás metano como o principal agravante;
- (d) benefícios na saúde, uma vez que a adequação do gerenciamento diminui o problema dos vetores de doenças que o lixo tratado de forma incorreta pode prover;
- (e) benefícios estratégicos, tendo em vista que a geração de energia a partir RSU se apresenta como fonte de energia alternativa.

O desenvolvimento sustentável com a utilização do biogás para geração de energia elétrica ajuda não apenas a mitigar os impactos ambientais, mas contribui também para sustentabilidade da matriz de geração de energia elétrica. A utilização desta forma de geração de energia resulta principalmente na mitigação da emissão dos gases de efeito estufa.

Este trabalho faz um levantamento bibliográfico sobre tecnologias disponíveis para aproveitamento energético a partir dos resíduos sólidos urbanos considerando a geração de energia elétrica com o gás proveniente de aterro sanitário. E tem como proposta apresentar dados sobre o potencial de geração de energia elétrica a partir do RSU, considerando as características e parâmetros do aterro sanitário de Macapá-AP.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho teve seus objetivos subdivididos em objetivo geral e objetivos específicos, conforme segue abaixo.

1.2.1 Objetivo geral

Estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do CTR de Macapá-AP.

1.2.2 Objetivos específicos

- (a) Realizar o levantamento da situação dos resíduos sólidos urbanos em Macapá-AP, levando em consideração dados sobre disposição, composição, as características e parâmetros do aterro controlado/sanitário de Macapá-AP;
- (b) Estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir dos RSU, realizando análise técnica, levando em consideração o uso de gás de aterro sanitário;
- (c) Realizar previsão econômica dos custos de implantação dos equipamentos de geração, bem como dos custos de operação e manutenção para o constante fornecimento de energia.

1.3 JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO

A maioria das fontes tradicionais de energia causam impactos ambientais e sociais, outro processo que causa esses impactos é o consumo da população em geral considerando a alta produção de resíduos sólidos. Esse contexto tem feito com que estudos sejam desenvolvidos com a intenção de apresentar fontes de geração de energia alternativa, para o caso dos resíduos sólidos a recuperação do biogás de aterro sanitário como combustível para geração de energia se apresenta como uma boa opção de fonte de energia alternativa.

No ano de 2015 levantou-se que 41,2% da Matriz Energética Brasileira eram renováveis, dados levantados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2016), isso coloca o Brasil em uma boa situação tendo em vista que a média mundial ficou em 14%. Porém, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2017), 60,74% da energia elétrica gerada no país tem sua fonte nas grandes usinas hidroelétricas, e estas têm impactos sociais e ambientais que são expressivos, por exemplo, deslocamento populacional devido ao alagamento de áreas extensas, perda de biodiversidade local, além de emissão de gases do efeito estufa devido ao fato de existir grande quantidade de biomassa presente na área do reservatório, ainda que realizada uma limpeza adequada há uma grande quantidade de matéria orgânica enterrada nessa área.

Considerando o estado do Amapá, segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2016), 85% da geração de energia elétrica é proveniente de hidroelétricas, e 15% gerada através da queima de óleo diesel e/ou outros combustíveis.

Criado pelo governo brasileiro, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), em abril de 2002, tem por objetivo incentivar a utilização de fontes alternativas de energia, com isso então o cenário das fontes alternativas de energia passou a ser observado com uma visão promissora de investimento no âmbito da geração de energia.

A geração de energia a partir dos RSU apresenta-se como uma alternativa possível dentro do contexto as fontes de energias alternativas, e traz com ela uma característica muito expressiva, o desenvolvimento sustentável, pois o desenvolvimento de projetos sanitários mais adequados como, por exemplo, a implantação de aterros sanitários, triagem dos resíduos, coleta seletiva, incineradores

entre outras atividades que causam um impacto positivo no que diz respeito à questão ambiental e social, com uma gestão adequada, incentivam a geração de energia a partir dos RSU, haja vista que esses processos passam a ser atrativos para iniciativa privada em diversos setores, desde o tratamento do resíduo até conseqüentemente a geração de energia.

Outras vantagens da geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos urbanos está ligada à geração de emprego e renda, intercambio de tecnologia, desenvolvimento de tecnologia, substituição de parcela dos combustíveis fósseis e uma ótima alternativa para a melhora do contexto da emissão dos gases do efeito estufa.

A geração de energia elétrica a partir dos RSU, traz de volta uma gama de energia inerte na matéria orgânica presente nesses resíduos, o tratamento adequado gera energia elétrica a partir de uma fonte que só tende a crescer devido ao crescimento do consumo populacional, além de processar o gás CH₄ (metano) que é 21 vezes pior que o CO₂ (dióxido de carbono) com relação aos impactos sobre as mudanças climáticas.

A minuta do projeto de lei de 2016 estabelece a política municipal de saneamento básico do município de Macapá-AP, ela apresenta princípios para o desenvolvimento desse plano, entre eles a eficiência e sustentabilidade econômica, eficácia das ações, desenvolvimento urbano e regional de proteção ambiental, de promoção da saúde, de atividades voltadas para melhoria da qualidade de vida, onde o saneamento básico é fator determinante.

Alguns dos objetivos apresentados pela minuta são contribuir para o desenvolvimento e a redução das desigualdades locais, geração de emprego e renda. Outro objetivo é promover alternativas de gestão que viabilizem atividade autossustentável econômica e financeira relacionadas as atividades de saneamento básico.

O trabalho se justifica em diversos pontos em relação ao plano de saneamento básico do município de Macapá, pois a recuperação do metano para geração de energia a partir do biogás proveniente do CTR de Macapá se trata de uma atividade que gera emprego, renda, auto sustentabilidade econômica e financeira, promoção a saúde, proteção ambiental.

Esse trabalho se justifica por fornecer o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás do CTR de Macapá-AP, com a estimativa de viabilidade econômica

referente a célula de aterro sanitário de Macapá-AP, exatamente com a intenção de que os dados aqui levantados sirvam de base para estudos futuros de viabilidade e também para uma possível implantação de um projeto real de geração de energia.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Com o intuito de atingir os seus objetivos, este trabalho se baseia em dois procedimentos metodológicos que são: a metodologia da pesquisa bibliográfica e o método do estudo de caso. De acordo com Martins e Pinto (2001, p. 410) a pesquisa bibliográfica vem explicar um problema e apresentar soluções a partir de referências teóricas publicadas em documentos e contribuições científicas existentes. O método do estudo de caso, de acordo com Martins e Lintz (2000, p. 36), se refere a uma técnica de pesquisa cujo objetivo é o estudo de uma unidade que se analisa rigorosamente dentro do contexto de uma situação real.

Desta forma, como primeiro passo foi realizado o levantamento dos dados sobre a situação dos resíduos em Macapá. Posteriormente, estimou-se o potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos levando em consideração a digestão anaeróbia em aterros sanitários. Para fazer o cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir da digestão anaeróbia, ou seja, a partir do biogás proveniente do CTR de Macapá-AP foi utilizado a ferramenta de modelagem LandGEM.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo, que é referente à introdução, propôs apresentar uma visão da relação entre resíduos sólidos e geração de energia a partir do gás proveniente do próprio resíduo. Neste capítulo também estão presentes os objetivos do trabalho bem como as justificativas e também as motivações que deram ênfase ao desenvolvimento do tema proposto. Ainda no capítulo primeiro se faz presente a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho e por último a descrição da estrutura do próprio trabalho.

O segundo capítulo trata-se de revisão bibliográfica, sendo assim este aborda conceitos utilizados no trabalho, como por exemplo, definições sobre resíduos,

artifícios e ferramentas para a gestão dos resíduos e as questões de políticas públicas para saneamento.

Já o terceiro capítulo que também se trata de uma revisão bibliográfica, abrange conceitos de conversão geração de energia elétrica, apresenta as tecnologias disponíveis para geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos direcionado a digestão anaeróbia em aterros sanitários (aproveitamento do gás proveniente do aterro). Este também coloca em exposição os impactos socioambientais do referido tema. Sendo assim esses dois capítulos são bases para o desenvolvimento dos demais capítulos.

O quarto capítulo faz uma análise da situação atual dos resíduos sólidos em Macapá. Nesse capítulo é feito o levantamento e processamento dos dados e parâmetros referentes ao CTR de Macapá para geração de energia a partir do gás proveniente dos RSU de Macapá, com esse levantamento é estimado o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás do CTR de Macapá, com enfoque na digestão anaeróbia.

O capítulo cinco faz uma análise econômica para a possível implantação de um projeto de geração de energia a partir do RSU em Macapá, neste se trás o custo de geração de energia para o momento presente (VPL) e posteriormente é trabalhado o custo de geração de energia anualizado (VPLa) para assim obter o custo de geração de energia elétrica por MWh gerado.

O capítulo seis apresenta as conclusões do trabalho, expondo pontos importantes mencionados durante todo seu desenvolvimento, além de recomendações para possível desenvolvimento de estudos futuros com o intuito de produção de novos trabalhos. Este dá ênfase a exposição da relação gás de aterro sanitário e geração de energia elétrica.

2 OS RESÍDUOS SÓLIDOS

Nesse capítulo são abordados conceitos básicos referentes a resíduos, expondo as principais atividades de disposição e definições no que diz respeito a artifícios e ferramentas de gestão e gerenciamento. Nele também se faz presente a questão da problemática dos resíduos considerando os aspectos de saúde pública, juntamente as questões ambientais locais e globais, com uma visão sucinta no quesito global, mas que nos dá parâmetros demonstrativos. Este também mescla as atividades ligadas à energia, meio ambiente e resíduos sólidos. O mesmo expõe diretrizes referente a gerenciamento de resíduos, que concede embasamento para Macapá-AP. O embasamento teórico presente nesse capítulo e no capítulo posterior tem por objetivo atribuir sustentáculo aos capítulos quatro e cinco, dando base aos resultados e discussões que serão desenvolvidos nos mesmos.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS: DEFINIÇÕES

Quando a vida útil de um material chega ao seu fim, este passa ser então um resíduo (NAZAROFF; ALVAREZ COHEN, 2001, p.10). O termo “resíduo sólido” é utilizado como sinônimo de “lixo” (MANCINI, 1999). De acordo com Bidone e Povinelli (BIDONE; PVINELLI,1999) os resíduos sólidos ou lixos apresentam uma vasta diversidade, são gerados pelas mais variadas atividades humanas e seus ambientes urbanos, estes representam uma massa de materiais acumulados que são considerados sem utilidade e descartados.

O conceito para “lixo” de acordo com o Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT, 2000), tem-se como definição de lixo com sendo correspondente a restos de atividades humanas, consideradas pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. Este se apresenta normalmente nos estados semissólido ou sólido, ou seja, conteúdo líquido é insuficiente para que este possa fluir naturalmente.

Outro conceito que tem origem na Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1997), afirma que resíduos sólidos urbanos (RSU), ou apenas “lixo”, é compreendido como todo e qualquer material sólido proveniente das atividades humanas diárias em sociedade, o qual o produtor ou dono considere este material como algo sem valor suficiente para que seja conservado.

No Brasil, a Associação brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece os critérios de tratamento os quais os resíduos sólidos devem seguir. Segundo a ABNT, através da norma NBR 10.004, a definição de resíduos sólidos é:

Resíduos sólidos: são aqueles resíduos no estado sólido ou semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nessa definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2004)

O documento de 1987 que posteriormente foi atualizado em 2004 (NBR 10.004) faz uma classificação em relação aos resíduos sólidos que se refere aos seus riscos em relação ao meio ambiente e saúde pública. Os resíduos sólidos são separados em três grupos, os quais são:

a) Resíduos Classe I – Perigosos

São aqueles que oferecem risco a saúde e ao meio ambiente e que são caracterizados pela sua propriedade, são elas, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

b) Resíduos Classe II A – Não perigosos e não inertes

São aqueles que não apresentam as características dos resíduos da Classe I, no entanto, esses apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (nesse caso acima dos padrões designados pela ABNT), que pode acarretar em interação com o meio ambiente, com isso havendo então, risco de poluição.

c) Classe II B – Não perigosos e inertes

São aqueles que não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações acima do padrão de potabilidade da água.

A classificação dos resíduos sólidos levando em consideração seus riscos iminentes ao meio ambiente é uma das diversas classificações onde estes podem ser divididos. Os resíduos sólidos podem ser classificados também levando em consideração se o mesmo é seco ou molhado, o que está relacionado à natureza

física, matéria inorgânica ou orgânica que se remete a composição química do resíduo, como também com relação a sua fonte geradora, ou seja, sua origem.

Dentre as classificações dos resíduos, a classificação que se refere a origem do resíduo, é a mais apropriada quando se fala em gerenciamento de resíduos sólidos. Esta classificação divide os resíduos sólidos como sendo de origem: radioativa, construção civil, agricultura, indústria, terminais rodoviários e ferroviários, portos e aeroportos, serviços de saúde e hospitalares, estabelecimentos públicos, comercial, residencial.

Os resíduos da construção civil têm em sua composição materiais provenientes de demolição, também, por exemplo, restos de obra, material proveniente de escavações em seus mais variados tipos de solo, entre outros tipos de materiais. Os restos das obras, ou seja, entulho é geralmente um material que é suscetível ao reaproveitamento ou reutilização, no entanto, junto com ele pode ser encontrado uma grande quantidade de materiais que podem apresentar características perigosas de toxicidade, como por exemplo, sobras de tintas, solventes, metais diversos, entre outros materiais. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) através da Resolução 307/2002, estabelece as diretrizes para os resíduos provenientes da construção civil (CONAMA, 2002).

Os resíduos de origem agrícola são aqueles que têm origem nas atividades do campo, por exemplo, agricultura e pecuária. Entre os materiais que vem desse meio, pode-se citar embalagem de defensivos agrícolas e fertilizantes, além de restos de colheita e esterco animal. Interessante citar que as embalagens de produtos agroquímicos, que em sua maioria são altamente tóxicos, têm sido tratadas de maneira mais incisiva com uma legislação mais específica referente aos cuidados a destinação final da mesma.

Resíduos como materiais de higiene, restos de alimentos e asseio pessoal, são resíduos que constituem o material proveniente de portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários, nesse caso esses materiais podem estar sujeitos a doenças provenientes de outras cidades, estados e países.

Resíduos industriais tem sua origem nas mais variadas atividades ligadas à indústria, por exemplo, metalúrgica, petroquímica, alimentícia, química, entre outras.

Os Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) que são os resíduos hospitalares têm sua origem em hospitais, laboratórios, clínicas, postos de saúde, ou seja, os mais

variados serviços ligados à saúde dão origem aos RSS, estes são compostos por agulhas, seringas, gases, bandagens, algodões, órgãos e tecidos removidos, etc. Há também os resíduos assépticos destes locais, por exemplo, papel, restos de comida, também os mais variados tipos de resíduos de limpeza. Os RSS possuem uma complexidade muito grande, com isso o seu manuseio é normatizado e regulamentado pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), Resolução 306/04 (ANVISA, 2004), pela ABNT, NBR 12.808 (ABNT, 1993), e pelo CONAMA através da resolução 358/05 (CONAMA, 2005). Esses documentos tratam esses resíduos sólidos em seu todo, desde geração, acondicionamento, transporte, tratamento, até chegar a sua disposição final.

Os resíduos de estabelecimentos públicos são referentes a resíduos provenientes dos serviços de limpeza pública urbana, tais como resíduos da varrição de ruas, limpeza de praias, canais, córregos e terrenos, restos de árvores que passaram pelo processo de poda, limpeza de galerias, corpos de animais mortos.

Resíduos comerciais tem sua origem nos mais variados estabelecimentos comerciais, por exemplo, supermercados, lojas, restaurantes, bares, panificadora, lanchonetes etc. Em sua maioria, esses resíduos são compostos de grandes quantidades de papel e plástico.

Resíduos domiciliares tem sua origem nas atividades das residências, têm em sua constituição restos de alimentos, produtos como papel, jornais e revistas, diversos tipos de embalagens, garrafas, etc. também materiais que apresentam características de toxicidade, por exemplo, baterias, medicamentos vencidos, entre outros.

Os resíduos sólidos urbanos são aqueles referentes a domicílios, locais públicos, comércio, agricultura. Sendo assim estes apresentam uma grande variedade, são representados por madeiras, papéis, plásticos, borrachas, vidros, metais, restos de alimentos, podas de árvores, aparelhos eletrônicos, lâmpadas, baterias e pilhas, etc. Definidos pela NBR 8419 (ABNT, 1992) esses resíduos são considerados como gerados em aglomerados urbanos. Excluindo os RSS, industriais perigosos e de portos e aeroportos.

Segundo Resolução do CONAMA 308/2002, RSU “são provenientes de residências ou qualquer outra atividade que gere resíduos com características domiciliares, bem como resíduos de limpeza pública urbana” (CONAMA, 2002).

Segundo Artigo 6º da Lei nº 1.445/2007 “o lixo originário das atividades comerciais, industriais e de serviços, cuja responsabilidade pelo manejo não seja atribuída ao gerador, pode, por decisão do poder público, ser considerado resíduo sólido urbano” (BRASIL, 2007).

2.2 TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os resíduos sólidos necessitam de gerenciamento adequado, sendo assim no momento em que estes passam a ser gerenciados de maneira contrária estes podem proporcionar riscos à comunidade, e no mesmo intervalo apresentar problema de saúde pública, problemas relacionados à degradação do meio ambiente, isso sem deixar de mencionar os aspectos estéticos, econômicos, sociais e de administração.

O volume dos resíduos sólidos urbanos gerados, assim como as possibilidades de reaproveitamento dos materiais, principalmente do ponto de vista energético, não gera preocupação e nem visibilidade para empreendimentos, tendo em vista que são poucas as iniciativas dos poderes públicos que sejam voltadas ao processo de conscientização da comunidade.

Nos diversos processos produtivos o desperdício significa prejuízo ao poder público e para o cidadão, com a redução do desperdício é consequência deste a diminuição dos custos de produção e aquisição, sem deixar de mencionar que a redução do desperdício é fator importantíssimo no processo de preservação dos recursos naturais.

Em relação as formas de tratamento e disposições finais do RSU, existem diversos métodos dos quais podem ocorrer esse tratamento, porém, os mais comuns que estão dentro dos padrões aceitáveis sanitariamente e ecologicamente são: reciclagem, compostagem, incineração e aterro sanitário.

2.2.1 Reciclagem

A reciclagem tem como característica reduzir a quantidade de resíduos, recuperar materiais e reintroduzi-los nos processos de produção, isso acarreta em economia de matéria prima e energia, redução na degradação ambiental, além de influenciar as pessoas a serem mais conservacionistas. Todos esses aspectos citados

referentes à reciclagem fazem com que a mesma seja considerada uma entre as soluções mais viáveis ecologicamente no que se refere aos problemas dos RSU.

Lajolo (2003) define reciclagem como um conjunto de operações as quais estão interligadas realizadas por diferentes agentes econômicos com o objetivo de reintroduzir os materiais presentes nos resíduos sólidos urbanos gerados pela atividade do homem nos processos produtivos. Os materiais que passam por essas operações (materiais recicláveis), passam a fazer parte de insumos que servirão para produção de novos produtos.

Há diversos trabalhos que observam a reciclagem como uma forma em que a matéria-prima é reintroduzida no processo produtivo, com isso, apresenta-se redução significativa no gasto de energia na produção industrial, dentre os trabalhos está o de Cunha (2002); Calderoni (2003); e Meldonian (1998). Porém é necessário observar que a reutilização de material presente no RSU deve passar por um processo de separação, podendo ocorrer de forma mecânica ou manual, e também o mesmo deve passar por um pré-processamento que tenha em sua composição a lavagem, a descontaminação e o acondicionamento desse material. Dessa forma, a reciclagem tem seu início na separação dos materiais recicláveis, e tem seu término com a reciclagem e o retorno de um novo produto ao mercado.

Segundo Lajolo (2003) a cadeia de reciclagem se divide em cinco etapas. A primeira etapa é referente à separação dos resíduos em suas fontes geradoras. A segunda etapa consiste na coleta seletiva dos resíduos que já foram separados. A terceira etapa é quando o material coletado é encaminhado a triagem, nesse momento ocorre a separação por tipo, a classificação e a prensagem. A quarta etapa é onde o material pode passar por algum tipo de beneficiamento. Por fim a quinta etapa é o momento em que o material passa a fazer parte novamente da cadeia produtiva industrial.

2.2.2 Compostagem

Um conceito bem completo de compostagem define esse método como uma decomposição controlada, exotérmica e bio-oxidativa de materiais de origem orgânica, realizada por micro-organismos, em um ambiente úmido, aquecido e aeróbico, desse modo tendo como resultado a produção de dióxido de carbono, água, minerais e matéria orgânica estabilizada (LOPEZ-REAL, 1990).

Para ser realizado o processo de compostagem, materiais orgânicos (restos de alimentos, jardinagens, podas) que tem como fonte geradora o lixo doméstico urbano, são separados dos materiais inertes, a exemplo do vidro, alumínio e plástico, posteriormente são levados a pátios adequados de compostagem, onde sofrem o processo de degradação controlada e assim finalizar com a produção do composto.

No processo de compostagem estão presentes diversos fatores que influenciam na decomposição da matéria orgânica ali presente, na maturação do mesmo e também no resultado final do composto. Desse ponto observa-se a necessidade de os diferentes materiais presentes nos resíduos sólidos urbanos serem separados em materiais recicláveis e em matéria orgânica. Assim, observa-se que a compostagem tem sua dependência na coleta seletiva, e com isso, o composto só terá uma boa qualidade, se somente se o mesmo for livre de impurezas e metais.

2.2.3 Incineração

Sobre incineração, em seu trabalho, Sogabe (1999) descreve que a utilização do fogo para purificação é uma pratica antiga. Uma citação do autor diz que na idade média se utilizava “o vagão de fogo”, que foi o primeiro incinerador móvel, que transitava pelas ruas e os moradores jogavam seus resíduos e rejeitos dentro da fogueira móvel.

Segundo Rocca (1993), a incineração é um processo de tratamento de resíduos, que os torna menos volumosos, menos tóxicos ou atóxicos, tratamento realizado mediante oxidação térmica.

Lima (1991) define incineração como o processo de diminuição do volume e do peso do resíduo sólido através de uma combustão controlada realizada em altas temperaturas que giram torno de 871°C a 1204°C. Apresenta-se nesse processo vários resíduos remanescentes, por exemplo, gases como CO₂, SO₂, N₂, gases inertes presentes no ar e no próprio resíduo e também oxigênio do ar em excesso, água, cinzas, entre outros como resíduo silicoso proveniente de fusão de certos materiais normalmente ferrosos e inertes, por exemplo, vidro e pedra.

Atualmente, tem-se disponíveis várias tecnologias para a incineração de resíduos, estas tecnologias são empregadas levando em consideração o tipo e a quantidade do material a ser operado. É importante observar que, se tratam de unidades complexas de tratamento com alto grau de automatização, exigindo assim

uma mão-de-obra especializada, tipo de tratamento que requer alto investimento, que podem ser ainda maiores se levamos em consideração os outros processos de tratamento.

Por outro lado, os resíduos que são provenientes dessa forma de tratamento têm seu volume reduzido em uma larga escala. Além disso existe a possibilidade de aproveitamento energético, com a geração de vapor para aquecimento ou geração de energia elétrica.

2.2.4 Aterro sanitário

O aterro sanitário é um processo de tratamento de resíduos sólidos que visa a disposição destes no solo, sendo que este tipo de tratamento tem fundamentação em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, que tem por observação também a proteção do meio ambiente e da saúde pública. Quando dispostos em aterros sanitários, os resíduos sólidos são tratados de forma a serem compactados e cobertos com terra em células feitas lado a lado, formando assim as camadas de resíduos sobre o solo. Para o tratamento e coleta dos líquidos percolados gerados são empregados princípios da engenharia (D' ALMEIDA & VILHENA, 2000).

O primeiro passo antes de se projetar um aterro sanitário é a realização de um estudo geológico e topográfico com a finalidade de selecionar e definir a área, além de verificar o tipo de solo presente. Outro fator importante é fazer a impermeabilização do solo, com a finalidade de que os líquidos percolados gerados não infiltrem no solo, estes líquidos devem ser captados por meio de drenos horizontais para posterior tratamento, devem ser instalados também os drenos verticais que tem a finalidade de liberar e canalizar os gases que são formados na decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos (D' ALMEIDA & VILHENA, 2000).

Segundo Lima (1991), a utilização da metodologia de aterrar os resíduos sólidos como forma de tratamento não é uma atividade recente, os antigos já realizavam esse tipo de atividade. Os nabateus, na Mesopotâmia, 2.500 a.C., enterravam os seus resíduos de origem domiciliar e agrícola em trincheiras que eram escavadas no solo. Tempos depois as trincheiras eram abertas e a matéria orgânica que ali se decompôs, era removida e reaproveitada como fertilizante orgânico na plantação e produção de cereais.

Deve-se entender que existe diferença entre aterro sanitário, que já foi descrito, aterro controlado e lixão. A forma de disposição de resíduos sólidos chamada de aterro controlado tem por objetivo minimizar os impactos ambientais. Ao final de cada dia cobre-se o lixo com uma camada de aterro para assim confinar os resíduos sólidos depositados, utiliza-se algum método de engenharia para captação e tratamento do percolado. Porém esse tipo de tratamento não dispõe de impermeabilização da base.

Os lixões ou vazadouros são caracterizados por ser uma área onde ocorre a simples descarga dos resíduos sólidos urbanos. Este tipo de tratamento por não apresentar um cuidado adequado acarreta em vários problemas de saúde a população vizinha, este prolifera vetores de transmissão de doenças. Outros problemas é que estes exalam maus odores, além de contaminar o solo, contaminam também águas superficiais e subterrâneas através dos líquidos percolados gerados no local que não passam por processo de coleta e muito menos recebem tratamento. Outro problema é que os lixões não têm controle quanto ao tipo de resíduo que ali é depositado, a exemplo pode-se encontrar nesses locais desde resíduos provenientes da indústria como também material proveniente dos serviços de saúde. A também o problema social, haja vista que geralmente existem catadores que moram no local e que sobrevivem com a venda de materiais reciclados que são coletados no lixão.

Esse tipo de tratamento será discutido mais a frente nesse trabalho, tendo em vista que esse é tipo de tratamento presente no aterro sanitário de Macapá e que terá seu potencial de geração de energia elétrica estimado.

2.3 OS RESÍDUOS SÓLIDOS: EFEITO ESTUFA

A ocorrência da decomposição dos resíduos sólidos na ausência de oxigênio é chamada de decomposição anaeróbia. Esse processo acarreta na origem de gases que em sua maioria são o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), dentre outros gases, porém em uma quantidade bem menor se comparado com esses dois. O processo de geração desses gases é observado em aterros onde os resíduos sólidos são diariamente depositados e cobertos com camada de matéria inerte. No entanto, observa-se também esse processo em lixões, pois as camadas mais inferiores de resíduo também estão em ambiente com ausência de oxigênio. A diferença é que os aterros são dotados de drenos que tem a finalidade de facilitar a saída dos gases, com isso diminuindo os riscos de explosões. No final dos drenos são utilizados

queimadores que tem por finalidade executar a queima dos gases drenados para posteriormente serem emitidos a atmosfera.

Vale observar que os principais gases do efeito estufa, estão presentes nos gases que tem origem nos aterros, entre eles o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) em concentrações que giram em torno de 40% a 60% respectivamente. Porém observa-se que esses gases podem ser processados e tratados com a finalidade de aproveitamento para geração de energia elétrica.

O gás metano proveniente de aterro sanitário precisa passar por controle adequado, dentre eles os sistemas de coleta e aproveitamento, bem como a simples queima do próprio gás metano, caso contrário se este gás não passar por algum desses processos, acabará agravando ainda mais o problema do efeito estufa. Sendo assim o problema desse gás não se relaciona apenas com a região em que está localizado o aterro sanitário, mas também tem relação com problemas em escala global.

Os dados presentes na Tabela 1 a seguir ilustram os principais gases do efeito estufa com seus respectivos potenciais de aquecimento global, nessa tabela deve-se ter uma observação especial quanto ao metano (CH₄) que possui um potencial de aquecimento global de 21 vezes o potencial de aquecimento global do dióxido de carbono (CO₂). Com isso pode se concluir que na proporção 1 para 1 desses dois gases, o metano tem uma contribuição 21 vezes maior que o dióxido de carbono para o efeito estufa.

Tabela 1 - Principais gases do efeito estufa.

Espécies (GEE)	Fórmula química	Tempo de vida (anos)	Potencial de aquecimento global		
			20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono	CO ₂	Variável	1	1	1
Metano	CH ₄	12 ± 3	56	21	6,5
Óxido Nitroso	N ₂ O	120	280	310	170
Ozônio	O ₃	0,1 - 0,3	n.d.	n.d.	n.d.
CFCs	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Fonte: Painel Intergovernamental sobre Mudança no Clima – IPCC (Adaptada).

Os gases gerados por aterros ou lixões quando não controlados de maneira adequada acarretam no agravamento do efeito estufa, porém geram também problemas e riscos ao ambiente local. Os gases podem vir a se deslocar em direção lateral afetando áreas próximas, e um problema relacionado a esse processo é o

prejuízo à saúde humana e também a vegetação, pois, ocorre com esse processo a formação de ozônio de baixa altitude, ou por causa da simples exposição a alguns componentes presentes nesses gases. Dentre os problemas oriundos desse processo pode-se citar o câncer e outras doenças que afetam órgãos e sistema nervoso central, que são resultantes da emissão desses gases.

Considerando que a ocorrência de altas concentrações de gás metano no gás liberado por aterros, essa alta concentração acarreta no risco de incêndio e explosões em locais próximos. Outro problema da emissão descontrolada desses gases é a presença de odores desagradáveis, que podem estimular a ocorrência de doenças, e também a desvalorização de terrenos adjacentes a aterro.

3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DE ATERRO SANITÁRIO

Este capítulo apresenta principalmente tecnologias sobre geração de energia a partir de RSU através do gás proveniente de aterro sanitário, mostrando todo o seu contexto de maneira detalhada.

3.1 TECNOLOGIA PARA CONVERSÃO DE ENERGIA

Existem diversas formas que podem ser empregadas para que se possa gerar energia através dos RSU. Entretanto deve-se considerar que a tecnologia a ser empregada para geração de energia elétrica vai depender do tipo de biomassa e ou forma de disposição dos resíduos sólidos.

No que se refere aos processos de conversão de energia, este tem suas tecnologias separados em três tipos segundo (WILLIAMS et al. 2003) e (TURKENBURG ET AL. 2000):

- a) **CONVERSÃO TERMOQUÍMICA:** este apresenta uma produção elevada de calor durante o processamento. Suas tecnologias são convergentes tendo em vista que essas apresentam reações exotérmicas e endotérmicas em seus processos, o que acarreta na mudança da composição do resíduo. Dentre os produtos do processo estão os gases de síntese que são compostos de hidrogênio gasoso, monóxido e dióxido de carbono, outros produtos são sólidos inertes, vitrificados e também líquidos orgânicos. Podem ser citados como integrantes desse grupo os processos de incineração, gaseificação, pirólise, plasma e liquefação;
- b) **CONVERSÃO BIOQUÍMICA:** este corresponde à decomposição ou transformação dos resíduos através da ação de micro-organismos, e com isso, apresentando a produção de líquidos e ou gases. A digestão anaeróbia (sem a presença de oxigênio) juntamente com a fermentação faz parte desse grupo. A digestão anaeróbia, presente nos aterros sanitários ou em biodigestores, tem como característica a produção de um gás conhecido como biogás ou gás de aterro sanitário, esse gás tem em sua composição a predominância de dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). A fermentação, em seu processo, tem os açúcares presentes nos

resíduos transformados em álcool pela ação de micro-organismos (em sua maioria fungos e leveduras), que posteriormente são separados de seus compostos através de destilação.

- c) **CONVERSÃO FÍSICO-QUÍMICA:** este envolve a síntese física e química dos produtos, um bom exemplo é a transformação de óleos vegetais em biodiesel. Em sua maioria, as reações químicas ocorrem com o processo de transesterificação, que nesse processo usa catalizadores alcalinos, mentol ou etanol, ácidos ou enzimáticos.

Das rotas tecnológicas apresentadas acima, as mais utilizadas para conversão de RSU em energia são a digestão anaeróbia que está presente nos aterros sanitários, e a combustão que ocorrem com a incineração. Lembrando que este trabalho tem ênfase na geração de energia através do gás proveniente de aterro sanitário, com isso este tende a ter o maior foco.

Dentre os motivos para que esta tecnologia de aterro sanitário seja uma das opções mais utilizadas, é que esta vem se desenvolvendo há muito tempo, isso faz com que ela já se encontre em um estágio bastante desenvolvido e estável tecnicamente (FAAIJ, 2006). Outro motivo importante é que essa pode ser aplicada para resíduos orgânicos úmidos e homogêneos como também para resíduos heterogêneos que é uma característica dos RSU (FAAIJ, 2006). Essa rota também apresenta atividade técnica e financeira para a melhora da questão dos gases de efeito estufa.

Outro fator importante para que a opção de uso dos aterros sanitários seja um dos mais utilizados, é referente aos equipamentos que são utilizados na captura de gás metano apresentar custos mais baixos quando se compara o método de aterro sanitário com outros métodos de conversão, esse custo mais baixo favorece também a divulgação e propagação da prática desse método tecnológico.

No que diz respeito a opção de estudo pelo processo de digestão anaeróbia, essa se dá pelo fato da ocorrência do método de tratamento de RSU em Macapá. Outro fato é que se trata de uma tecnologia que já está bem desenvolvida e que apresenta uma acessibilidade bem mais propícia do ponto de vista financeiro. Como já foi observado, além do benefício da geração de energia, pode-se observar também o benefício da melhoria da situação sanitária não apenas em Macapá, que é a capital do estado, mas também servir de estopim para que esse processo se estenda aos

demais municípios, tendo em vista que esse processo viabiliza também a recuperação ambiental de antigos lixões.

3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA: ATERRO SANITÁRIO

Os aterros sanitários são a principal atividade realizada para destinação final dos RSU, tanto em Macapá quanto nos demais estados do Brasil. Dentre os processos que já foram apresentados, os resíduos orgânicos que são aterrados sob material inerte passam a ser decompostos por micro-organismos fora da presença de oxigênio, ou seja, decomposição anaeróbia, essa decomposição produz gases que podem ser aproveitados. Entre os principais componentes desses gases está o metano, este pode ser reaproveitado para geração de energia elétrica.

Levantando um pouco do contexto histórico da digestão anaeróbia, que é o mesmo processo que ocorre nos aterros sanitários, ainda que o gás metano já tivesse seu reconhecimento, apenas em 1776, Alessandro Volta (1745-1827), que era italiano, físico e químico observou a presença do metano no gás dos pântanos, observando também que este possuía propriedades combustíveis.

O químico inglês Humphrey Davy (1778-1829), ao realizar uma análise dos gases produzidos no processo de fermentação da palha umedecida dos estêbulos, verificou que no gás produzido havia a ocorrência de metano e dióxido de carbono. Outro estudo muito importante foi o de Louis Pasteur (1822-1895) em 1844, onde ele mostrou que o gás metano poderia ser produzido através do processo de fermentação de uma mistura de excrementos, palha de estabulo e água, ele também fez observação as características combustíveis do gás metano (CUNHA, 2002).

Em 1970 foram implantados os primeiros projetos que visavam o aproveitamento do gás metano de aterros, ocorrido nos Estados Unidos, o contexto desse processo de aproveitamento tinha como base o controle na emissão dos gases do efeito estufa e também o próprio contexto energético em relação às energias renováveis tendo em vista o momento da crise do petróleo daquela época. Passados os anos, novos projetos de aproveitamento do gás metano foram sendo disseminados em outros países. Em 2005 foram observados 500 aterros na Europa e 620 nos Estados Unidos que apresentavam plantas de aproveitamento de metano.

Se tratando do Brasil, este teve seu primeiro projeto de aproveitamento de gás de aterro em 1977, no Rio de Janeiro, no Aterro do Caju, seu desenvolvimento se deu

pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) em conjunto com a Companhia Estadual do Gás do Rio de Janeiro (CEG), esse empreendimento tinha como objetivo a incorporação do gás na rede domiciliar do município, com a utilização de gasodutos.

Outro empreendimento que foi realizado quase que na mesma época, foi o projeto implantado no aterro da Estação da Rodovia Raposo Tavares (Km 14,5) em São Paulo, projeto realizado em conjunto com a Companhia de Gás do Município de São Paulo (COMGÁS), o aterro onde foi desenvolvido o projeto apresentava um depósito de 2.100 toneladas de resíduos e nele foi implantada uma estação para captação do gás com o objetivo de abastecer 30 residências e uma indústria de produtos isolantes, sendo que ambos ficavam próximos ao local. A mesma empresa em 1985 implantou um outro projeto que visava esse aproveitamento energético dos aterros, no projeto o gás tinha o objetivo de abastecer 40 ônibus da Companhia Municipal de Transportes Coletivos (CMTTC), realizado no aterro Santo Amaro, que tinha um potencial de geração de gás metano de aproximadamente 80.694 Nm³/dia (COMGÁS, 1985).

Observa-se então que, as possibilidades de reaproveitamento energético e o objetivo dos projetos teve uma grande diversidade, porém as mais utilizadas estão relacionadas ao uso direto do gás como combustível em casas e indústrias, como também para geração de energia elétrica. Sendo assim, considerando a especificidade do trabalho, será tratada apenas a utilização do gás de aterro para geração de energia elétrica.

3.3 FORMAÇÃO DOS GASES NOS ATERROS SANITÁRIOS

Quando os resíduos sólidos são depositados em aterros, estes passam um tempo descobertos e em contato direto com o ar, depois que é então realizado o processo de compactação e cobrimento com material inerte. Nesse intervalo de tempo já é possível observar a emissão de compostos gasosos que são integrantes do resíduo. Esses componentes, mesmo após o cobrimento dos resíduos e fechamento da célula do aterro, ainda serão emitidos.

A produção e a taxa de geração dos compostos do gás de aterro são variáveis que dependem do tempo, e em seu processo seguem diferentes fases, e estas foram descritas por Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993).

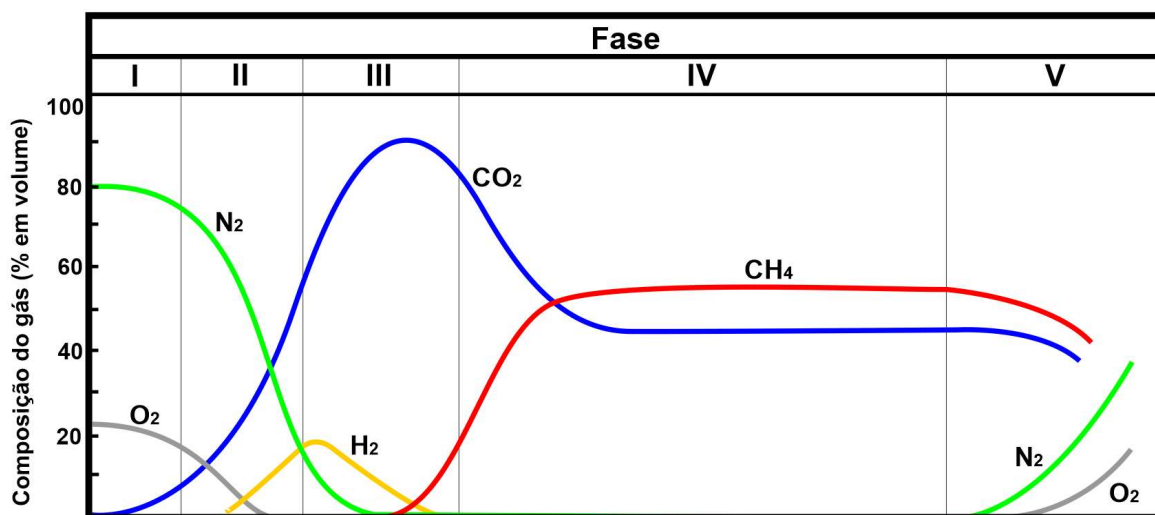
- a) PRIMEIRA FASE: também chamada de ajuste inicial, o processo de decomposição biológica da matéria orgânica se dá em ambiente aeróbio, pois existe uma certa quantidade de ar no interior do aterro. Observa-se que a principal fonte de micro-organismos para essa decomposição aeróbia inicial é a terra, lembrando que esta é utilizada para cobrir os resíduos além de dividir as células do aterro bem como a camada final do aterro ou da célula;
- b) SEGUNDA FASE: também chamada de fase de transição, nesta fase a quantidade de oxigênio presente no aterro decai, dar-se então ao desenvolvimento das reações anaeróbias. Os micro-organismos que têm por finalidade a conversão da matéria orgânica principalmente em metano e dióxido de carbono iniciam o processo de conversão tornando os materiais orgânicos complexos em ácidos orgânicos e outros elementos de transição. Nessa fase também ocorre a queda do pH do chorume em decorrência da presença dos ácidos orgânicos e também pelo efeito causado pela alta concentração de CO₂ na região interna do aterro;
- c) TERCEIRA FASE: também chamada de fase ácida, as reações que foram iniciadas na fase anterior são nesse momento aceleradas, com isso ocorrendo uma produção significativa de ácidos orgânicos e com quantidades menores de gás hidrogênio. O principal composto gerado nesta fase é o gás dióxido de carbono e os micro-organismos não metanogênicos, que possuem em sua composição às bactérias anaeróbias estritas e facultativas. A demanda bioquímica (DBO) em conjunto com a demanda química de oxigênio (DQO) e a condutividade do chorume se elevam de maneira significativa dentro desta fase, isso ocorre em decorrência da dissolução de ácidos orgânicos no chorume. Ainda em decorrência do baixo pH, os componentes inorgânicos a exemplo dos metais pesados serão solubilizados;
- d) QUARTA FASE: também chamada de fase metanogênica, apresenta o momento em que há predomínio de micro-organismos totalmente anaeróbios, estes são denominados metanogênicos, estes por sua vez fazem a conversão de ácido acético e gás hidrogênio em CH₄ e CO₂. A produção e formação de metano e dos ácidos ocorrem de maneira simultânea, porém a produção de ácidos tem uma redução significativa.

Nesta fase, o pH do chorume encontra-se em torno de 6,8 e 8,0, mais próximo do meio básico.

- e) QUINTA FASE: também chamada de fase de maturação, ocorre depois que uma grande parte da matéria orgânica ter sido decomposta pelos micro-organismos e convertida em CH_4 e CO_2 na fase anterior, a metanogênica. Em decorrência do fato da umidade ainda estar presente nos resíduos e assim migrar pelo próprio resíduo, as partes do material biodegradável que ainda não reagiram acabam sendo alcançados pelo processo e assim sendo convertidos. Nesta fase a troca de geração do gás tem decaimento significativo, isso porque a maioria dos nutrientes a disposição precisaram ser consumidos nas fases antecedentes e o material que resta no aterro são materiais de degradação lenta. Dependendo do processo de fechamento do aterro, é possível encontrar quantidades pequenas de materiais como oxigênio e nitrogênio no gás do aterro.

A Figura 1, abaixo, mostra o gráfico das fases de formação dos gases de aterro:

Figura 1 - Fases do processo de formação dos gases de aterro.



Fonte: Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993). (Adaptado).

O gás de aterros sanitários de RSU tem sua composição fragmentada em vários gases, no entanto possuem em sua grande parte a predominância dos gases metano e dióxido de carbono em sua constituição. A tabela a seguir apresenta valores comuns da composição do gás de aterro sanitário.

Tabela 2 - Composição comum dos gases de aterro sanitário.

Gás	Fórmula química	Concentração (%)
Hidrogênio	H ₂	1 - 10
Nitrogênio	N ₂	0,5 - 3
Oxigênio	O ₂	0,1 - 1
Monóxido de carbono	CO	0,1
Gás sulfídrico	H ₂ S	0,1
Vapor d'água	H ₂ O	Variável
Dióxido de carbono	CO ₂	35 - 45
Metano	CH ₄	50 - 70

Fonte: Motta (1986).

A digestão anaeróbia, presente nos aterros sanitários, tem em seu contexto a atividade de vários grupos de bactérias, e estes necessitam de condições ambientes adequadas ao seu desenvolvimento. Existem diversos fatores que influenciam diretamente a taxa de geração de gases de aterro, estes são citados abaixo (USEPA, 1996):

- a) **COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS:** neste fator quanto maior a quantidade de matéria orgânica no resíduo, maior o potencial de geração de gás metano;
- b) **AMBIENTE ANAERÓBIO:** para que o processo de produção de metano seja possível, é necessário que a matéria orgânica passe pelo processo de decomposição em ambiente sem oxigênio, isso demonstra a importância da cobertura dos resíduos com terra ou argila, assim criando nas células inferiores o ambiente anaeróbio propício a essa decomposição;
- c) **UMIDADE:** a umidade é fator imprescindível para a vida das bactérias que realizam a decomposição. Observa-se que uma umidade alta, em torno dos 60% a 90%, pode-se aumentar a geração dos gases;
- d) **ACIDEZ E TEMPERATURA:** as bactérias metanogênicas tem seu ápice na produção quando estas estão em ambiente onde o pH gira em torno dos 6,8 e 7,2. No início do processo os aterros apresentam pH ácido, porém este converge para o pH neutro no instante em que se inicia a fase metanogênica. A produção de metano é afetada também pela temperatura, esta para digestão anaeróbia se torna ideal para temperaturas entre 29 e 38°C para bactérias mesofílicas e 49 e 70°C para as bactérias termofílicas. Quando a temperatura do ambiente da ação das bactérias se encontra abaixo dos 10°C ocorre uma diminuição abrupta da taxa de geração do gás metano.

Normalmente, o próprio processo de decomposição disponibiliza calor para que ocorra a ação das bactérias nos aterros.

Dentre os fatores acima citados, estão entre os mais importantes, a umidade e a composição dos resíduos quando se trata do levantamento do potencial de geração de gás de aterro sanitário. A região norte onde se encontra o município de Macapá é bastante propícia, tendo em vista que esta se apresenta muito bem de acordo com os parâmetros citados acima, tais como, a temperatura do ar que na região gira em torno dos 25 a 40°C e a umidade relativa do ar que possui valores de 64% a 91%.

3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA QUANTIFICAÇÃO DE METANO GERADO EM ATERROS

Existem vários métodos que calculam a quantidade de metano produzido pelos RSU em aterros sanitários. Dentre eles, há métodos que apresentam um levantamento não muito preciso que considera apenas a quantidade de resíduos dispostos no aterro. Porém, existem também métodos que consideram o processo de geração cinético (simulação dinâmica) com base em três importantes fatores: condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição de resíduos. Os métodos têm suas diferenças no tipo de abordagem e considerações, na complexidade e na quantidade de dados de entrada (input) que eles necessitam.

São diversos os modelos matemáticos disponíveis, todos têm como objetivo a obtenção da curva de produção de gás metano em função do tempo. É preciso ressaltar que o valor do total da quantidade de gás metano produzido e a constante de geração variam de modelo para modelo, no entanto o parâmetro referente à quantidade de resíduo disponível a decomposição é igual a todos os modelos.

3.4.1 Modelo School Canyon

O modelo School Canyon parte da condição que considera que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo. É um modelo de primeira ordem que tem por objetivo estimar a produção de gás metano de um aterro sanitário.

Dos modelos disponíveis, o modelo School Canyon, muito utilizado pela indústria e por agências reguladoras, pode-se citar, por exemplo, a agência reguladora EPA (Environmental Protection Agency) como uma agência que utiliza esse modelo. Abaixo a equação de primeira ordem do modelo:

$$Q_{(\text{CH}_4)_i} = k \cdot L_0 \cdot m_i \cdot e^{-kt_i} \quad (1)$$

Onde $Q_{(\text{CH}_4)_i}$ é a vazão de metano produzido no ano i a partir da seção i do resíduo (m^3/ano); i é o incremento de tempo em um ano; k é a constante de geração de metano (anos^{-1}); L_0 é o potencial de geração de metano ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{t}$ resíduo); m_i é a massa de resíduo depositado no ano i (t); t_i é o tempo passado desde o fechamento (anos).

Este modelo apresenta simulação de produção de metano em determinado intervalo de tempo em função da constante de geração de metano (k), do potencial de geração de metano L_0 , e da quantidade de resíduos depositada. A EPA apresenta valores pré-estabelecidos para esses parâmetros. Esses parâmetros devem ser selecionados considerando o conhecimento das condições específicas do aterro e considerando a localização geográfica.

A constante de geração de metano (k) representa a velocidade de geração de gás metano e também a velocidade de esgotamento do aterro. A constante k é função de quatro fatores: umidade, disponibilidade de nutrientes, temperatura e do pH.

O potencial de geração de metano (L_0) é função da composição do resíduo, principalmente da fração de matéria orgânica presente no resíduo. O valor de L_0 tem sua estimativa baseada na quantidade de carbono do resíduo, na parte de carbono biodegradável, e num fator de conversão estequiométrico (WORLD BANK, 2004).

3.4.2 Modelo LandGEM

Para o contexto desse trabalho, será utilizado o LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) versão 3.02, que foi desenvolvido pelo Control Technology Center (CTC) da EPA em 2005, que é um modelo de estimativa de geração de gases de aterro, que calcula além do metano, a emissão de outros 49 tipos de gases, o mesmo está disponível na internet, podendo ser acessado livremente. A seguir será apresentado o modelo e seus parâmetros para que seja realizada a modelagem, onde

se realizará o levantamento do panorama e potencial energético dos resíduos sólidos do aterro sanitário de Macapá.

O programa LandGEM tem fundamento no modelo da School Canyon, que como foi visto anteriormente parte do princípio em que a geração de gás metano é uma função da constante de geração do metano, do potencial de geração de metano e dos registros anuais de recebimento de resíduos pelo aterro. Esse modelo tem parâmetros padrão que podem ser utilizados quando não houver dados específicos do local.

Este modelo tem base na equação a seguir, que calcula a estimativa anual de emissões em um determinado período.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (2)$$

Onde $Q(CH_4)_i$ é a vazão de metano em m^3/ano ; i é o incremento de tempo em um ano; j é o incremento de tempo igual a um décimo de um ano; k é a taxa de geração de metano (anos^{-1}); L_0 é o potencial de geração de metano (m^3CH_4/t resíduo); M_i é a massa de resíduo depositada no ano i (t); t_{ij} é o intervalo de tempo j -ésimo décimo do ano i .

Em decorrência da relação direta entre a constante de geração de gás (k) e a umidade e disponibilidade de nutrientes, estudos desenvolvidos pelo World Bank (2003) e pela USEPA (1998) relacionam essa constante a valores de precipitações anuais e a quantidade de matéria orgânica disponível, de acordo com o apresentado nas tabelas 3, 4 e 5 seguir:

Tabela 3 - Valores de k em função da precipitação e disponibilidade de nutrientes.

Precipitação Anual	Valores de k (anos^{-1})		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
> 250 e < 500	0,01	0,03	0,05
> 500 e < 1000	0,02	0,05	0,08
> 1000	0,02	0,06	0,09

Fonte: World Bank (2003).

Tabela 4 - Valores propostos para k em função da precipitação.

Pluviometria anual	< 635mm	> 635mm
<i>k</i>	0,02	0,04

Fonte: USEPA (1998).

Tabela 5 - Variações de k e L₀.

Variável	Variação	Valores sugeridos		
		Clima úmido	Clima de umidade média	Clima seco
L ₀	0 - 0,312	0,14 - 0,18	0,14 - 0,18	0,14 - 0,18
<i>k</i>	0,003 - 0,4	0,10 - 0,35	0,05 - 0,15	0,02 - 0,10

Fonte: USEPA (1996), citando Landfill Control Technologies (1994). (Adaptada).

No entanto existe uma formulação para que se possa calcular e determinar a constante k, proposta pelo IPCC:

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (3)$$

Onde $t_{1/2}$ é o tempo para que a fração de carbono orgânico degradável (COD) seja reduzida à metade de sua massa inicial.

O IPCC determina que a constante k em casos onde não possa ser determinada, deve assumir valor igual a 0,05. O IPCC relaciona o potencial de geração de metano (L₀) com a quantidade de material orgânico presente nos resíduos.

Os valores de L₀, segundo o World Bank (2003) são determinados em função da degradabilidade do resíduo, a tabela a seguir mostra as indicações observadas pelo World Bank (2003). Para a USEPA (1998) o potencial de geração de metano independe dos valores de precipitação pluviométrica, esta recomenda que L₀ seja igual a 100 m³CH₄/tonelada de resíduo.

Tabela 6 - Valores de L₀ sugeridos em função da degradabilidade.

Caracterização do Resíduo	Valor mínimo de L₀ (m³CH₄/ton resíduo)	Valor máximo de L₀ (m³CH₄/ton resíduo)
Resíduo relativamente inerte	5	25
Resíduo moderadamente degradável	140	200
Resíduo altamente degradável	225	300

Fonte: World Bank (2003).

O IPCC tem uma metodologia para obtenção do L₀ a partir da formulação da seguinte equação:

$$L_0 = FCM_i \cdot COD_i \cdot COD_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (4)$$

Onde FCM_i é o fator de correção de metano no ano i ; COD_i é a fração de carbono orgânico degradável no ano i (ton C/ton RSD); COD_F é a fração de carbono orgânico degradável assimilado; F é a fração de metano no gás de aterro, na ausência de dados, utiliza-se 0,5; $16/12$ representa a conversão de carbono a metano.

O fator de correção de metano, depende do tipo de depósito de resíduos, este podendo ser do tipo controlado ou não controlado. Os controlados tem controle do tipo de resíduo que é recebido, sendo executados em área específica com procedimentos como compactação mecânica, cobertura e nivelamento, também usando em aterros do tipo não controlado.

Os não controlados, por sua vez, não apresentam controle dos resíduos e nem processos inerentes a esse controle. No caso dos controlados, segundo o IPCC, considera-se o fator de correção de metano igual a 1. Já os aterros não controlados têm o FCM_i em função da altura da pilha de resíduos, de acordo com o apresentado na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 - Valores de FCM_i recomendados para aterros não controlados.

Altura da pilha de disposição de resíduos	FCM_i
≥ 5 metros	80%
< 5 metros	40%
Locais sem classificação	60%

Fonte: IPCC (1996).

O IPCC para a fração de carbono orgânico degradável para cada ano i (COD_i) que é a fração a ser degradada bioquimicamente, recomenda valores que dependem do tipo de resíduo. A tabela abaixo mostra esses valores.

Tabela 8 - Valores de porcentagem de COD_i em massa.

Tipo de resíduo	% de COD_i em massa
A - Papel, papelão e tecidos	40
B - Resíduo de parques e jardins (poda)	17
C - Restos de alimentos	15
D - Madeira	30

Fonte: IPCC (1996).

Considerando a tabela 8, acima, o COD_i é encontrado através da seguinte equação:

$$\text{COD}_i = 0,40A + 0,17B + 0,15C + 0,30D \quad (5)$$

Onde A, B, C e D representam a fração dos respectivos tipos de RSU apresentados na tabela 8.

Se forem desconhecidas as quantidades dos tipos de resíduos, o IPCC recomenda que o COD_i seja igual a 12%.

Em relação ao carbono orgânico degradável assimilado, COD_F, quando não há dados a respeito deste, o IPCC recomenda que se utilize 77%. O COD_F corresponde a fração que realmente se decompõe, sendo esse carbono não se degrada totalmente, permanecendo em parte bom um período inalterado.

3.5 TECNOLOGIA DE RECUPERAÇÃO DE METANO DE ATERROS SANITÁRIOS

O gás de aterro sanitário pode ser convertido em energia elétrica através de turbinas a gás, microturbinas, motores de combustão interna, entre outros. Porém para que esse gás possa realmente ser utilizado é necessário a implantação de um sistema de coleta, de tratamento e purificação além dos equipamentos de geração de energia elétrica.

Estes componentes serão descritos de maneira mais elaborada a seguir.

3.5.1 Sistema de coleta

O padrão de um sistema de coleta em aterro sanitário apresenta quatro componentes principais, são eles: poços de coleta, estes são divididos em poços drenantes verticais e drenantes horizontais também chamados de trincheiras horizontais; tubos de coleta; compressor e flare, também chamado de queimador.

3.5.1.1 Poços de coleta para drenagem do gás do aterro

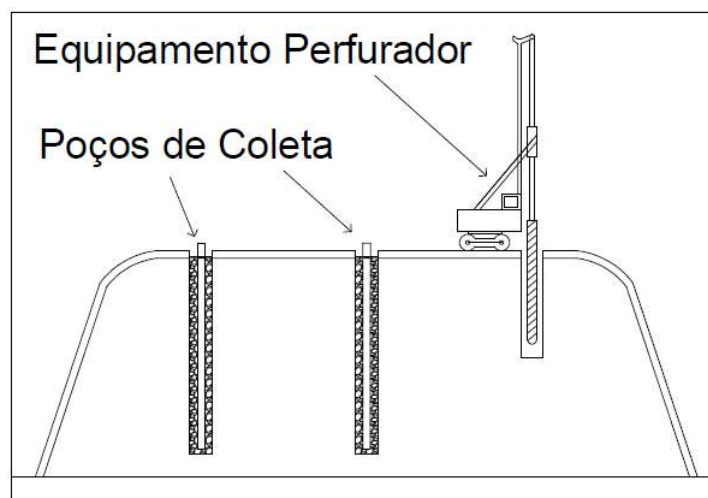
A forma de recuperação de gás de aterro mais utilizada é a construção e instalação dos poços drenantes verticais (WORLD BANK, 2003). Geralmente a implantação do poço drenante vertical ocorre quando a atividade no aterro já se deu

por encerrada, esse poço tem em sua constituição um tubo de polietileno de alta densidade com furos em sua parte inferior. O tubo é instalado de tal forma que este tem acesso as camadas de disposição dos resíduos. O tubo em seu extremo superior é conectado à rede de tubulações para captação do gás através de um cabeçote.

A instalação do poço drenante vertical na célula do aterro é feita através da perfuração da mesma, considerando um diâmetro de perfuração de aproximadamente um metro (OONK; BOON, 1995). Ocorre então o preenchimento do espaço que existe entre o aterro e o poço drenante com pedras, melhorando a vazão do gás e evitando fechamento dos furos do poço.

Com a intenção de diminuir o máximo possível a circulação de ar dentro do poço, é realizada uma vedação onde na parte superior preenchida com pedras, e posteriormente selada com uma camada de cimento ou outro material que exerça a mesma função, a exemplo da argila ou material inerte compactado. A Figura 2, a seguir, mostra a forma que são instalados os poços drenantes verticais.

Figura 2 - Instalação de poços drenantes verticais em aterro finalizado.



Fonte: Oonk e Boon (1995). (Adaptado)

Um custo que é bastante relevante em relação à execução e implantação de um poço drenante vertical é referente ao processo de perfuração. Porém, esse custo pode sofrer uma queda quando os poços são instalados antes da disposição dos resíduos, pois, nesse processo a recuperação do gás do aterro só pode ser iniciada após as atividades neste cessarem, ou na célula em questão.

Também com o objetivo de recuperar o biogás gerado no aterro, são implantadas trincheiras horizontais, tubos perfurados que são dispostos horizontalmente na célula do aterro. Para uma correta instalação é necessário que

sejam envolvidos com uma camada de brita nº 4, por exemplo, com a finalidade de não haver contato do tubo com o resíduo.

Podem existir várias camadas de tubos horizontais em aterros, a distância vertical entre eles é variável entre 6 e 10 metros (OONK; BOON, 1995).

3.5.1.2 Tubos de coleta para captação e condução do gás do aterro

Os tubos de coleta têm o objetivo de conduzir o gás do aterro drenado dos poços de coleta até a unidade que vai realizar processo de utilização do gás para geração de energia elétrica. Os tubos que constituem a rede são de polietileno de alta densidade (PEAD), que normalmente são aterrados para evitar acidentes. Junto a esses tubos são instaladas bombas para sucção do gás, com o objetivo de garantir uma vazão de gás compensando as perdas de carga na rede de tubos. Porém, é muito importante que a vazão das bombas trabalhe em equilíbrio com a geração de gás.

A conexão do poço com a bomba que realiza a sucção do gás pode ser realizada de várias formas, como a acoplagem direta ao tubo principal que realiza a condução final. Um dos grandes problemas no sistema está em determinar a quantidade e a qualidade do biogás, bem como encontrar possíveis vazamentos quando estes tubos estão interligados.

As formas de captação do gás se dão de maneira igual, porém a construção dos tubos ocorre de formas diferentes, de acordo com a necessidade de cada aterro. Nas Figuras 3 e 4 nota-se que a maneira usada na construção dos tubos se deu na horizontal, onde todos os registros se encontram em um único ramal de ligação com a saída do gás.

Figura 3 – Tubos de coleta de biogás I.



Fonte: CENBIO (2006).

Figura 4 – Tubos de coleta de biogás II.



Fonte: CENBIO (2006).

Já nas Figuras 5 e 6, vê-se uma captação mais dinâmica, com tubos vindos não apenas de uma direção, mas sim de várias, efetuando a ligação de poços de coleta de uma maneira mais versátil, abrangendo mais poços e facilitando um pouco mais a ligação dos mesmos.

Figura 5 - Tubo de coleta de biogás do Aterro Bandeirantes I.



Fonte: Pavan (2010).

Figura 6 - Tubo de coleta de biogás do Aterro Bandeirantes II.



Fonte: Pavan (2010).

3.5.1.3 Compressor ou sistema de compressão

O processo de sucção do gás do aterro através dos poços de coleta e das tubulações de condução e captação do gás é realizado através de um compressor ou um soprador. Outro processo onde pode ser necessária a utilização do compressor se dá na necessidade de comprimir o gás antes de sua entrada no sistema de geração de energia elétrica.

O tamanho bem como o tipo e o número de compressores necessários vão depender da taxa de compressão, do fluxo de gás e do nível de compressão desejado, que pode ser determinado de acordo com as necessidades do equipamento de conversão energética que será utilizado. A Figura 7 a seguir mostra um exemplo do equipamento descrito no parágrafo anterior:

Figura 7 - Compressores para flare.



Fonte: CENBIO (2006).

3.5.1.4 Flare ou Queimador

O flare é um equipamento que executa a ignição e queima do biogás gerado no aterro. Este equipamento é necessário nas etapas de início e manutenção do sistema, pois, considerando que a vazão de gás é ininterrupta, o flare efetua a queima de possíveis excessos de gás, podendo também realizar a queima do sobressalente até que seja instalado um novo motor, por exemplo. Os flares podem ser de dois tipos: abertos e enclausurados (KESSLER, 2000).

Os flares do tipo abertos ou vela são os mais simples, pois apresentam alguns problemas em sua operação, a exemplo da instabilidade da chama, que pode ter origem em uma combustão ineficiente, outro problema é que nestes é mais difícil de se realizar testes de emissão de gases (USEPA, 1996).

Os flares do tipo fechado ou enclausurados apresentam um custo mais elevado, porém, são equipamentos que apresentam um desempenho operacional melhor que os flares abertos, pois, podem ser realizados testes de concentração, além de ser mais eficiente no processo de combustão. Esse equipamento reduz a emissão de materiais perigosos devido a queima dos hidrocarbonetos presentes ser mais eficiente. A Figura 8 a seguir nos mostra um exemplo de flare fechado ou enclausurado.

Figura 8 - Flare enclausurado.



Fonte: CENBIO (2006).

3.5.2 Sistema de tratamento e purificação

A decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos é um processo que libera energia térmica, também chamado de processo exotérmico, com isso o gás do aterro é liberado em alta temperatura (WORLD BANK, 2003).

O vapor d'água presente nesse composto de gases ao ser conduzido pelo sistema de coleta passa por um processo de resfriamento formando um condensado. Nesse momento é criado um ambiente de alta umidade, que misturado com dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S) e compostos orgânicos voláteis representam um ambiente com alto potencial de corrosão (WORLD BANK, 2003).

Dentre as propriedades que devem ser observadas referentes ao gás, deve-se considerar importante não somente o poder calorífico do gás, mas também a presença de contaminantes como a acidez e a própria pressão, estudos determinantes para que haja o preparo da instalação da unidade de geração para a utilização do gás.

É necessária a adaptação adequada da máquina para com o combustível, caso contrário a operação dos motores e queimadores pode ocorrer de maneira ineficiente. Essa não adaptação pode acarretar também em combustão incompleta, falha na

alimentação, perda de potência e também corrosão adiantada devido à presença de ácido sulfídrico (ALVES, 2000).

Quando ocorre a presença de impurezas no gás de aterro, em geral substâncias não combustíveis, como água e dióxido de carbono, essas impurezas acarretam em prejuízo ao processo de queima, tornando-o assim ineficientes. Essas impurezas entram no processo de combustão no lugar dos combustíveis e estas acabam por absorver parte da energia gerada, pois quanto maior a presença de impurezas menor é o poder calorífico do metano. O condensado presente pode evoluir gerando um bloqueio no sistema de coleta e interrompendo o processo de geração de energia elétrica. Este precisa ser controlado de imediato no sistema de coleta, podendo ser realizado com a inclinação dos tubos e conectores nesses pontos para a retirada do condensado.

Outros processos para desumidificar o gás podem ser aplicados como a utilização de deparadores de umidade, eliminadores de névoa, resfriamento direto, compressão e resfriamento, absorção e adsorção.

Os compostos orgânicos voláteis (VOC's – volatile organic compounds) podem ser retirados com a utilização de grânulos de carbono ativado e limalha de ferro. Segundo o World Bank (2003) esse método é o mais usado para remoção de impurezas de hidrocarbonetos.

A purificação no que se refere ao ácido sulfídrico se realiza pela aplicação de limalha de ferro, esse processo segundo Beduschi et al. (1995) está entre os mais antigos se tratando de remoção de compostos de enxofre, ainda segundo os autores esse mecanismo têm outros pontos positivos como o baixo custo, a instalação ser de fácil execução, e principalmente a remoção completa do H₂S que reage com o óxido de ferro formando então o sulfeto.

Um processo que remove o ácido sulfídrico do biogás é o método biológico desenvolvido por Fernández e Montalvo¹ (1998, apud Alves, 2000). Nesse método o biogás é exposto a uma pequena quantidade de oxigênio em um ambiente líquido. Quando exposto em um intervalo de tempo de 13 a 16 horas, a eficiência de remoção do ácido sulfídrico é bem alta, acima de 97%. Em um processo mais rápido onde se

¹FERNÁNDEZ, E., MONTALVO, S.J., Biological method for removal of H₂S from biogas. In V Taller y Seminario Latino Americano. Tratamiento anaerobio de aguas residuales / Fifth Latin-American Workshop Seminar in Wastewater Anaerobic Treatment. Anais... Chile, 1998.

expõe o biogás ao oxigênio por um tempo de 1 hora a remoção fica na média dos 95%.

O dióxido de carbono não tem aproveitamento por não possuir valor calorífico e ainda quando este entra em contato com água forma o ácido carbônico. Esse dióxido de carbono pode ser removido do biogás através de extração, métodos de separação com membrana e absorção. Segundo Beduschi et al. (1995), o processo de remoção de CO₂ é feito através de absorção do mesmo na água.

3.5.3 Sistema com equipamentos de geração de energia elétrica

O projeto de recuperação energética do metano de aterro tem por objetivo aproveitar esse metano em alguma forma de energia útil, por exemplo: vapor, combustível tanto para caldeiras ou fogões como também para veículos, aquecimento e no nosso caso principalmente para geração de energia elétrica. E como esse trabalho dá ênfase a geração de energia elétrica, serão vistas aqui as possibilidades de geração de energia elétrica através do biogás.

A geração de energia elétrica a partir do gás de aterro e a venda dessa energia para a rede pode ser uma boa alternativa, esta tem a possibilidade de transmissão por longas distâncias com uma alta eficiência energética, principalmente quando a geração de eletricidade é realizada através de ciclo combinado. No entanto, uma das desvantagens do processo de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro é a necessidade de investimentos mais elevados para a realização do pré-tratamento do gás.

Este tipo de geração de energia é uma alternativa que recupera uma fonte de matéria estagnada e que se não consumida ou tratada pode gerar maiores danos ao meio ambiente, a exemplo da aceleração do processo de efeito estufa, como já foi descrito neste trabalho. A geração de energia elétrica com o uso desses resíduos vem sendo tratada como uma fonte alternativa de energia com enorme potencial, pois o aumento populacional tende a crescer e em conjunto com o consumo gerando assim mais resíduos, ou seja, o problema dos resíduos sólidos urbanos deve ser observado como fonte de energia.

A conversão energética de um combustível se dá através da transformação de um tipo de energia em outra, por exemplo, a geração de energia elétrica através de torres de turbinas eólicas que transformam a energia cinética dos ventos em energia

mecânica que por sua vez giram a turbina onde está acoplado a um gerador produzindo assim energia elétrica. A conversão de energia que ocorre com a utilização do biogás é um processo que transforma a energia química presente nas moléculas do gás em energia mecânica. Essa energia mecânica é então utilizada para acionar um alternador, efetuando a geração de energia elétrica.

Algumas vantagens e relação à geração de energia elétrica a partir do biogás são: a utilização de um combustível de baixo custo tendo em vista que são resíduos provenientes do descarte humano, menor emissão de poluentes, balanço de carbono negativo, e também a facilidade de geração próxima aos pontos de distribuição, diminuindo custos e perdas no processo de transmissão.

Das diversas tecnologias disponíveis para transformação energética do biogás as que se destacam são: as caldeiras, turbinas a gás e os motores de combustão interna. Estes equipamentos de geração de energia elétrica serão demonstrados a seguir.

3.5.3.1 Motores de combustão interna

O motor de combustão interna produz energia mecânica queimando uma mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro. A energia mecânica é gerada através da transformação do movimento retilíneo do pistão circular por meio de um virabrequim. Mecanismo muito utilizado por ser um processo prático com alta durabilidade (CORREA, 2003).

O biogás proveniente de aterro pode ser usado diretamente nos motores estacionários, para isso geralmente é necessária a purificação do combustível. Segundo Silva (1995) os motores a álcool são promissores na operação com a utilização de biogás. E vale ressaltar que o motor tem uma grande perda de eficiência quando o combustível apresenta teor de metano menor que 50%. Hoje já existem fabricantes de motores que estão fabricando estes preparados para a utilização do biogás como combustível, alguns exemplos de fabricantes são: GE Jenbacher, Caterpillar e Cummins.

A utilização dos motores de combustão interna é a opção mais presente para o aproveitamento do biogás proveniente de aterro, pois esses motores apresentam um baixo custo, facilidade de operação e manutenção (KESLSER, 2000).

Os motores ciclo Otto gasolina/álcool ou Diesel apresentam como aplicações principais: geração de energia elétrica através do acoplamento do motor a um gerador elétrico, geração de energia mecânica que pode ser utilizada para recalque de bombas hidráulicas, acionamento de compressores e movimentação de veículos (ALVES, 2000).

Esse equipamento que pode ser acoplado diretamente a um gerador elétrico e com a rotação gerar energia elétrica, esse apresenta diversas vantagens e uma muito interessante é a flexibilidade na implantação de um sistema de geração, este pode partir de uma pequena geração onde com o tempo à medida que a produção de gás do aterro aumenta, pode-se realizar a instalação de novos motores para o devido aproveitamento (KELLSER, 2000).

Figura 9 - Grupo Motor Gerador.



Fonte: World Bank (2003).

3.5.3.2 Turbinas a gás

O uso desse tipo de equipamento para geração de energia elétrica parte da consideração que o aterro apresenta um grande fluxo de gás. Esse tipo de equipamento é recomendável para aterros com grandes disposições de resíduos, com capacidade potencial de geração de 3 a 4 MW pelo menos (USEPA, 2002).

Para esse processo de geração de energia elétrica, a sua eficiência pode ser aumentada em até 40% quando o projeto apresenta plantas de ciclo-combinado, fazendo a recuperação do calor perdido. Porém, esses equipamentos apresentam baixa eficiência quando trabalham em carga parcial. Uma boa comparação com os

motores à combustão interna, é que as turbinas a gás apresentam uma maior resistência a corrosão além de possuir custos mais baixos em relação a manutenção e operação.

3.5.3.3 Microturbinas

As microturbinas têm em seu funcionamento o mesmo princípio das turbinas a gás de circuito aberto, porém sua capacidade de geração de energia elétrica se apresenta em uma escala bem menor. Dentre suas vantagens, este equipamento apresenta alta confiabilidade, simplicidade de projeto, fácil instalação e manuseio. Sua construção era inicialmente para aplicação em motores de ônibus e turbinas de avião, tempos depois foi então aplicada em sistema de geração de energia elétrica (GOMES et al., 2001).

As aplicações desse equipamento são normalmente realizadas em projetos com menos de 1MW de potência, normalmente esse equipamento atende as necessidades elétricas do próprio aterro ou de áreas próximas. São equipamentos que estão sendo introduzidos no processo de aproveitamento de gases de aterro (USEPA, 2002).

Esses equipamentos podem ser utilizados em grupos de potências de 30 a 100kW para cada equipamento, com isso introduzir maior flexibilidade no sistema no uso do gás, de acordo com a necessidade. Essa alternativa se faz interessante quando a vazão de gás do aterro é pequena, e com isso os motores a combustão interna ou turbinas a gás de grande porte se tornam inviáveis.

O gás com teor de metano baixo não representa um problema, pois as microturbinas funcionam normalmente com teor de metano até menores que 35% no biogás do aterro. Por fim, quando ocorre a diminuição na produção do gás do aterro, ao ponto que não seja mais possível a geração de energia elétrica, essas microturbinas podem ser facilmente transportadas ou transferidas por possuírem pequeno porte. (USEPA, 2002).

Uma desvantagem das microturbinas é sua eficiência muito baixa, se comparado com motores de combustão interna e turbinas a gás de maior porte, esse equipamento apresenta um consumo muito maior de combustível por kWh produzido, em torno de 35% (USEPA, 2002).

4 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO CENTRO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACAPÁ

Nesse capítulo serão apresentados os dados a respeito do Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de Macapá juntamente com os resultados do potencial de geração de energia elétrica.

4.1 CENTRO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACAPÁ

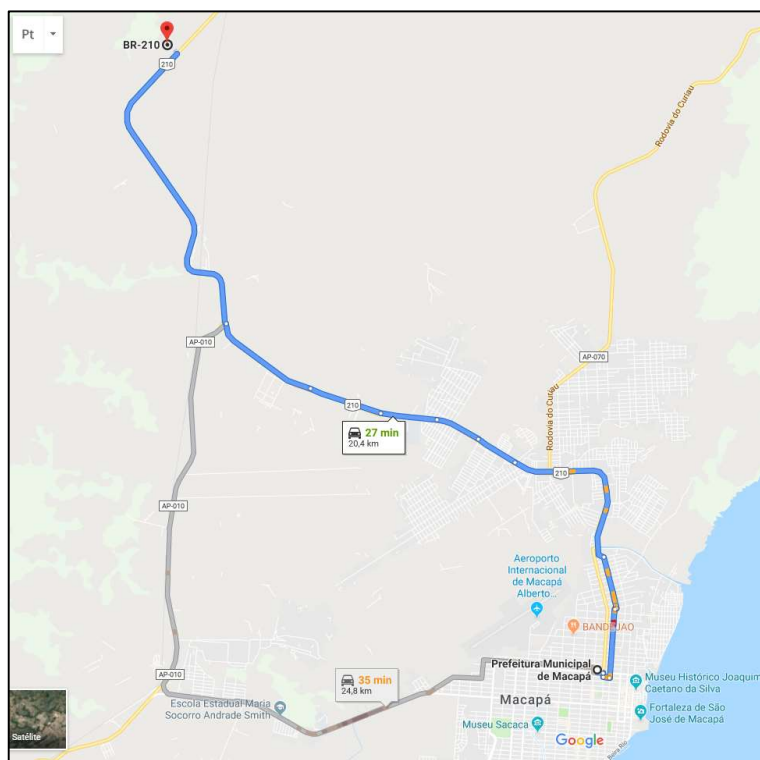
O estado do Amapá situado a nordeste da região norte e tem como limites a Guiana Francesa ao Norte, o oceano Atlântico a leste, o Pará ao sul e oeste e o Suriname a noroeste, sua capital Macapá possui população segundo o censo IBGE/2010 de 398.204 habitantes, e sua população estimada segundo IBGE/2017 de 474.706 habitantes.

A respeito da disposição dos resíduos sólidos urbanos de Macapá pode-se citar que em 1997 seu tratamento era realizado através da lixeira pública de Macapá, conhecida como lixão, localizada na BR-156 Km 5 e que posteriormente foi transferida para o Km 14. Os RSU coletados eram dispostos a céu aberto sem nenhum tipo de tratamento, além disso, o lixo hospitalar ficava misturado ao lixo domiciliar, fatores que acabaram cedendo espaço para diversos problemas ambientais como a poluição do solo e das águas subterrâneas além presença de insetos e vetores transmissores de doenças (SEMUR, 2012).

O aterro CTR de Macapá teve o início de suas atividades em agosto de 2008 com seu gerenciamento sendo realizado pela concessionária Rumos Engenharia Ambiental Ltda. concedido pela Prefeitura Municipal de Macapá. O CTR está localizado na BR-156, sentido Macapá-Oiapoque, Km 14. Distante 3,5km do rio Matapi, 13km ao norte do Aeroporto Internacional de Macapá e 20km da área urbana da capital (SEMUR, 2012).

Com uma área total de aproximadamente 103 hectares, 58,7 hectares são destinados à vegetação nativa, e o restante para uso da concessionária para o gerenciamento do aterro e seus diversos tipos de resíduos (domiciliares, comerciais, entulhos, pneus, etc.), estimada em 35,7 hectares (SEMUR, 2012). A Figura 10 e 11 a seguir mostram a localização e a vista superior do CTR de Macapá respectivamente, tendo como referência o prédio da prefeitura municipal de Macapá.

Figura 10 - Localização do CTR de Macapá-AP.



Fonte: Google.

Figura 11 - Vista superior do CTR de Macapá.



Fonte: Google

Figura 12 - Entrada do CTR de Macapá.



O CTR de Macapá, onde a Figura 12 mostra sua entrada, teve como primeira célula explorada a que apresentava características de aterro controlado e apesar de sua capacidade ter sido estimada em 465.000 toneladas de resíduos, nela estão dispostos a quantidade de 497.830,64 toneladas de resíduos, sendo que esta célula recebeu resíduo até o ano de 2012, pois a partir de 2013 foi implementada uma segunda célula com características de aterro sanitário (Figura 13), com previsão de funcionamento até o ano de 2027 podendo ser prorrogado por mais 5 anos, segundo informações da Secretaria Municipal de Manutenção Urbanística (SEMUR).

Figura 13 - Primeira célula de aterro sanitário de Macapá.



Fonte: SEMUR (2012).

Atualmente é realizado o tratamento e disposição dos resíduos sólidos urbano na célula de aterro sanitário, e diferente do aterro controlado onde a impermeabilização do solo é realizada através de argila compactada, o aterro sanitário

a impermeabilização é executada com a implantação de uma manta de polietileno de alta densidade (PEAD), como mostrado na Figura 14 abaixo.

Figura 14 - Tratamento e disposição dos RSU no aterro sanitário de Macapá.



Existe no aterro sanitário três lagoas (Figura 15) que recebem o líquido percolado denominado chorume, que são líquidos provenientes da decomposição da matéria orgânica, apresentam cor escura, forte odor e elevado potencial poluidor, esse líquido é drenado para “lagoa de acumulação” através de drenos horizontais.

Figura 15 - Lagoas de chorume do aterro sanitário de Macapá.



O tratamento dos resíduos hospitalares é realizado de maneira parecida ao tratamento dos resíduos domiciliares, porém para esses resíduos existe uma área específica, onde apenas os resíduos hospitalares são tratados e depositados, é feita a escavação do espaço e realizada a impermeabilização do solo com a implantação da manta de PEAD. A área específica para esse tratamento encontra-se cercada e a

ela é proibido o acesso de pessoas não autorizadas, como mostrado na Figura 16 abaixo.

Figura 16 - Área para tratamento de resíduos hospitalares do CTR de Macapá.



Fonte: SEMUR (2012).

O aterro CTR de Macapá recebe além de resíduos sólidos urbanos e hospitalares, resíduos provenientes de construção, dentre esses materiais pode-se citar argamassa, areia, cerâmica, concreto, tijolos, etc. que no aterro são destinados à área de entulho.

Outro tipo de resíduo são os provenientes de limpeza de terrenos, e estes não têm a necessidade de tratamento, a exemplo galhos de poda, capim, terra, entre outros, estes são colocados em uma área específica chamada de “bota fora” podendo estes materiais ainda ser aproveitados no aterro para recobrimento de partes da célula no processo de disposição.

A coleta diária dos resíduos domiciliares é realizada através de caminhões compactadores com capacidade para 15m³ de resíduo. A coleta na cidade de Macapá é realizada de maneira alternada entre os bairros da zona sul e norte, exceto pelos bairros da região central que tem a coleta realizada diariamente no período noturno. No período diurno nas segundas, quartas e sextas-feiras a coleta é realizada nos bairros da zona sul, e nas terças, quintas e sábados nos bairros da zona norte.

Quando os caminhões de coleta chegam ao aterro passam pela pesagem antes de realizar o descarregamento do lixo coletado. A Figura 17 a seguir ilustra a balança que efetua a pesagem do caminhão.

Figura 17 - Balança de pesagem dos caminhões no CTR de Macapá.



Fonte: SEMUR (2012).

No aterro de Macapá existem os catadores, e estes estão organizados em forma de associação, a ACAM (Associação dos Catadores de Macapá), que desenvolvem atividade no aterro a 14 anos. A ACAM dá diretriz ao trabalho dos catadores no aterro, além disso, também desenvolve o apoio social aos catadores, visando principalmente melhorias nas condições de trabalho. Atualmente com 72 catadores registrados, estes realizam a catação direta e comercialização do lixo reciclável do CTR de Macapá (SEMUR, 2012).

Em visita observou-se que o aterro controlado dispõe de 18 drenos verticais para a drenagem do biogás, feitos de tubo de concreto pré-moldado com diâmetro de 300 milímetros e distantes aproximadamente 35 metros um do outro. Foi observado também que a queima do biogás não é mais realizada no aterro controlado, e que seus drenos não estão mais visíveis necessitando manutenção conforme as Figuras 18 e 19 a seguir.

Figura 18 - Aterro controlado de Macapá.



Figura 19 - Drenos do aterro controlado de Macapá.



Já o aterro sanitário apresenta drenos verticais feitos alguns em manilha de concreto pré-moldado de 300 milímetros de diâmetro, sendo que ao longo do dreno a manilha é perfurada para o acesso do biogás ao dreno. Existe ainda um espaçamento entre o tubo e os resíduos realizado com pedra número 4 para evitar que o percolado cause entupimento dos furos do tubo e assim dar continuidade a vazão do gás. A Figura 20 abaixo mostra esse tipo de dreno.

Figura 20 - Dreno do aterro sanitário de Macapá.



Há também um outro tipo de dreno feito com tubos de PEAD, que são perfurados para dar acesso ao biogás do aterro, eles também possuem o espaçamento com pedra número 4, de tamanho que varia entre 50mm a 76mm, para evitar entupimento pelo percolado. A Figura 21 abaixo ilustra os drenos de tubo de PEAD.

Figura 21 - Drenos de tubo de PEAD do aterro sanitário de Macapá.



O biogás drenado passa pelo processo de queima para não ser liberado diretamente na atmosfera ajudando a amenizar a emissão de gases poluentes na atmosfera nesse caso principalmente o metano. A Figura 20 mostra um dos queimadores do aterro sanitário de Macapá, que são colocados no topo dos drenos verticais.

Figura 22 - Queimador de gás do aterro sanitário de Macapá.



4.2 QUANTITATIVO E ANÁLISE GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS

Os dados gravimétricos e de quantitativo dos resíduos sólidos urbanos do CTR de Macapá foram coletados diretamente na Secretaria Municipal de Manutenção Urbanística (SEMUR), sendo a Rumos Engenharia Ambiental Ltda. responsável pela produção dos dados e informações que a SEMUR apresentou. A Rumos realiza a produção e coleta das informações e posteriormente as repassam a SEMUR, dando assim credibilidade dos dados apresentados a empresa.

A Tabela 9 abaixo refere-se aos resíduos sólidos da célula de aterro controlado, informando o quantitativo de RSU depositados dentro do período de operação da célula.

Tabela 9 - Quantitativo de RSU no aterro controlado de Macapá.

QUANTITATIVO DE RESÍDUOS POR ANO	
Ano	Toneladas
2007	72.139,65
2008	74.890,44
2009	93.584,33
2010	98.126,36
2011	83.315,44
2012	75.774,42
TOTAL	497.830,64

Fonte: SEMUR (2012).

Outra informação bastante relevante se tratando dos RSU do CTR de Macapá é a característica do resíduo (Tabela 10), ou seja, sua gravimetria, pois a composição do resíduo influencia diretamente no potencial de geração de gás metano, tendo em vista que quanto maior a quantidade de matéria orgânica nos resíduos sólidos maior será a capacidade de produção de biogás e principalmente produção de metano.

Tabela 10 - Gravimetria dos RSU no aterro de Macapá.

CARACTERÍSTICA E COMPOSIÇÃO DOS RSU NO ATERRO DE MACAPÁ	
Tipo de resíduo	% Correspondente
Matéria Orgânica	61,00
Papel/Papelão	11,70
Plástico	15,00
Metais Ferrosos	3,60
Vidro	2,30
Couro	1,91
Madeira	1,75
Trapos	1,10
Borracha	0,93
Alumínio	0,60
Cobre	0,10
Outros Materiais	0,01

Fonte: SEMUR (2012).

Atualmente está em operação no aterro de Macapá a célula com característica de aterro sanitário, e a gravimetria dos RSU depositados nessa célula tem características muito aproximadas dos resíduos depositados na célula de aterro controlado. Para levantar o quantitativo de resíduos do aterro sanitário, estimou-se o crescimento da deposição de resíduos de acordo com o crescimento populacional em Macapá no período de 2010 a 2017, momento onde ocorre um decaimento na taxa de crescimento populacional da cidade, com um percentual de crescimento populacional de 2,54% ao ano.

Sabendo que as operações no aterro sanitário têm previsão de funcionamento até o ano de 2027 podendo ser prorrogado por mais 5 anos, operando assim até 2032, o quantitativo de RSU do aterro sanitário no período de 2018 a 2032 será projetado, ou seja, será realizada uma projeção do quanto de RSU será produzido nesse período. Para essa projeção a partir de 2018 além do RSU de Macapá e da iniciativa privada que são depositados no aterro sanitário, será considerado também o quantitativo proveniente da cidade de Santana-AP e da cidade de Mazagão-AP, cidades vizinhas de Macapá, pois os RSU das mesmas passarão a ser depositados no aterro sanitário em questão.

Em relação a Santana foi verificado que seu crescimento populacional no mesmo período de 2010 a 2017 foi de 1,9% e esse será percentual usado para projetar

a produção de resíduos da cidade de Santana que será depositado no aterro sanitário de Macapá.

Na cidade de Mazagão foi verificado um crescimento populacional de 2010 a 2017 de 2,58%, que será percentual usado para projetar a produção de resíduos da cidade de Mazagão que será depositado no aterro sanitário de Macapá.

Na Tabela 11 abaixo se observa a deposição de resíduo no período de 2013 a 2032 no aterro sanitário de Macapá levando em consideração os dados acima mencionados. A faixa em destaque representa dados coletados diretamente com a SEMUR, a partir de 2018 são dados de coleta de resíduos projetados.

Tabela 11 - Estimativa de deposição de RSU no aterro de Macapá.

ESTIMATIVA DE RSU DEPOSITADO NO ATERRO SANITÁRIO DE MACAPÁ					
Ano	Tonelada				TOTAL
	Macapá	Santana	Mazagão	Terceiros	
2013	74.624,44				74.624,44
2014	84.888,52				84.888,52
2015	86.758,76				86.758,76
2016	86.507,95				86.507,95
2017	91.290,96				91.290,96
2018	93.609,75	12.810	985,15	25.925	133.329,90
2019	95.987,44	13.053,39	1.010,57	26.583,50	136.634,89
2020	98.425,52	13.301,40	1.036,64	27.258,72	140.022,28
2021	100.925,53	13.554,13	1.063,38	27.951,09	143.494,13
2022	103.489,04	13.811,66	1.090,82	28.661,04	147.052,56
2023	106.117,66	14.074,08	1.118,96	29.389,04	150.699,74
2024	108.813,05	14.341,49	1.147,83	30.135,52	154.437,88
2025	111.576,90	14.613,98	1.177,45	30.900,96	158.269,28
2026	114.410,95	14.891,64	1.207,82	31.685,84	162.196,26
2027	117.316,99	15.174,58	1.238,99	32.490,66	166.221,22
2028	120.296,84	15.462,90	1.270,95	33.315,93	170.346,62
2029	123.352,38	15.756,70	1.303,74	34.162,15	174.574,97
2030	126.485,53	16.056,07	1.337,38	35.029,87	178.908,85
2031	129.698,26	16.361,14	1.371,88	35.919,63	183.350,91
2032	132.992,60	16.672	1.407,28	36.831,99	187.903,86

Adaptado de SEMUR (2017).

4.3 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

Com os quantitativos de RSU das células de aterro controlado e aterro sanitário em mãos, pode ser realizado o levantamento do quantitativo de biogás gerado em cada uma das células. E para que a projeção da produção de biogás seja calculada os dados coletados e levantados serão introduzidos no software de amostragem LandGEM, versão 3.02, que é utilizado para realização desse tipo de trabalho. Desenvolvido pela USEPA em 2005, o mesmo está disponível gratuitamente na internet. Nele são introduzidos dados de entrada para que se possa realizar a estimativa da geração de metano. Alguns exemplos de dados de entrada são: o ano de abertura e fechamento do aterro, quantidade de resíduo anual depositado no aterro, além de poder introduzir manualmente os valores de K e L_0 .

Pode-se realizar uma relação direta com o clima da cidade para determinar a taxa de geração de metano K e o potencial de geração de metano L_0 . Segundo dados do INMET (2018), a taxa de precipitação anual de Macapá é de 2549,7mm, sofrendo variação ano a ano sempre em um intervalo de 2.300mm a 2.700mm. A temperatura média em Macapá gira em torno de 27,1°C, sendo que a temperatura máxima do mês mais quente (outubro) é em torno de 28,5°C e a temperatura mais baixa do mês mais frio (fevereiro e março) é de 26,0°C. A umidade relativa apresenta uma média anual de 82,2%. Apesar do nível de precipitação anual ser relativamente alto, Macapá apresenta um período de estação seca entre os meses de agosto a novembro, a maior parte das precipitações ocorre no período das chuvas de dezembro a julho.

Avaliando a situação climática de Macapá, considerando que se alternam entre o período chuvoso e o seco, podemos considerar que a cidade se encaixa em um clima de umidade média. Para tal situação será usado $K = 0,1$ (1/anos), e $L_0 = 0,16$ m^3CH_4/kg ou 160 m^3CH_4/ton .

Dentro do quantitativo de RSU levantado em relação à célula de aterro controlado, e também com informações a respeito do clima de Macapá que da base para determinação das constantes K e L_0 , abaixo podemos ver na Tabela 12 o quantitativo de metano gerado por ano (m^3CH_4/ano) e por hora (m^3CH_4/h). Considerando o intervalo de 2007 até 2052. No Apêndice A estão os dados de entrada que foram usados no LandGEM assim como o Layout do software com esses dados, para a modelagem na célula de aterro controlado.

Tabela 12 - Vazão de metano do aterro controlado de Macapá

VAZÃO DE METANO DO ATERRO CONTROLADO DE MACAPÁ					
Ano	m ³ CH ₄ /ano	m ³ CH ₄ /h	Ano	m ³ CH ₄ /ano	m ³ CH ₄ /h
2007	0	0	2030	966.285,91	110,31
2008	1.103.900,40	126,02	2031	874.331,65	99,81
2009	2.144.844,13	244,85	2032	791.127,99	90,31
2010	3.372.787,91	385,02	2033	715.842,21	81,72
2011	3.635.244,56	414,98	2034	647.720,82	73,94
2012	4.564.220,67	521,03	2035	586.082,03	66,90
2013	5.289.398,28	603,81	2036	530.308,95	60,54
2014	4.786.045,48	546,35	2037	479.843,38	54,78
2015	4.330.593,04	494,36	2038	434.180,25	49,56
2016	3.918.482,62	447,32	2039	392.862,53	44,85
2017	3.545.589,70	404,75	2040	355.476,72	40,57
2018	3.208.182,23	366,23	2041	321.648,64	36,71
2019	2.902.883,32	331,38	2042	291.039,72	33,22
2020	2.626.637,45	299,84	2043	263.343,63	30,06
2021	2.376.679,85	271,31	2044	238.283,17	27,20
2022	2.150.508,86	245,49	2045	215.607,53	24,61
2023	1.945.860,88	222,13	2046	195.089,76	22,27
2024	1.760.687,70	200,99	2047	176.524,51	20,15
2025	1.593.136,14	181,86	2048	159.725,98	18,23
2026	1.441.529,19	164,56	2049	144.526,05	16,50
2027	1.304.349,55	148,90	2050	130.772,57	14,93
2028	1.180.224,28	134,73	2051	118.327,92	13,51
2029	1.067.911,09	121,91	2052	107.067,53	12,22

Com os dados da Tabela 12 acima, as figuras 23 e 24 mostram gráficos do comportamento da geração de metano anual e por hora na célula de aterro controlado de Macapá, tendo seu ápice no ano de 2013.

Figura 23 - Geração de metano por ano do aterro controlado de Macapá

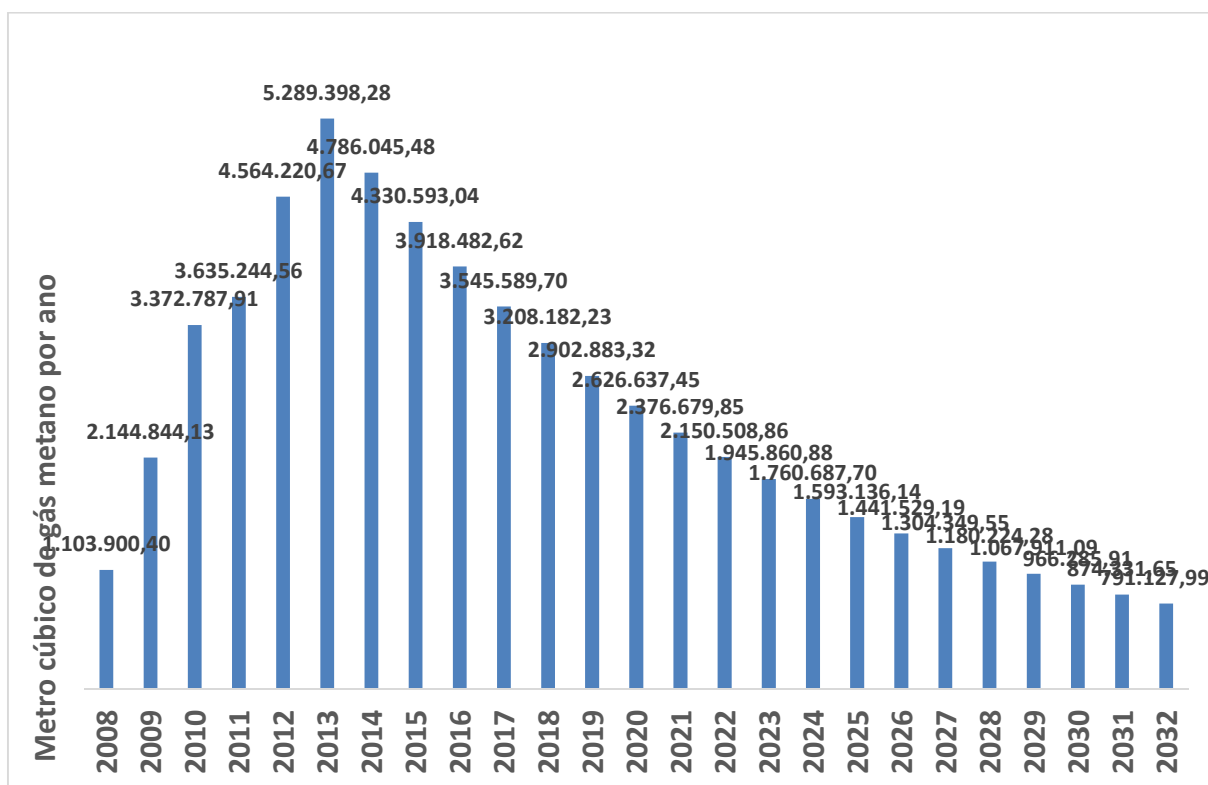
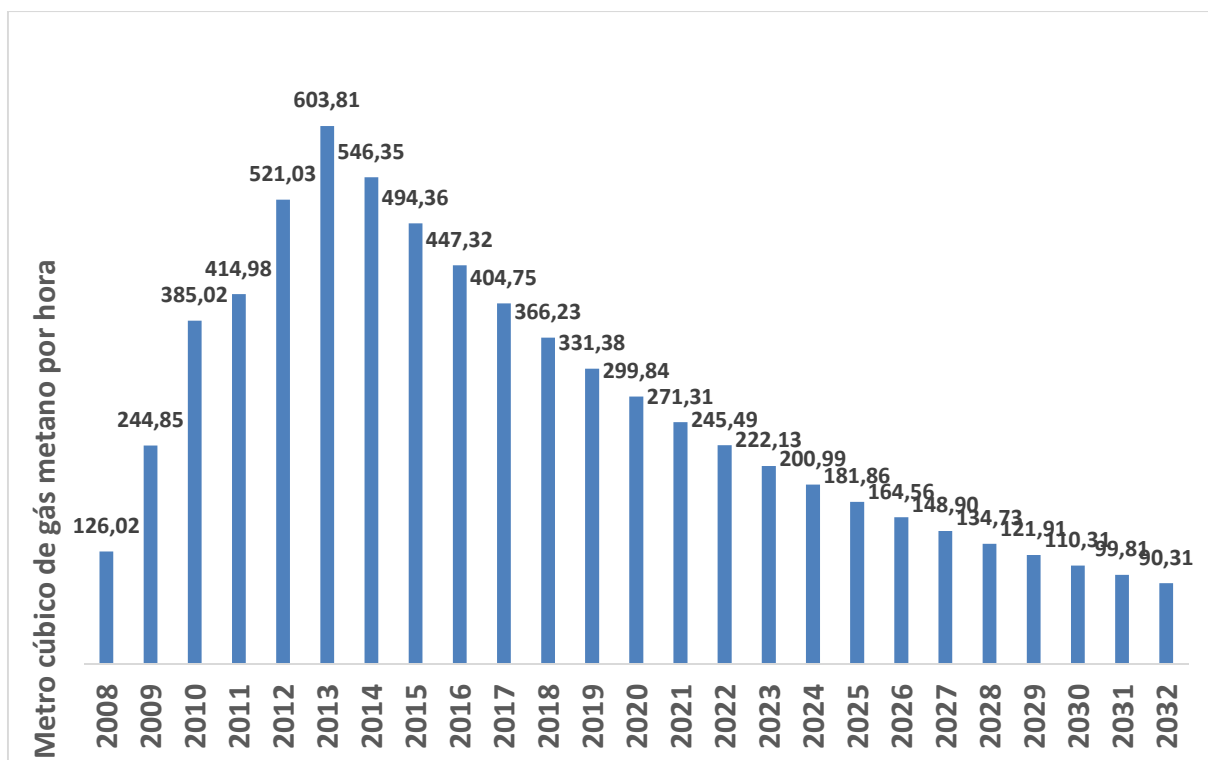


Figura 24 - Geração de metano por hora do aterro controlado de Macapá



Para a célula de aterro sanitário, realizando o mesmo levantamento com a utilização da ferramenta LandGEM e considerando a operação por completo com deposição de resíduos desde 2013 à 2032, na Tabela 13 a seguir é possível verificar a projeção com o potencial de geração de metano até o ano de 2052. No Apêndice B estão os dados de entrada que foram usados no LandGEM assim como o Layout do software com esses dados, para a modelagem na célula de aterro sanitário.

Tabela 13 - Vazão de metano do aterro sanitário de Macapá

VAZÃO DE METANO DO ATERRO SANITÁRIO DE MACAPÁ					
Ano	m³CH₄/ano	m³CH₄/h	Ano	m³CH₄/ano	m³CH₄/h
2013	0	0	2033	21.972.863,59	2508,32
2014	1.141.923,33	130,35	2034	19.881.869,15	2269,62
2015	2.332.242,02	266,23	2035	17.989.859,15	2053,64
2016	3.437.905,82	392,45	2036	16.277.897,70	1858,21
2017	4.434.513,84	506,22	2037	14.728.850,93	1681,38
2018	5.409.472,97	617,51	2038	13.327.215,45	1521,37
2019	6.934.943,71	791,66	2039	12.058.963,21	1376,59
2020	8.365.820,54	955,00	2040	10.911.401,14	1245,59
2021	9.712.366,18	1108,72	2041	9.873.044,03	1127,06
2022	10.983.898,27	1253,87	2042	8.933.499,67	1019,81
2023	12.188.880,14	1391,42	2043	8.083.364,77	922,76
2024	13.335.002,90	1522,26	2044	7.314.130,91	834,95
2025	14.429.259,80	1647,18	2045	6.618.099,33	755,49
2026	15.478.013,44	1766,90	2046	5.988.303,91	683,60
2027	16.487.056,70	1882,08	2047	5.418.441,45	618,54
2028	17.461.667,85	1993,34	2048	4.902.808,57	559,68
2029	18.406.660,42	2101,22	2049	4.436.244,65	506,42
2030	19.326.428,42	2206,21	2050	4.014.080,15	458,23
2031	20.224.987,17	2308,79	2051	3.632.089,92	414,62
2032	21.106.010,36	2409,36	2052	3.286.450,87	375,17

Assim como feito para a tabela de vazão de metano do aterro controlado, as Figuras 25 e 26 a seguir mostram o comportamento da geração de metano anual e por hora na célula de aterro sanitário de Macapá, tendo seu ápice no ano de 2033.

Figura 25 - Geração de metano por ano do aterro sanitário de Macapá

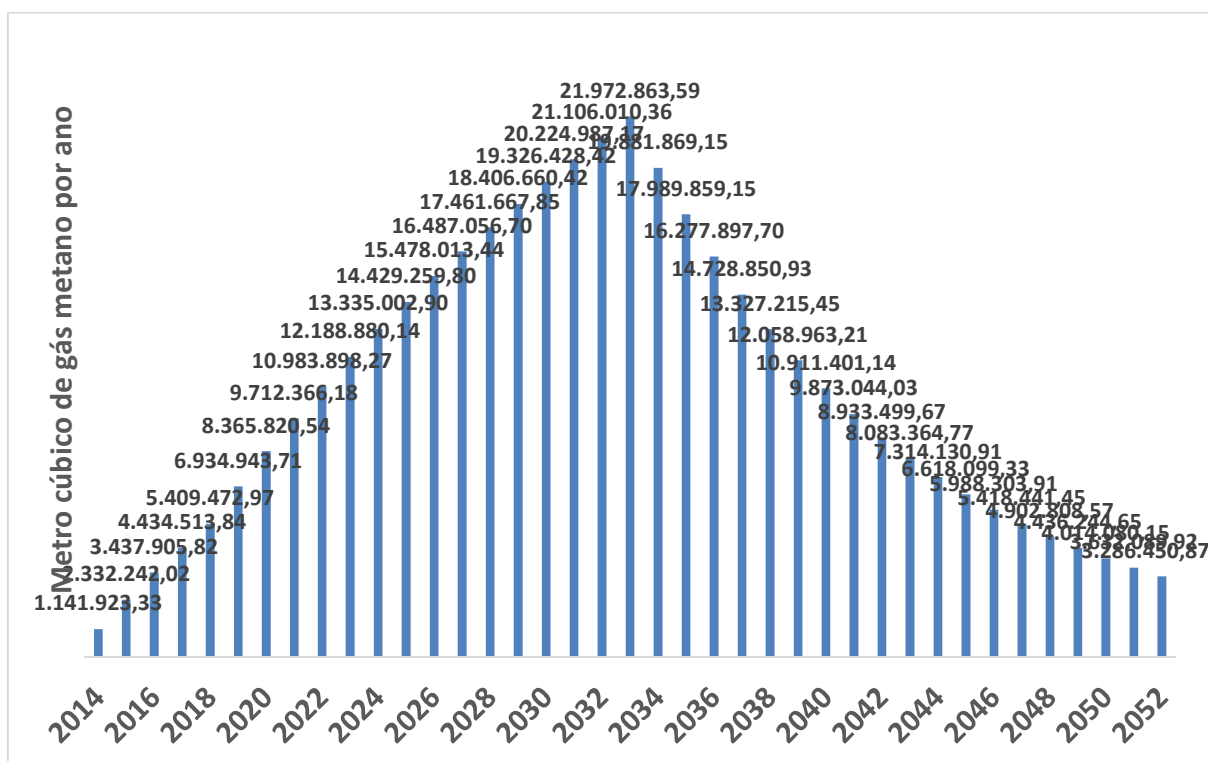
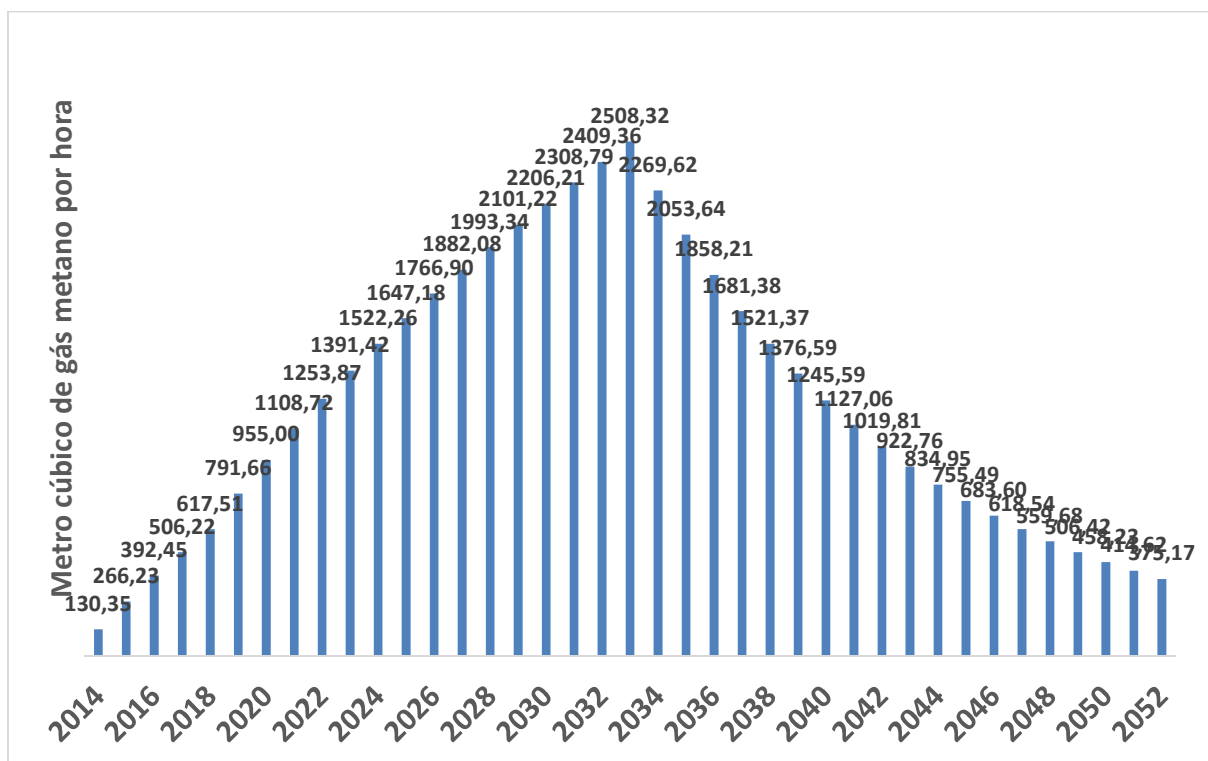


Figura 26 - Geração de metano por hora do aterro sanitário de Macapá



4.4 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Tendo sido levantado os dados de vazão de metano no item 4.3 com a utilização da ferramenta LandGEM, o próximo passo está em levantar a potência e a energia disponível. Para esse levantamento é necessário informações a respeito das propriedades físico-químicas do metano, principalmente do seu poder calorífico inferior e superior (PCI e PCS). A Tabela 14 abaixo pode-se observar essas informações sobre o metano.

Tabela 14 - Propriedades físicas e químicas do metano

CARACTERÍSTICA	RESULTADO
Peso molecular	16,04 u.m.a
Ponto de ebulição, a 1,00 atm	-161,49 °C
Ponto de congelamento, a 1,00 atm	-182,48 °C
Pressão crítica	45,84 atm
Temperatura crítica	-82,50 °C
Peso específico (0°, 1,00 atm)	0,718 kg/m³
Poder calorífico superior (0°, 1,00 atm)	9.520,00 kcal/m³
Poder calorífico inferior (0°, 1,00 atm)	8.550,00 kcal/m³
Relação ar/combustível	9,53 litros/1 litro
Limites de inflamabilidade	5,00 a 15,00% em vol.
Número de octanos	130,00
Temperatura de ignição	650,00 °C
Energia para ignição	300,00µJ
Velocidade da chama	0,40m/s

Adaptado de Craveiro (1982)

O cálculo de potência será feito através da seguinte equação:

$$P_x = \frac{Q_x \cdot n \cdot PCI}{860000} \quad (6)$$

Onde:

P_x: Potência disponível a cada ano (MW)

Q_x: Vazão de metano captado (m³CH₄/h)

PCI: Poder calorífico do metano = 9,87887 kWh/m³CH₄

n: Eficiência do grupo gerador = 30%

Com o valor a potência disponível calculado, pode-se calcular o valor da energia elétrica disponível através da equação abaixo:

$$E = P_x \cdot 24 \cdot \text{Disp} \quad (7)$$

Onde:

E: Energia disponível (MWh/ano);

P_x: Potência disponível (MW);

24: h/dia;

Disp: Disponibilidade = 7920h/ano = 0,9041 = 90,41%

4.4.1 Potencial de geração de energia elétrica da célula de aterro controlado

Como o aterro de Macapá apresenta célula de aterro controlado e de aterro sanitário, optou-se por apresentar o potencial de geração de energia elétrica de forma separada, sendo que nesse primeiro momento será apresentado o potencial da célula com características de aterro controlado.

A tabela 15 abaixo ilustra a potência disponível e a energia disponível para a célula de aterro controlado. Em seguida, os gráficos com as curvas do comportamento da potência e energia disponíveis, nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

Tabela 15 - Potência e energia disponível no aterro controlado de Macapá

POTÊNCIA E ENERGIA DISPONÍVEL EM FUNÇÃO DA VAZÃO DE METANO NA CÉLULA DE ATERRO CONTROLADO DE MACAPÁ					
Ano	Potência Disponível (MW)	Energia Disponível (MWh/dia)	Ano	Potência Disponível (MW)	Energia Disponível (MWh/dia)
2007	0	0	2030	0,2617	5,6776
2008	0,2989	6,4862	2031	0,2368	5,1373
2009	0,5808	12,6025	2032	0,2142	4,6484
2010	0,9133	19,8175	2033	0,1938	4,2061
2011	0,9844	21,3596	2034	0,1754	3,8058
2012	1,2359	26,8180	2035	0,1587	3,4436
2013	1,4323	31,0789	2036	0,1436	3,1159
2014	1,2960	28,1214	2037	0,1299	2,8194
2015	1,1727	25,4453	2038	0,1176	2,5511
2016	1,0611	23,0238	2039	0,1064	2,3083
2017	0,9601	20,8328	2040	0,0963	2,0887
2018	0,8687	18,8503	2041	0,0871	1,8899
2019	0,7861	17,0565	2042	0,0788	1,7101
2020	0,7113	15,4333	2043	0,0713	1,5473
2021	0,6436	13,9647	2044	0,0645	1,4001
2022	0,5823	12,6358	2045	0,0584	1,2668
2023	0,5269	11,4333	2046	0,0528	1,1463
2024	0,4768	10,3453	2047	0,0478	1,0372
2025	0,4314	9,3608	2048	0,0433	0,9385
2026	0,3903	8,4700	2049	0,0391	0,8492
2027	0,3532	7,6640	2050	0,0354	0,7684
2028	0,3196	6,9346	2051	0,0320	0,6953
2029	0,2892	6,2747	2052	0,0290	0,6291

Adaptado de EPA (2005) e SEMUR (2017).

Figura 27 - Potência disponível em MW no aterro controlado de Macapá

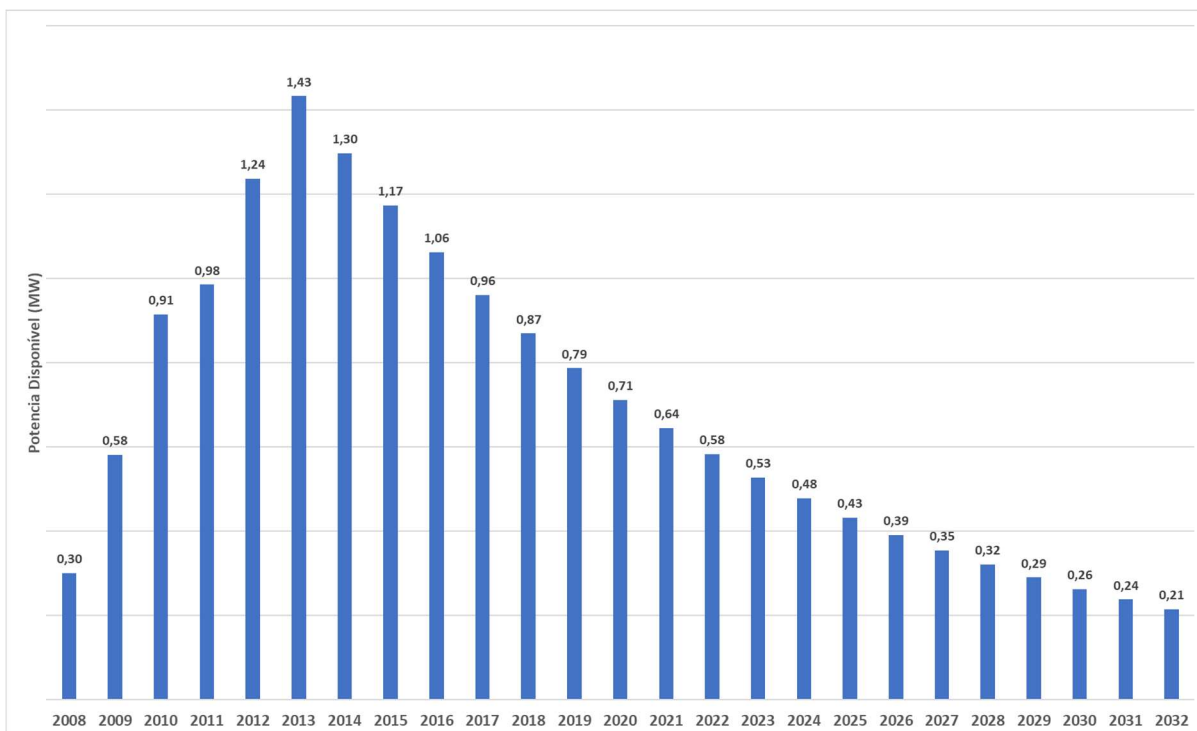
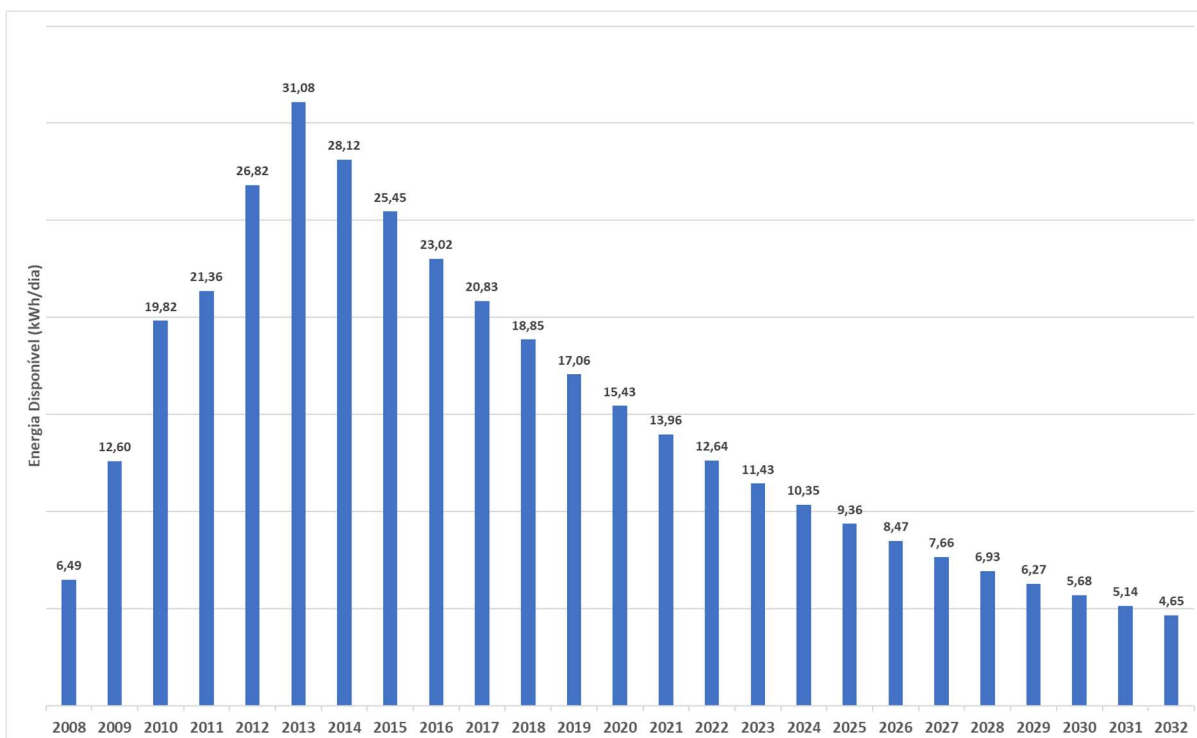


Figura 28 - Energia disponível em MW no aterro controlado de Macapá



4.4.2 Potencial de geração de energia elétrica da célula de aterro sanitário

Do mesmo modo de como foi feito para o aterro controlado, através dos dados obtidos em campo e das equações, foi possível calcular os valores de potência e energia disponível no aterro sanitário de Macapá. A Tabela 16 a seguir mostra as quantidades potência e energia disponíveis para a célula de aterro sanitário.

Assim como ilustrado nas tabelas da célula do aterro controlado, foram feitas também as montagens das curvas características de potência e energia disponíveis no aterro sanitário com o passar dos anos. As Figuras 29 e 30 ilustram esses dados.

Tabela 16 - Potência e energia disponível no aterro sanitário de Macapá

POTÊNCIA E ENERGIA DISPONÍVEL EM FUNÇÃO DA VAZÃO DE METANO NA CÉLULA DE ATERRO SANITÁRIO DE MACAPÁ					
Ano	Potência Disponível (MW)	Energia Disponível (MWh/dia)	Ano	Potência Disponível (MW)	Energia Disponível (MWh/dia)
2013	0	0	2033	5,9500	129,1060
2014	0,3092	6,7096	2034	5,3837	116,8200
2015	0,6315	13,7036	2035	4,8714	105,7031
2016	0,9309	20,2001	2036	4,4078	95,6441
2017	1,2008	26,0559	2037	3,9884	86,5424
2018	1,4648	31,7845	2038	3,6088	78,3068
2019	1,8779	40,7477	2039	3,2654	70,8549
2020	2,2654	49,1551	2040	2,9547	64,1122
2021	2,6300	57,0670	2041	2,6735	58,0111
2022	2,9743	64,5381	2042	2,4191	52,4906
2023	3,3006	71,6183	2043	2,1889	47,4955
2024	3,6109	78,3525	2044	1,9806	42,9757
2025	3,9073	84,7821	2045	1,7921	38,8860
2026	4,1912	90,9442	2046	1,6216	35,1855
2027	4,4645	96,8731	2047	1,4672	31,8372
2028	4,7284	102,5996	2048	1,3276	28,8075
2029	4,9843	108,1521	2049	1,2013	26,0661
2030	5,2333	113,5564	2050	1,0870	23,5855
2031	5,4767	118,8360	2051	0,9835	21,3411
2032	5,7152	124,0127	2052	0,8899	19,3102

Figura 29 - Potência disponível em MW no aterro sanitário de Macapá

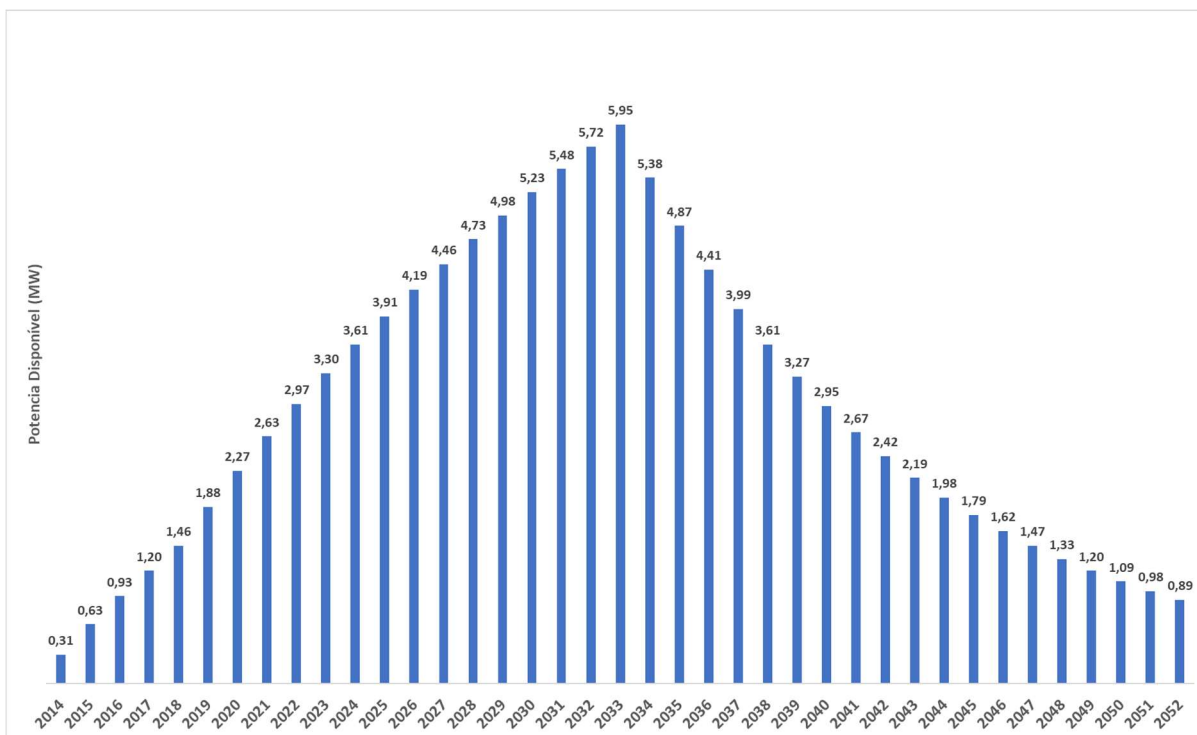
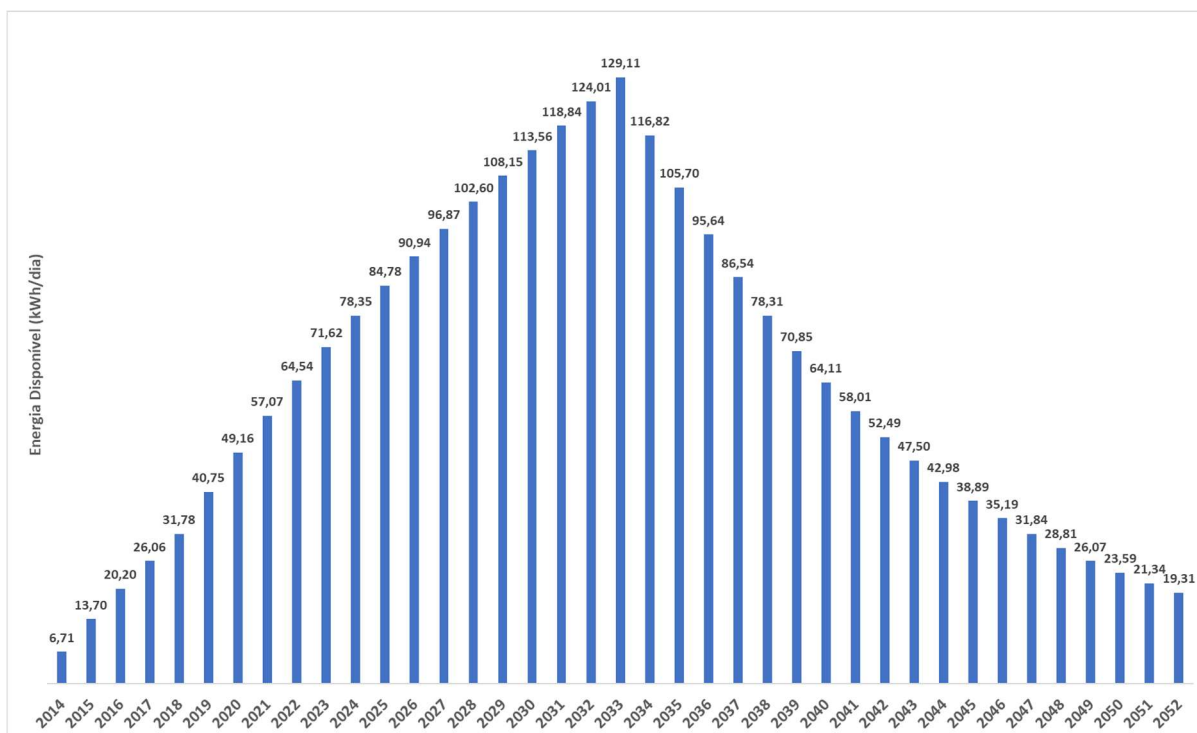


Figura 30 - Energia disponível em MW no aterro sanitário de Macapá



Observa-se que as curvas de potência disponível e energia disponível seguem o mesmo padrão da curva de geração de metano, onde essa tem seu ápice no ano

seguinte ao último ano em que ocorreu deposição de resíduos em ambas as células tanto de aterro controlado quanto de aterro sanitário. O decaimento é consequência da degradação da matéria orgânica no tempo, que é definida pela constante K.

Com o levantamento realizado chegou-se a resultados de instalações de unidades geradoras, levando em consideração a potência disponível, para assim determinar a potência geradora em determinado intervalo em anos. A Tabela 17 abaixo ilustra esses dados.

Tabela 17 - Unidades de geração por intervalo em anos

Potência Gerada por Hora	Tempo de Duração		
	Anos	Início	Término
1 MW	34	2017	2050
2 MW	24	2020	2043
3 MW	17	2023	2039
4 MW	11	2026	2036
5 MW	5	2030	2034

Observamos nesse capítulo o potencial de energia que o CTR de Macapá pode fornecer, para os devidos levantamentos foi trabalhado apenas um cenário onde se considerou que todo o gás metano produzido foi captado pelo sistema de captação para geração de energia, também trabalhando sempre com os dados que mais se aproximam da realidade do CTR. Com tudo pode ser verificado que existe um grande potencial a ser explorado em se tratando do potencial energético para instalação de usina geradora de energia elétrica na célula de aterro sanitário, pois além de apresentar melhores condições, sua previsão de fechamento é para o ano de 2032, e esse ano de fechamento se apresenta com uma visibilidade melhor para seu aproveitamento.

A célula de aterro controlado teve seu fechamento em 2012, portanto, perdeu-se o momento de maior geração de gás para aproveitamento energético, e com a baixa produção atual de metano faz com que o interesse em desenvolver alguma atividade de geração de energia nessa célula pareça menos atrativo, porém, não se pode afirmar que esta célula não possui viabilidade para instalação de uma usina de geração, somente pode-se afirmar tal condição se for realizada a análise desta célula.

5 VIABILIDADE ECONÔMICA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS DO CENTRO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS MACAPÁ

Para o levantamento da viabilidade econômica, ou seja, o cálculo do custo da energia gerada pelo aterro sanitário de Macapá se faz necessária a identificação de todas as despesas da implantação e execução do projeto.

Para esse levantamento será tratada apenas a célula com características de aterro sanitário, pois, a célula de aterro controlado teve seu fechamento em 2012, logo, o momento de maior geração de metano e conseqüentemente de maior geração energia elétrica já passou, sendo assim optou-se por realizar a análise de viabilidade econômica apenas com a célula de aterro sanitário. A célula de aterro sanitário tem seu fechamento previsto para 2032, dando assim condições para um maior aproveitamento de biogás por consequência de geração de energia.

Com relação ao cenário a ser avaliado, será o mesmo cenário apresentado para o estudo do potencial de geração de energia, onde foi realizado levantamento de dados com intensão de se chegar ao cenário mais próximo do realista, porém, considerando que todo o gás metano produzido foi captado pelo sistema de captação para geração de energia, nessas condições, a usina trabalhada terá geração de 3MW no período de 17 anos. Optou-se por essa usina nesse período por se tratar da condição que apresenta o melhor aproveitamento energético dentro das opções de usinas que poderiam ser instaladas. Dentro desse cenário em alguns casos será trabalhado valores médios como por exemplo taxa de compra de biogás.

Dentro do levantamento das despesas, o primeiro passo foi levantar o custo da implantação da usina de geração de energia elétrica, junto com o custo da implantação do sistema de coleta e tratamento do biogás de aterro sanitário. O segundo passo foi realizar o levantamento dos custos de operação e manutenção do sistema de geração. O terceiro passo foi realizar o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), conseqüentemente o cálculo do Valor Presente Líquido Anualizado (VPLa), relacionando o VPLa com a energia produzida em um ano conseguiu-se obter o valor do custo da energia elétrica gerada.

Para esse levantamento da viabilidade econômica da geração de energia elétrica na célula de aterro sanitário de Macapá, foi utilizado como base a metodologia e o trabalho de Vanzin (2006), onde este reuniu um banco de dados com informações

de estudos realizados pelo Banco Mundial (2005) de pré-viabilidade de geração de energia a partir do biogás de aterros sanitários.

5.1 DESPESA INICIAL: IMPLANTAÇÃO DA USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, SISTEMA DE CAPTAÇÃO E SISTEMA DE TRATAMENTO

Para a realização do cálculo do custo inicial que engloba o investimento na usina de geração de energia elétrica, no sistema de coleta do biogás e no sistema de tratamento do biogás, foi utilizada a metodologia elaborada por Vanzin (2006), sendo que essa metodologia se baseia em estudos realizados pelo Banco Mundial (2005), esses estudos são referentes à pré-viabilidade de recuperação de biogás, recuperação energética nos aterros sanitários das seguintes localidades: Meribeca, Pernambuco, Brasil; Gramacho, Rio de Janeiro, Brasil; Montevideu, Uruguai; Queretaro, México; Chihuahua, México; Huaycoloro, Peru; El Combeima, Colômbia; La Esmeralda, Colômbia; El Carrasco Colômbia.

Com as informações dos aterros acima citados, Vanzin (2006) reuniu em um banco de dados, os valores referentes aos custos da geração de eletricidade, da infraestrutura de coleta do biogás e da capacidade de disposição dos resíduos sólidos. Com esse banco de dados Vanzin (2006) desenvolveu uma equação que tem como objetivo obter o valor do investimento inicial baseado na potência de geração (MW), valor esse que engloba apenas a usina de geração de energia elétrica. Segue abaixo a equação desenvolvida por Vanzin (2006):

$$\text{Inv. U. G. (milhões US\$)} = 0,08032049 + 0,9616 \cdot (\text{PI}) \quad (8)$$

Onde:

Inv. U. G. = Investimento na usina de geração;

PI = Potência instalada (MW)

Esse valor referente ao investimento na usina de geração representa cerca de 40% a 60% do investimento inicial total, sendo assim, o restante do investimento inicial engloba o valor a ser investido para implantação do sistema de captação e tratamento do biogás. Dentro do cenário trabalhado em questão, será proposto que o valor do investimento inicial da usina de geração será de 50%, sendo assim o restante, ou seja,

os outros 50 % será referente ao valor de investimento inicial para o sistema de captação e tratamento de biogás.

5.2 DESPESAS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DA USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dando continuidade ao levantamento dos custos, segundo Vanzin (2006), para calcular o valor do custo anual de manutenção e operação da usina de geração de energia elétrica, este estimou que o custo está em torno de US\$0,018 por kWh, sendo assim esse custo é baseado na potência instalada, nesse caso 3MW, e baseado também na disponibilidade.

5.3 DESPESAS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DO SISTEMA DE CAPTAÇÃO E GERENCIAMENTO DO BIOGÁS

Em relação aos custos referentes a manutenção e operação do sistema de captação e gerenciamento do biogás, segundo Vanzin (2006), este custo tem relação com o investimento inicial do mesmo sistema, sendo que este representa um valor anual que é estimado em 5% do investimento inicial.

5.4 DESPESAS COM COMPRA DE BIOGÁS

Dentro do cenário que vem sendo trabalhado o valor da compra do biogás será de US\$0,35 por MMBtu, de acordo com o estudo de Vanzin (2006). Sendo que para esse cálculo $1\text{MMBtu} = 30,303\text{m}^3\text{CH}_4$. Para a geração de energia elétrica de 3MW é necessária uma vazão de metano de $12.188.880,14\text{m}^3\text{CH}_4$ por ano considerando os dados apresentados na Tabela 13 dentro daquilo que foi usado para geração de energia no aterro, sendo que este representa 60% do biogás captado, então o biogás captado é de $20.314.801,66\text{m}^3$. Por mais que o Biogás usado para geração de energia seja o CH_4 , é captado o biogás por completo, então a compra deve considerar o biogás como todo, usando o fator de conversão de MMBtu do metano tem-se mais segurança no levantamento de custo.

Com os levantamentos realizados chegou-se a quantidade anual de 670.389,13 MMBtu. Sendo assim uma despesa anual de US\$234.636,20.

5.5 DESPESAS INDIRETAS A GERAÇÃO DE ENERGIA

Os custos indiretos, a geração de energia, serão levantados com base no trabalho de Leal (2012), onde com informações da Prefeitura Municipal de Macapá, estimou esse custo em US\$140.065,95 mensal no ano de 2011, para uma cotação do dólar em R\$ 2,00. Sendo que naquele ano foram depositados no aterro 83.315,44 toneladas de resíduos sólidos. O valor dessa despesa era de R\$280.131,90 reais mensais ou R\$3.361.582,80 anuais.

Foi realizada uma previsão dos custos indiretos, tendo como base o levantamento realizado por Leal (2012). No levantamento do custo anual realizado aqui, foram levantados os custos no ano de início do projeto em 2023, e do ano de término e fechamento em 2039. Com os resultados dos dois fez-se uma média anual do valor das despesas, conforme ilustrada na Tabela 18 abaixo.

Tabela 18 – Custos Indiretos a Geração de energia elétrica

Pesquisa	Tonelada/dia	Total em RS (20 anos)	Arrecadação por ano	
			RS	US\$
2039	616,08	159.014.348,01	7.950.717,40	2.208.532,61
2023	494,1	127.530.498,24	6.376.524,91	1.771.256,92
Média Anual	555,09	143.272.423,12	7.163.621,16	1.989.894,77
Leal	273,17	70.505.767,88	3.525.288,39	979.246,78

5.6 VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

O VPL se trata de um método para calcular o valor presente de um fluxo de caixa que apresenta lançamentos futuros, com a dedução de uma taxa referente ao custo de capital. Com esse mecanismo é possível ver a viabilidade econômica de um projeto dentro de um período, intervalo de tempo. Esse cálculo de VPL se faz necessário, pois o dinheiro que entrará no futuro não terá o mesmo valor que no tempo presente.

O VPL consiste em trazer para a data presente todos os fluxos de caixa de determinado projeto de investimento, somando o mesmo com o montante do investimento inicial. Com isso é possível avaliar a viabilidade de determinado projeto.

Com o resultado do valor do VPL pode-se inferir três interpretações diferentes: se o resultado do VPL for positivo isso quer dizer que o investimento no projeto é lucrativo, ou seja, existe viabilidade na execução do projeto. Se o resultado do VPL for neutro, isso quer dizer que o investimento não terá nem lucro e nem prejuízo, ele será apenas capaz de se pagar. E se o resultado do VPL for negativo isso quer dizer que o investimento não tem viabilidade, ocasionando perdas e prejuízos.

Para esse trabalho o cálculo do VPL será realizado através de planilha eletrônica, e para tal será usada a função abaixo:

$$= \text{VPL}(i; V_i; V_f) + I_i$$

Sendo:

i = taxa de juros;

V_i = saldo entre receita e despesa no ano inicial;

V_f = saldo entre a receita e despesa no ano final;

I_i = investimento inicial.

O VPL calculado aqui desconsidera valores de receita de venda de energia, pois a intenção é exatamente identificar o custo da energia. Para este trabalho existe a possibilidade de receita através da venda dos créditos de carbono, porém optou-se por não considerar este também no cálculo do VPL.

O cálculo do VPL através da função anterior é baseado na equação a seguir:

$$\text{VPL} = C_0 + \sum_{n=1} \frac{C_n}{(1+i)^n} = Fc_0 + \frac{Fc_1}{(1+i_1)^1} + \frac{Fc_2}{(1+i_2)^2} + \frac{Fc_n}{(1+i_n)^n} \quad (9)$$

Sendo:

C_0 = fluxo de caixa na data zero;

C_n = fluxo de caixa feito no período n ;

n = número do período em que foi feito determinado fluxo;

i = taxa de juros corrente no período n .

5.7 VALOR PRESENTE LÍQUIDO ANUALIZADO (VPLA)

O VPLa se utiliza do VPL para fazer uma previsão de fluxo em valores fixos em um determinado período. Sendo assim com o VPLa tem-se uma previsão uniforme dos gastos anuais.

Para o cálculo do custo da energia elétrica gerada, o VPLa é fundamental, pois ele fará a previsão do gasto anual para a geração de energia elétrica no aterro sanitário de Macapá.

O VPLa pode ser calculado através de tabela eletrônica por meio da função abaixo:

$$= \text{PGTO} (i; n; \text{VPL})$$

Sendo:

i = taxa de juros;

n = período de atividades;

VPL = valor presente líquido.

O cálculo do VPLa através da função anterior referente à planilha eletrônica é baseado na equação 10 a seguir:

$$\text{VPLa} = \text{VPL} * \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10)$$

Sendo:

i = taxa de juros;

n = período de atividade;

VPL = valor presente líquido.

5.8 CÁLCULO DO CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA

Para o cálculo do custo da energia elétrica foi usado o método apresentado por Leal (2012), sendo que ainda que este não seja propriamente um método de análise econômica, através dele é possível estimar o custo de geração de energia.

Dentro desse método são considerados apenas dados referentes a despesas. Isso é de todo plausível haja vista que o interesse real é levantar o custo da geração

de energia elétrica no aterro sanitário de Macapá. Para a análise desse custo não foi considerado nenhum tipo de receita.

Com esse custo já estimado é possível fazer uma comparação do custo de geração de outras fontes de geração de energia elétrica como, por exemplo, fotovoltaica, eólica, combustíveis fósseis.

Segundo Leal (2012) a ideia base para esse método é que uma determinada quantidade de energia gerada, independentemente do método de geração ou da fonte de geração, possui um determinado custo. Através de um cálculo simples é possível identificar o custo da energia. A equação 11 a seguir mostra como é realizado o cálculo para estimar o custo de geração de energia.

$$CE = \frac{CCVa}{EC} \quad (11)$$

Sendo:

CE = custo da energia;

CCVa = custo do ciclo de vida anualizado do sistema (VPLa);

EC = energia elétrica consumida no período de um ano.

Segundo Leal (2012), utiliza-se no cálculo do custo acima a energia consumida e não a gerada, pois é a energia consumida que gera receitas para o projeto. Porém considera-se também que toda a energia gerada seja consumida, sendo assim pode-se considerar a energia consumida igual à energia gerada.

5.9 RESULTADOS DOS CUSTOS

Realizado o levantamento e cálculo dos custos referentes à geração de energia elétrica através do biogás proveniente do RSU do aterro sanitário de Macapá-AP, para um cenário que considera que todo o gás metano gerado é captado pelo sistema de captação e utilizado na usina de geração, considerando valores médios, uma usina de geração de 3MW por um período de 17 anos de geração com início em 2023 término em 2039, pode-se agora mostrar o valor global estimado do custo de geração em US\$/MWh e em R\$/MWh.

Com o resultado do VPLa foi possível realizar o cálculo do custo da energia chegando ao seguinte resultado como mostra a Tabela 19 abaixo, sendo que esses

resultados não consideram valores dos custos referentes a despesas indiretas a geração de energia no aterro sanitário:

Tabela 19 – Custo da Energia Gerada sem Considerar Custos Indiretos

Potencia (MWh/ano)	Custo Anual (US\$)	Custos	
		US\$/MWh	R\$/MWh
23.760	1.439.074,19	60,57	229,56

Para cálculo do custo da energia, na Tabela 20 a seguir foi realizado o mesmo mecanismo que deu os resultados da tabela 19 acima, porém foram considerados nos cálculos agora valores dos custos referentes a despesas indiretas a geração de energia no aterro sanitário referentes ao período de 2023 a 2039, intervalo estimado para operação do projeto de geração de energia.

Tabela 20 – Custo da Energia Gerada Considerando Custos Indiretos

Potencia (MWh/ano)	Custo Anual (US\$)	Custos	
		US\$/MWh	R\$/MWh
23.760	3.428.968,26	144,32	546,97

É possível observar que ocorre uma grande diferença no custo da geração de energia no aterro sanitário de Macapá, quando no primeiro momento como mostrado na tabela 19 onde não se considerou os custos referentes a despesas indiretas a geração de energia no aterro sanitário e no segundo momento tabela 20 onde foi considerado esse custo.

No primeiro momento será realizada uma análise do custo da geração de energia elétrica a partir biogás proveniente do aterro sanitário de Macapá-AP comparando esse custo com o custo de geração de energia de outras fontes de geração. Ainda na análise foram considerados 2 casos, caso 1: geração a partir do biogás do aterro de Macapá sem considerar os custos referentes a despesas indiretas a geração de energia no aterro sanitário; caso 2: geração a partir do biogás de aterro de Macapá considerando os custos referentes a despesas indiretas a geração de energia no aterro sanitário. Na Tabela 21 abaixo é feita uma comparação entre os custos referentes a geração de energia elétrica por diferentes fontes, entre as fontes comparadas estão: fotovoltaica, eólica, biomassa e biogás do aterro sanitário de Macapá.

Tabela 21 – Comparativo de Custos de Geração de Energia

Fonte	Custos		
	R\$/KWh	R\$/MWh	US\$/MWh
Fotovoltaica	0,98	980,00	272,22
Eólica	0,12	120,00	33,33
Biomassa	0,27	270,00	75,00
Biogás do Aterro de Macapá (Sem custos indiretos)	0,23	229,56	60,57
Biogás do Aterro de Macapá (Com custos indiretos)	0,54	546,97	144,32

Adaptado de ANEEL (2017)

Diante do exposto na Tabela 21 acima, percebe-se que o custo de geração de energia elétrica a partir do biogás do aterro sanitário de Macapá considerando o caso 1 tem valor dentro das médias dos custos das outras fontes de geração de energia elétrica em que foram comparadas.

Tentar fazer uma análise da receita da venda da energia elétrica gerada nesse projeto, é um pouco complicado devido ao fato do valor de venda do MWh não possuir constância, ou seja, o valor pago pelo MWh no mercado de venda de energia elétrica sofre muitas variações.

Fazendo um levantamento dos leilões de venda de energia elétrica no Brasil realizados em 2017, considerando o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) que tem suas diretrizes traçadas pela ANEEL, chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 22 abaixo que mostra o preço de venda em R\$/MWh de cada tipo de fonte geradora.

Tabela 22 – Valor Médio de Venda do MWh por Fonte em 2017

VALOR MÉDIO DE VENDA DO MWh NOS LEILÕES EM 2017 - R\$/MWh	
Solar	329,00
Eólica	276,00
Biomassa	329,00
Hidrelétrica	281,00

Fonte: ANEEL (2017).

Avaliando o preço de venda de energia em R\$/MWh por fonte, observa-se que a energia produzida pelo biogás do aterro sanitário de Macapá no caso 1, sem considerar os custos referentes a despesas indiretas a geração de energia no aterro

sanitário, considerando o preço de venda da fonte de geração mais barata que nesse caso é a energia eólica, e se fosse vendida a energia elétrica produzida no aterro sanitário a um valor de R\$ 276,00/MWh, observa-se que VPL apresentará um valor positivo mostrando assim a viabilidade do projeto. O Apêndice C apresenta o fluxo de caixa do projeto de geração de energia da usina de 3MW no período de 17 anos.

6 CONCLUSÃO

Foi apresentado nesse trabalho que o bom gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos pode acarretar no processo de recuperação energética do próprio resíduo. O CTR de Macapá-AP possui um tipo de tratamento já encerrado que é o caso da célula de aterro controlado, possui também um tipo de tratamento que está em funcionamento atualmente e que deve vigorar até 2032 que é a célula de aterro sanitário.

Com o tratamento adequado dos resíduos sólidos urbanos é possível implantar projetos de recuperação energética através do biogás proveniente do RSU de aterros sanitários, e esse processo de recuperação energética acarreta em diminuição da utilização de combustíveis fósseis, reduzindo assim impactos ambientais.

Conforme o estudo realizado nesse trabalho, concluiu-se que o CTR de Macapá-AP, em se tratando da célula de aterro sanitário, possui potencial de geração de energia elétrica bastante promissor, já a célula de aterro controlado pode parecer menos atrativa tendo em vista que esta teve seu fechamento em 2012.

Foi verificado que o ápice de geração energia elétrica da célula de aterro controlado se deu entre 2012 e 2016 com potência disponível para instalação de uma usina de 1MW. Já a célula de aterro sanitário terá seu ápice entre 2030 e 2034 com potência disponível para instalação de uma usina de 5MW.

Com relação a metodologia utilizada para projeção de geração de metano essa pode ser vista como adequada, pois trabalha com parâmetros reais dentro das características inerentes ao aterro sanitário de Macapá-AP, dados como fluxo anual de resíduo, constante de geração de metano, potencial de geração de metano, chegando assim muito próximo das condições reais do processo de geração de metano.

Dentro do que foi levantado concluiu-se que a melhor opção de geração seria na célula de aterro sanitário com a instalação de uma usina de 3MW com início em 2023 e término em 2039 sendo assim 17 anos de geração de energia com uma disponibilidade de 7920 horas de funcionamento por ano, gerando assim anualmente 23.760MWh, optou-se por essa usina de geração pois se comparada com as outras opções de instalação essa seria a usina que possui melhor aproveitamento energético.

Com o potencial de geração de energia elétrica levantado, foi feita uma análise econômica para obter o valor do custo dessa geração de energia, a geração de energia exige diversas despesas iniciais e anuais no decorrer do seu processo. Para o levantamento do custo não foi considerado nenhum tipo de receita no fluxo de caixa anual. Com o fluxo de caixa definido no período de 17 anos, foi feito o cálculo do valor presente líquido (VPL), esse teve valor negativo exatamente por considerar apenas custos. Posteriormente foi calculado o valor presente líquido anualizado (VPLa), esse apresentava o valor do custo no decorrer dos anos, dando assim uma visão de custo anual para geração de energia elétrica no aterro sanitário.

Projetado o fluxo de caixa chegou-se ao valor de custo da energia em dois casos diferentes, o primeiro caso não considera os custos referentes a despesas indiretas a geração de energia no aterro sanitário, e o segundo caso considerou essas despesas. Para o primeiro caso chegou-se a um custo de geração de energia elétrica de R\$229,56 por MWh e para o segundo caso o custo da geração de energia foi de R\$546,97 por MWh.

Para o levantamento dos custos de geração de energia não foram consideradas receitas, porém existe a possibilidade de implantação de um projeto de MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) no aterro sanitário, essa implantação pode acarretar na diminuição do custo de geração de energia elétrica no aterro sanitário através da venda dos créditos de carbono.

Com os custos levantados foi feita uma análise de venda dessa energia considerando os preços médios de venda de energia elétrica dos leilões realizados em 2017 no mercado regulado. O preço de venda mais barato em 2017 foi de fonte geradora eólica e seu preço foi de R\$276,00 por MWh. Se considerarmos esse o preço de venda para a energia gerada pelo biogás do aterro sanitário de Macapá-AP, pode-se observar que o segundo caso de custo de geração mostra inviável a sua geração, porém considerando o primeiro caso de custo de geração onde não se considera os custos referentes a despesas indiretas a geração de energia no aterro sanitário, este se torna viável, o próprio VPL calculado tem valor US\$5.248.692,82 positivo mostrando assim que a implantação do projeto de geração é viável economicamente.

Em relação a trabalhos futuros, além da possibilidade de implantação de um projeto MDL no aterro sanitário e com isso ter receita com a venda dos créditos de carbono, pode-se também realizar uma análise do biogás do aterro com um analisador

de biogás, com esse equipamento é possível ter mais credibilidade quanto a composição do biogás do aterro sanitário de Macapá, tendo mais exatidão no levantamento da composição do biogás tem-se também mais exatidão no quantitativo de geração de metano e conseqüentemente mais exatidão no levantamento do potencial de geração de energia elétrica.

BIBLIOGRAFIA

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR8419:**

Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 10.004:** Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12.808:** Resíduos de serviços de saúde – classificação. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 8419:** Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro. 7p. 1992.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Leilão de geração.** 2017.

Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/id/15933964 >. Acesso em: 15 fev 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de energia elétrica.** 2017.

Disponível em: <

<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm> >. Acesso em: 15 fev 2018.

ALVES, J. W. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos. Dissertação (Mestrado)** – Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo. 142p., 2000.

ANVISA – AGENCIA NACIONAL DE VIGILANCIA SANITÁRIA. **RDC nº 306.**

Regulamento técnico para gerenciamento de serviços de saúde, Brasília, 2004.

AZEVEDO, Mônica. **Avaliação do risco à saúde da população vizinha às áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos:** o aterro sanitário como cenário de exposição ambiental. São Carlos: EESC/USP, 2004.

BEDUSCHI, L. C., ORTOLANI, A. F., COAN, O. **Considerações gerais sobre a estaçãoda UNESP de biogás automotivo a baixa pressão, In:** II encontro sobre

biogás automotivo. Coletânea dos trabalhos apresentados, UNESP, Jaboticabal, 1985.

BNDES – BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. **Consulta geral ao site**. 2017. Disponível em: <www.bndes.gov.br>. Acesso em 09 fev 2018.

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

CALDERONI, Sabetai. **Os bilhões perdidos no lixo**. 4ª ed., Humanitas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 348 p., 2003.

CENBIO – CENTRO NACIONAL DE REFERENCIA EM BIOMASSA. **Identificação dos aterros disponíveis nas regiões SE, CO e NE do país, quantidade, tipo de resíduo e infraestrutura**: Relatório de Atividades. São Paulo, 2006.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. **Resíduos sólidos domiciliares e de serviços de saúde**: tratamento e disposição final. São Paulo: CETESB, 1997.

COMGÁS – COMPANHIA DE GÁS DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Aproveitamento de biogás nos aterros sanitários do município de São Paulo**: experiências da COMGÁS e perspectivas de utilização. São Paulo, 1985.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 308 de 21 de março de 2002**. Brasília, 2002.

_____. **Resolução nº 307**. Brasília, Julho, 2002.

_____. **Resolução nº 358**. Brasília, Abril, 2005.

CORREA, A. S. **A influência da folga de válvulas na geração de ruído e vibração no motor fire 999cc 8v**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2003.

CRAVEIRO, A. M. **Considerações sobre plantas de projetos de biodigestão**. São Paulo. Instituto de pesquisas tecnológicas. 1982. 39p.

CUNHA, Marcos. **Análise do setor de saneamento ambiental no aproveitamento energético de resíduos: o caso do município de Campinas, SP**. Dissertação

(mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia da UNICAMP. São Paulo. 125., 2002.

D' ALMEIDA, M. O.; & VILHENA, A. **Manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: IPT / CEMPRE, 2000.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Landgem gas emissions model, version 3.02 user's guide**, 2005.

FAAIJ, A.P.C. **Bio-energy in Europe**: changing technology choices. Energy Policy, v.34, p.322-342, 2006.

FGV – FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. **Estudo sobre os aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de aterros sanitários**. Rio de Janeiro, 2007.

FIGUEIREDO, Natalie. **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2011.

GOMES, E. E. B; COBAS, V. R. M.; NASCIMENTO, M. A. R.; LORA, E. E. S.; NETO, L. J. M. **Aspectos econômicos e ambientais da aplicação de microturbinas a gás natural na geração distribuída**. (Artigo). Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, Itajubá, MG, 2001.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Contagem populacional**. 2017. Disponível em: <idades.ibge.gov.br/brasil/ap/macapa/panorama>. Acesso em: 10 fev 2018.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Taxa de precipitação anual**. 2018. Acesso em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 10 fev 2018.

IPCC - INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for national greenhouse inventories**: reference manual. New York, 1997.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 2. ed. São Paulo: CEMPRE/IPT, 2000.

KESSLER, T. **Utilização de gás metano de aterros sanitários**: recomendações para seu aproveitamento prático. Revista Engenharia. São Paulo, n. 54, 2000.

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

LEAL, Celso. **Análise da viabilidade técnico-econômica, jurídica e ambiental de geração de energia elétrica pela unidade de disposição final de RSU de Macapá**. Macapá. Dissertação (Mestrado em Direito Ambiental e políticas Públicas) – Universidade Federal do Amapá. 2012.

LEI FEDERAL N° 1.445. Brasília, Janeiro, 2007. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 15/09/2018.

LIMA, Luiz. **Tratamento de lixo**. São Paulo: Hemus, 2ª ed., 1991.

LOPEZ-REAL. Agroindustrial waste composting and its agricultural significance. **Proceeding of the Fertilizer Society**. 1990; 293:1-26.

MANCINI, P. J. P. **Uma avaliação do sistema de coleta informal de resíduos sólidos recicláveis no município de São Carlos-SP**. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1999.

MARTINS, G. A.; LINTZ, A. **Guia para elaboração de monografias e trabalhos de conclusão de curso**. São Paulo: Atlas, 2000.

MARTINS, G. A.; PINTO, R. L. **Manual para elaboração de trabalhos acadêmicos**. São Paulo: Atlas, 2001.

MELDONIAN, Nelson. **Alguns aspectos do lixo urbano no estado de São Paulo e considerações sobre a reciclagem do alumínio e do papel**. Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, 1998. (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos), Campinas – SP, 1998.

MOTTA, Fernando. **Produza sua energia: biodigestores anaeróbios**. Gráfica Editora 3ªed, 144 p., 1986.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional. **Capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 25 ago. 2017.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Matrizes elétricas estaduais**. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/boletins-de-energia>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

NAZAROFF, W. W.; ALVAERZ-COHEN, L. **Environmental engineering Science**. New York, United States. John Wiley & Sons, Inc. 2001.

OONK, J., BOON, A., **Landfill gas formation, recovery and emissions**, Institute of Environmental and Energy Technology. Apeldoorn, The Netherlands, p. 95-203, 1995.

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

ROCCA, Alfredo. **Resíduos Sólidos Industriais**. 2ª ed. São Paulo, 1993.

SEMUR – SECRETARIA MUNICIPAL DE MANUTENÇÃO URBANÍSTICA. **Aterro sanitário de Macapá-AP**. Prefeitura Municipal de Macapá. Amapá, 2012.

SEMUR – SECRETARIA MUNICIPAL DE MANUTENÇÃO URBANÍSTICA. **Medição aterro sanitário no município de Macapá-AP**. Prefeitura Municipal de Macapá. Amapá, 2017.

SILVA, F. M.. **Sistema de alimentação de motores com duplo combustível: metano e diesel**. 121p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1995.

SOGABE, Milton. **Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica**. A & WMA – Seção Brasil, São Paulo, 1999.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S. **Integrated solid waste managements: engineering, principles and management issues**. New York: McGraw-Hill, ISBN 0-07-063237-5. 978p.1993.

TURKENBURG, W. C. (coord.). **Renewable energy technologies** In World Energy Assessment of the United Nations, UNDP, New York, 2000.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Turning liability into an asset: A landfill gas-to-energy Project development handbook. EPA 430-B-96-004. Sep. 139p., 1996.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Energy Project landfill gas utilization software (E-PLUS) User's manual. EPA 30-B-97-006, 1998.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Powering microturbines with Landfill Gas, EPA430 – 01-012 DRAFT. March, 2002.

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

WILLIAMS, R. B.; JENKINS, B. M.; NGUYEN, D. **Solid waste conversion:** a review and database of current and emerging technologies. Berkeley: Interagency Agreement, University of California, USA, 2003.

WORLD BANK. Indústria: Energia e Meio Ambiente. Relatório de Desenvolvimento Mundial, 1992.

WORLD BANK. Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin American and Caribbean. USA., October. 125p., 2003.

APÊNDICE A – Dados de entrada do LandGEM e layout do software para célula de aterro controlado de Macapá-AP.

Constante de geração de metano $K = 0,1$ (anos⁻¹)

Potencial de geração de metano $L_0 = 160$ m³/t

USER INPUTS Landfill Name or Identifier:

Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year	2007
Landfill Closure Year	2012
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No
Waste Design Capacity	<input type="text" value="megagrams"/>

Restore Default Model Parameters

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k (year⁻¹) User-specified k value should be based on site-specific data and determined by EPA Method 2E.
 User-specified: User-specified value:

Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m³/Mg) User-specified L_0 value should be based on site-specific data and determined by waste type and composition.
 User-specified: User-specified value:

NMOC Concentration (ppmv as hexane)

Methane Content (% by volume)
 User-specified: User-specified value:

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES
 Input Units:

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2007	72.140	79.354
2008	74.890	82.379
2009	93.584	102.943
2010	38.126	41.939
2011	83.315	91.647
2012	75.774	83.352
2013		
2014		
2015		
2016		
2017		
2018		
2019		
2020		

APÊNDICE B – Dados de entrada do LandGEM e layout do software para a célula de aterro sanitário de Macapá-AP.

Constante de geração de metano $K = 0,1$ (anos⁻¹)

Potencial de geração de metano $L_0 = 160$ m³/t

USER INPUTS Landfill Name or Identifier:

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year: 2013

Landfill Closure Year: 2032

Have Model Calculate Closure Year? Yes No

Waste Design Capacity: megagrams

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k (year⁻¹): User-specified value: 0,100

Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m³/Mg): User-specified value: 160

NMOC Concentration (ppmv as hexane): CAA - 4,000

Methane Content (% by volume): User-specified value: 60

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units: Mg/year

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2013	74.624	82.087
2014	84.889	93.377
2015	86.759	95.435
2016	86.508	95.159
2017	91.291	100.420
2018	133.330	146.663
2019	136.635	150.298
2020	140.022	154.025
2021	143.494	157.844
2022	147.053	161.758
2023	150.700	165.770
2024	154.438	169.882
2025	158.269	174.096
2026	162.196	178.416

Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections

Restore Default Model Parameters

APÊNDICE C – Fluxo de caixa do projeto de geração de energia elétrica no aterro sanitário de Macapá-AP.

