



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

**GANHOS ECONÔMICOS COM CRÉDITOS DE CARBONO: UMA ESTIMATIVA PARA
O ATERRO SANITARIO EM CAMPINA GRANDE-PB**

LUIS ANTONIO OLIVEIRA NUNES

Campina Grande - PB, 20 de dezembro de 2018.

**GANHOS ECONÔMICOS COM CRÉDITOS DE CARBONO: UMA ESTIMATIVA PARA
O ATERRO SANITARIO EM CAMPINA GRANDE-PB**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande - PB, 20 de dezembro de 2018.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

LUÍS ANTÔNIO OLIVEIRA NUNES

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Campina Grande como requisito para
obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Civil. Área de concentração:
Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof^a. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Coorientador: Msc. Tuilly de Fatima Macedo Furtado Guerra

Campina Grande - PB, 20 de dezembro de 2018.

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUÍS ANTÔNIO OLIVEIRA NUNES

GANHOS ECONÔMICOS COM CRÉDITOS DE CARBONO: UMA ESTIMATIVA PARA O ATERRO SANITARIO EM CAMPINA GRANDE-PB

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 17/12/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Prof. Dr^a Verushcka Escarião Dessoles Monteiro
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Msc. Tuilly De Fatima Macedo Furtado Guerra
Coorientador
Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Mônica de Amorim Coura
Membro Interno
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

José Lucas de Souza Abreu
Examinador Externo
Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Agradecimentos

Primeiramente à Deus por ser minha base, cuidando de mim todos os momentos e me abençoando em tudo. Nada a reclamar, só agradecer!

Aos meus pais, Anne Ceres de Oliveira Lima e Lívio Cesar Cunha Nunes, por todo carinho, dedicação e apoio ao longo desta jornada. Também aos meus irmãos, Mauro Cesar, Lívia Maria e José Mario, muito obrigado. Esta vitória é nossa!

A minha orientadora Veruschka Monteiro por todas as oportunidades que me deu ao longo do curso, apoio, incentivo e aprendizado.

À minha coorientadora Tuilly de Fatima, por toda a disponibilidade em me ajudar.

À Isa por todo o companheirismo e por ser minha base por toda a minha graduação.

Ao GGA, por todas as amizades e apoio que vocês me deram para chegar até aqui.

Aos meus amigos da graduação Cesar, Leticia, Fabiano, Jordan, Nicolas, Sinvaldo, Rodrigo, Ericles, por tudo.

À dona Ladijane igualmente, principalmente pelas inúmeras xícaras de café que tomei durante estes anos.

A todas as pessoas que me ajudaram de alguma forma, da mais simples à mais complexa, nesta jornada! MUITO OBRIGADO!

RESUMO

A disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em aterros sanitários é a prática mais comum em todo o mundo, porém, a medida que os resíduos são biodegradados, geram subprodutos, entre eles o biogás que possui altas concentrações de metano, sendo este um Gás do Efeito Estufa (GEE). Estima-se que o metano possua um potencial poluidor 21 vezes maior que o dióxido de carbono. O objetivo desse estudo é quantificar os ganhos econômicos com a negociação de créditos de carbono no aterro Sanitário de Campina Grande-PB através da queima do metano gerado em uma célula de resíduos. O campo experimental utilizado para o desenvolvimento dessa pesquisa foi a Célula 2 do referido aterro, que teve operação entre dezembro de 2015 e maio de 2016. Foi realizada uma estimativa teórica do potencial de geração de metano (L_0) para os resíduos aterrados na Célula 2, com o intuito de realizar uma projeção da vazão que irá ser gerada durante 15 anos de operações do aterro. Além disso, foi pressuposto o custo de instalação de um sistema para queima desse biogás e o tempo de retorno do investimento. Os resultados indicaram um parâmetro L_0 no valor de $118,68 \text{ Nm}^3\text{CH}_4\text{.t}^{-1}$ para os resíduos da Célula 2. Sendo assim, foi estimado um volume de $5.284.199,54 \text{ m}^3$ de metano gerados em 15 anos de operação, representando uma receita bruta de R\$ 2.588.625,90, e ainda um tempo de retorno dos investimentos de aproximadamente 1,8 anos, considerando um cenário otimista de biodegradação dos resíduos; e uma vazão de metano de $4.132.540,92 \text{ m}^3$, com uma receita bruta de R\$ 2.024.450,89 e um tempo de retorno de aproximadamente 2,9 anos, para um cenário conservador de biodegradação dos resíduos aterrados.

Palavras-chave: Aterro Sanitário, Metano, Créditos de Carbono.

Abstract

The disposition of Urban Solid Waste (MSW) in landfills is a more common norm worldwide, but a measure that the waste is biodegraded, generate by-products, among them are those that make high concentrations of methane, being a Greenhouse Effect (GEE). It is estimated that methane has a potential polluter 21 times greater than carbon dioxide. The objective of the study is to quantify the gains from the sale of carbon credits by burning the methane produced in a waste pile at the Sanitary Landfill in Campina Grande-PB. The experimental field used to our knowledge likewise Cell 2 of said landfill, which took place between December 2015 and May 2016. It was stored in Cell 2, with the intention of improving the projection of its generation during 15 years of landfill operations . In addition, it was the time spent for the installation of a biogas burning system and the time of return of the investment. The results were calculated with a L0 parameter of 118,68 Nm³CH₄.t⁻¹ for the residues of Cell 2. Thus, the quantity of 5,284,199.54 m³ of generated methane was estimated in 15 years of operation and one gross revenue of R \$ 2,588,625.90, and an investment return rate of 1.8 years, considering an optimistic scenario of waste biodegradation; and a methane outflow of 4,132,540.92 m³, with a gross revenue of R \$ 2,024,450.89 and a return time of approximately 2.9 years, for a conservative scenario of biodegradation of waste residues.

Key-words: Landfill, Methane, Carbon Credits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corte transversal de um Aterro Sanitário	16
Figura 2: Fases de degradação anaeróbia.....	17
Figura 3: Fluxograma com os procedimentos experimentais	22
Figura 4: Localização do aterro sanitário em Campina Grande	23
Figura 5: Célula 2.....	24
Figura 6: Drenos de gases	25
Figura 7: Procedimento de amostragem dos resíduos.....	26
Figura 8: Composição gravimétrica dos resíduos.....	32
Figura 9: Comportamento da vazão de CH ₄ durante o tempo.....	33
Figura 10: Receita em Reais da queima de biogás.....	35
Figura 11: Tempo de retorno do empreendimento	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cotações monetárias em 10 de novembro de 2018.....	30
Tabela 2: Custos de investimento de uma planta de biogás de aterro sanitário	30
Tabela 3: Custos anuais de operação e manutenção para diferentes sistemas de biogás de aterro sanitário	31
Tabela 4: Estimativa do parâmetro L_0	33
Tabela 5: Custo do projeto	36
Tabela 6: Custo de manutenção e operação anual do projeto.....	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composição do biogás gerado em aterros sanitários	18
Quadro 2: Emissões de metano em aterros sanitários.....	20
Quadro 3: Fator de correção do CH ₄	27
Quadro 4: Valores sugeridos de k.....	28

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. Fundamentação teórica	14
3.1 Aterro Sanitário.....	14
3.2 Geração de Biogás em aterros.....	16
3.3 Composição do biogás	18
3.4 Emissões de metano para a atmosfera	19
3.5 Mecanismos de Desenvolvimento Limpo	20
3.6 Mercado de créditos de carbono	21
4. METODOLOGIA	22
4.1 Considerações iniciais	22
4.2 Campo experimental.....	23
4.2.1 Sistema de drenagem de biogás	24
4.3 Composição gravimétrica dos resíduos no Aterro Sanitário de Campina Grande-PB.....	25
4.4 Estimativa da geração de metano na Célula 2	26
4.5 Estimativa da vazão de metano.....	28
4.6 Quantificação dos ganhos	29
4.6.1 Cotações monetárias.....	29
4.7 Custos do projeto.....	30
4.8 Estimativa para o Aterro Sanitário	31
5. RESULTADOS e DISCUSSÕES	31
5.1 Composição gravimétrica dos resíduos.....	31

5.2	Obtenção teórica do potencial de geração de metano (L_0).....	32
5.3	Estimativa da vazão de metano.....	33
5.4	Receita em créditos de carbono	34
5.5	Viabilidade do projeto	36
5.6	Tempo de retorno	37
6.	CONCLUSÕES.....	38
7.	REFERÊNCIAS	40
8.	Anexo 01	46
9.	Anexo 02	47
10.	Anexo 03	48
11.	Anexo 04	49

1. INTRODUÇÃO

Desde a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), houve um grande aumento no número de aterros sanitários em todo o Brasil. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012) existiam cerca de 1700 aterros sanitários no Brasil em 2012. Em 2016, esse número passou a ser de 2976 segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016).

Com esse intenso crescimento, surge uma problemática: a emissão de gases para a atmosfera. O biogás é um biocombustível proveniente de materiais orgânicos (biomassa) e, portanto, é uma fonte alternativa de energia (energia renovável ou limpa), o qual substitui o uso de combustíveis fósseis. Ele é produzido através da fermentação anaeróbica de da biomassa, como subproduto do metabolismo das bactérias e outros organismos presentes. Entre os gases liberados pela decomposição biológica, destacam-se o metano, o dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio, e quantidades menores de outros gases (TCHOBANOGLOUS, THEISEN e VIGIL, 1993).

De todos os gases liberados pela decomposição dos resíduos sólidos, o metano é o mais problemático. Esse gás é um dos responsáveis pelo efeito estufa, fenômeno intensamente estudado nos últimos anos e apontado como um dos causadores do processo de aquecimento global. Estudos existentes indicam que, considerando um período de 100 anos, 1 grama de metano contribui 21 vezes mais para a formação do efeito estufa do que 1 grama de dióxido de carbono (UNFCCC,2007).

Diante do exposto, vários acordos têm sido apresentados a fim de diminuir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Segundo Cotta (2005), as políticas internacionais sobre mudanças climáticas surgiram em 1988, quando a Assembleia Geral das Nações Unidas declarou que a mudança climática era uma preocupação mundial. Foram realizadas as Conferências das Partes (COP's), que estabelecia às diretrizes de combate as mudanças climáticas. Uma das mais importantes foi a COP3, que ocorreu em Quioto no Japão em 1997, ficando acordado quais seriam as metas e prazos das emissões de cada país signatário.

Para países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, foram definidos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), que são ferramentas utilizadas para que os países em desenvolvimento negociem com países signatários créditos de carbono, para que esses países possam alcançar suas metas estipuladas.

Com isso, avaliar os ganhos com a possível queima do metano gerado em aterros é uma alternativa para demonstrar que, uma ação benéfica ao meio ambiente também pode ser rentável economicamente. Esse trabalho pode exercer um estímulo aos empresários a implantar ações que minimizem a poluição no meio ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Quantificar os ganhos econômicos com a negociação de créditos de carbono no aterro Sanitário de Campina Grande-PB através da queima do metano gerado em uma célula de resíduos.

2.2 Objetivos Específicos

- Estimar o potencial de geração de Metano (L_0) e a vazão de metano gerado com o tempo;
- Determinar os ganhos econômicos obtidos com a queima do metano;
- Verificar o tempo de retorno dos investimentos;
- Analisar a viabilidade de implantação do projeto de queima do metano para todo Aterro Sanitário.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Aterro Sanitário

A NBR 8.419/1992 (ABNT, 1992), define da seguinte forma os aterros sanitários:

Aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza os princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário (1992, p. 62).

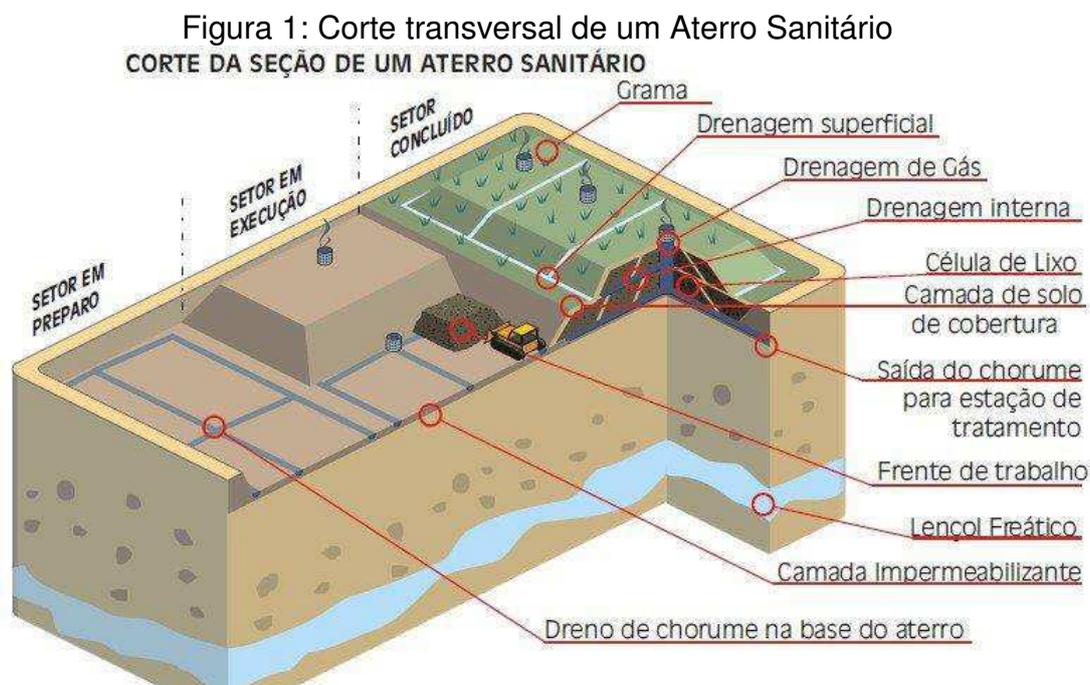
Segundo Albuquerque (2011) “Um aterro sanitário é definido como aterro de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), ou seja, adequado para a recepção de resíduos de origem doméstica, varrição de vias públicas e comércios.” Por sua vez, Fiorillo (2011) expõe que “aterros sanitários são os locais especialmente concebidos para receber resíduos e projetados de forma a que se reduza o perigo para a saúde pública e para a segurança”.

Aterro sanitário é um tratamento baseado em técnicas sanitárias de impermeabilização do solo, compactação e cobertura diária das células de resíduos, coleta e tratamento de gases, bem como tratamento de lixiviado, entre outros procedimentos técnico-operacionais responsáveis por evitar os aspectos negativos da deposição final do resíduo, ou seja, proliferação de vetores, como ratos e moscas, exalação de odores, contaminação dos lençóis freáticos, surgimento de doenças e transtorno visual oriundo do um local com toneladas de resíduo amontoado (PORTELLA, 2014).

Portanto para ser chamado de aterro sanitário são necessários no mínimo as seguintes características, demonstradas na Figura 1:

- Possibilidade de alojamento em células especiais para vários tipos de resíduos;
- Células para rejeitos oriundos do resíduo domiciliar;
- Células de resíduo hospitalar (caso o Município não disponha de processo mais efetivo para dar destino final a esse tipo de resíduo);
- Isolamento inferior, não permitindo que o lixiviado atinja os lençóis freáticos;
- Sistema de coleta e tratamento dos líquidos percolados (lixiviado), resultante da decomposição da matéria orgânica;
- Sistema de coleta e tratamento dos gases gerados;
- Isolamento superior evitando contaminação do ar e atração de animais que se alimentam dos resíduos orgânicos

- O isolamento superficial (superior) deve ser feito diariamente
- Sistema de drenagem pluvial para evitar que a água da chuva penetre no aterro e dessa forma gere ainda mais lixiviado;
- Pátio de estocagem de materiais;



Fonte: Portal resíduos sólidos (2018)

3.2 Geração de Biogás em aterros

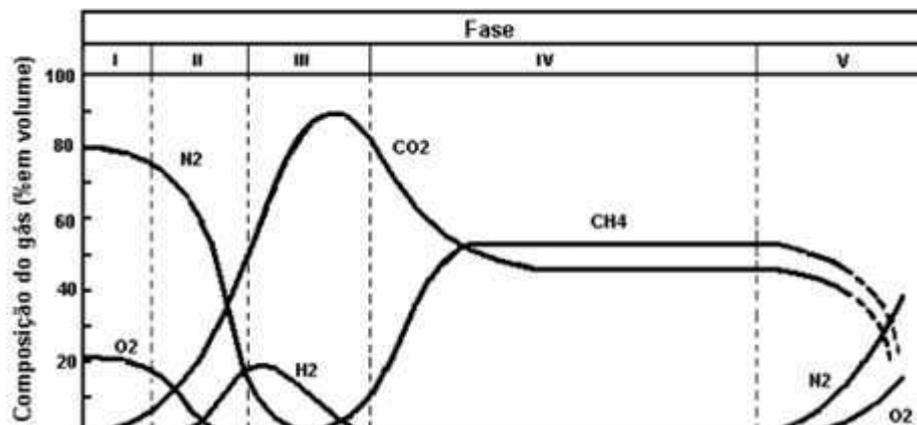
O processo de degradação dos resíduos sólidos é um fenômeno constituído essencialmente pela superposição de mecanismos biológicos e físico-químicos, catalisados pelo fator água, presente nos resíduos pela umidade inicial e pelas águas das precipitações (CASTILHOS *et al.* 2003).

A biodegradação dos resíduos é predominantemente anaeróbia, sem a presença de oxigênio, porém ocorre também a degradação aeróbia, com presença de oxigênio, em um pequeno espaço de tempo, logo após o aterramento.

Para um melhor entendimento das interações físicas, químicas e biológicas que propiciam a geração de biogás, é necessário um entendimento sobre o processo de biodegradação biológica.

Segundo Tchobanoglous *et al.*(1993) e Bidone (1999), a geração do biogás ocorre em cinco fases de degradação anaeróbia, como ilustrado na Figura 2:

Figura 2: Fases de degradação anaeróbia



Fonte: Tchobanoglous et al.(1993) e Bidone (1999).

Fase I: A primeira fase é a de ajuste inicial. Nessa fase ocorre a biodegradação aeróbia devido à quantidade de ar que é enterrado juntamente com o resíduo.

Fase II: Fase identificada como fase de transição. O oxigênio é consumido e as condições anaeróbicas começam a prevalecer. Os principais aceptores finais de elétrons na fase anaeróbica são o nitrato e o sulfato. Ocorre a conversão de matéria orgânica solúvel em ácidos graxos voláteis. Nesta fase predomina a formação de dióxido de carbono (CO_2) e gás sulfídrico (H_2S), conhecida como fase acidogênica.

Fase III: Fase ácida. As reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante esta fase e os microrganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias estritas e facultativas. Esta fase também é conhecida como acetogênica, pois ocorre a conversão de ácidos graxos voláteis em ácido acético (CH_3COOH).

Fase IV: Fase metanogênica. Nesta fase predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em dióxido de carbono e metano, em uma proporção de 35-50% e de 45-60%, respectivamente. A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente.

Fase V: Fase de maturação. Esta fase ocorre após grande quantidade do material orgânico ter sido biodegradado e convertido em CH₄ e CO₂ durante a fase metanogênica. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Condições aeróbias, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio, podem voltar a ocorrer dependendo da suscetibilidade do aterro a condições atmosféricas.

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

3.3 Composição do biogás gerado em aterros sanitários para a atmosfera

Os gases emitidos de aterros sanitários causam vários impactos nas regiões circunvizinhas, e também alguns impactos globais, como o aumento do efeito estufa. As emissões continuam por um longo período após o fechamento do aterro sanitário. Estes podem gerar incômodos pelo mau cheiro e problemas de saúde. A composição do biogás gerado em aterros sanitários encontra-se no Quadro 1:

Quadro 1: Composição do biogás gerado em aterros sanitários

Composição	Porcentagem
Metano	45 - 60
Dióxido de carbono	40 - 60
Nitrogênio	2- 5
Oxigênio	0,1 - 1
Enxofre	0 -1
Amônia	0,1 -1
Hidrogênio	0 - 0,2
Monóxido de carbono	0 - 0,2
Gases em menor concentração	0,01 - 0,6

Fonte: Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993)

O CO₂ é a principal forma gasosa do carbono. Este gás é produzido na biodegradação da matéria orgânica tanto aerobiamente como anaerobiamente. Por

este motivo é um dos principais gases produzido em aterros sanitários. A concentração de CO₂ no biogás varia de 35 a 45% (Fischer *et al.*, 1999).

O metano é produzido na biodegradação anaeróbia da matéria orgânica e sua concentração em aterros sanitários varia de 45 a 60%. O metano possui um maior potencial de aquecimento global quando comparado ao dióxido de carbono. Isso ocorre devido ao alto coeficiente de absorção por radiação ultra-violeta e longa residência na atmosfera (Christophersen *et al.*, 2001 *apud* Lelieveld, 1998). Vários valores do potencial de aquecimento global do metano são relatados na literatura e variam entre 21 a 27 vezes maior que o CO₂ (Fischer *et al.*, 1999; Barh *et al.*, 2006).

Segundo RUSSO (2005) devido às altas concentrações de gás metano no biogás, existe o risco de incêndios e explosões em instalações próximas aos aterros.

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

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

3.4 Emissões de metano na atmosfera

Embora as taxas de emissão de metano decresçam após o encerramento do aterro (à medida que a fração orgânica decresce), um aterro continuará, tipicamente, a emitir metano durante muitos (20 ou mais) anos após seu encerramento (FREITAS, 2007).

Os aterros podem gerar cerca de até 125 metros cúbicos de gás metano por tonelada de resíduos em um período de 10 a 40 anos. Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental CETESB (2001), esta geração no Brasil é de 677 t.ano⁻¹, podendo representar cerca de 945 milhões de metros cúbicos por ano. O

Quadro 2 apresentam sobre emissões de metano em aterros sanitários, segundo diversos autores:

Quadro 2: Emissões de metano em aterros sanitários

Fonte de metano	Carga por área (L. CH ₄ /m ² .d)	Referência
Aterro em funcionamento nos primeiros 10 anos, 20 m de profundidade	340	Hummer e Lechner(1997)
Resíduo restante após a separação do resíduo orgânico, nos primeiros 10-15 anos, 20m de profundidade	120-160	Hummer e Lechner1997)
Resíduo tratado através de processo mecânico e biológico, 20 m de profundidade	<25	Hummer e Lechner(1997)
Resíduo tratado através de processo mecânico e biológico	72	Fricke <i>et al.</i> (1997)
Áreas abandonadas, após 10-15 anos	90-110	Hummer e Lechner, (1997)
Lixão doméstico	400	Kightley e Nedwell (1994)

Fonte: Bahr *et al.* (2006)

3.5 Mecanismos de Desenvolvimento Limpo

Em 1997, mais de 140 países reuniram-se no Japão para a terceira Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 3), e assinaram o Protocolo de Quioto. Trata-se de um acordo internacional que determina metas de reduções de emissões de GEE, e incentiva o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Entrou em vigor em 2005, e determinou que os países industrializados deveriam reduzir suas emissões de GEE em 5,2%, comparado aos níveis de 1990, durante o período de 2008 a 2012. Em 2011, em nova convenção, o tratado foi prolongado até, no mínimo, 2017 (ICB, 2013).

Dentro desse contexto, os países são divididos em dois grupos. Um grupo inclui os países que são os maiores emissores de GEE, (países desenvolvidos), e um segundo grupo de países, onde se encontram as nações subdesenvolvidas e as

nações em desenvolvimento. Esse segundo grupo terá participação por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), buscando reduzir localmente as emissões dos gases causadores do efeito estufa, angariando assim créditos de carbono (denominados Reduções Certificada de Emissão – RCE) que serão, posteriormente, negociados com os países incluídos no primeiro grupo, para que estes consigam alcançar suas metas das emissões de GEE. Com esta dinâmica, o Protocolo, além de promover a redução do lançamento de gases poluidores, possibilita oportunidade de investimento no mundo em desenvolvimento, podendo assim, reduzir a desigualdade global (ROCHA, 2011).

3.6 Mercado de créditos de carbono

O Mercado de Crédito de Carbono foi a maneira com que as nações encontraram de atingir as metas de redução das emissões dos gases do efeito estufa estabelecidas no Protocolo de Quioto, que emerge como fruto da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de 1992. Ele funciona a partir da compra e venda de créditos.

Uma empresa ou país que conseguir reduzir suas emissões a níveis inferiores ao estabelecido recebe créditos que podem ser vendidos a empresas ou país que poluíram mais que a meta, sabendo que uma tonelada de carbono corresponde a um crédito.

O Crédito de Carbono é considerado *commodity* e pode ser negociado nos mercados financeiros nacionais e internacionais. Ele é um ativo financeiro, pois não há outra forma de utilização que não seja a sua negociação. Esse mercado funciona a partir de leilões onde cada um tem sua especificidade dependendo da oferta.

Os certificados são emitidos pelas agências de proteção ambiental reguladoras, que selecionam as indústrias que mais poluem no país e, a partir daí, são estabelecidas metas para a redução de suas emissões. No Brasil, a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima é a autoridade responsável por regular os projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (BRASIL, 2005).

Para que o projeto de uma empresa receba créditos de carbono, ela deve apresentá-lo a autoridade local. Avalia-se a metodologia proposta e, caso ela seja aprovada, esse projeto é encaminhado ao comitê executivo da Convenção Quadro

das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC), entidade responsável por registrar todos os projetos de MDL do mundo, sendo esses projetos desenvolvidos de forma sustentável a fim de facilitar que as metas sejam atingidas. Além disso, auditores independentes creditados na ONU certificam se as reduções das emissões estão efetivamente ocorrendo.

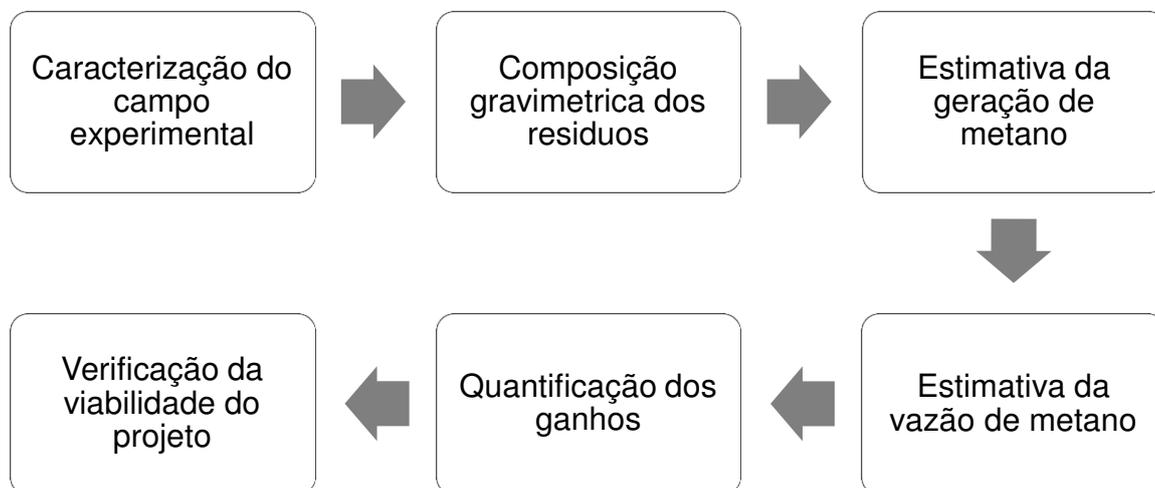
Esse mercado já é uma realidade mundial e muito tem contribuído na implantação de projetos de MDL, já que ele serve de incentivo ao desenvolvimento dessas iniciativas (ROCHA, 2011).

4. METODOLOGIA

4.1 Considerações iniciais

Nesta seção serão apresentados os procedimentos experimentais utilizados nesta pesquisa, de acordo com a Figura 3:

Figura 3: Fluxograma com os procedimentos experimentais



Fonte: Próprio autor

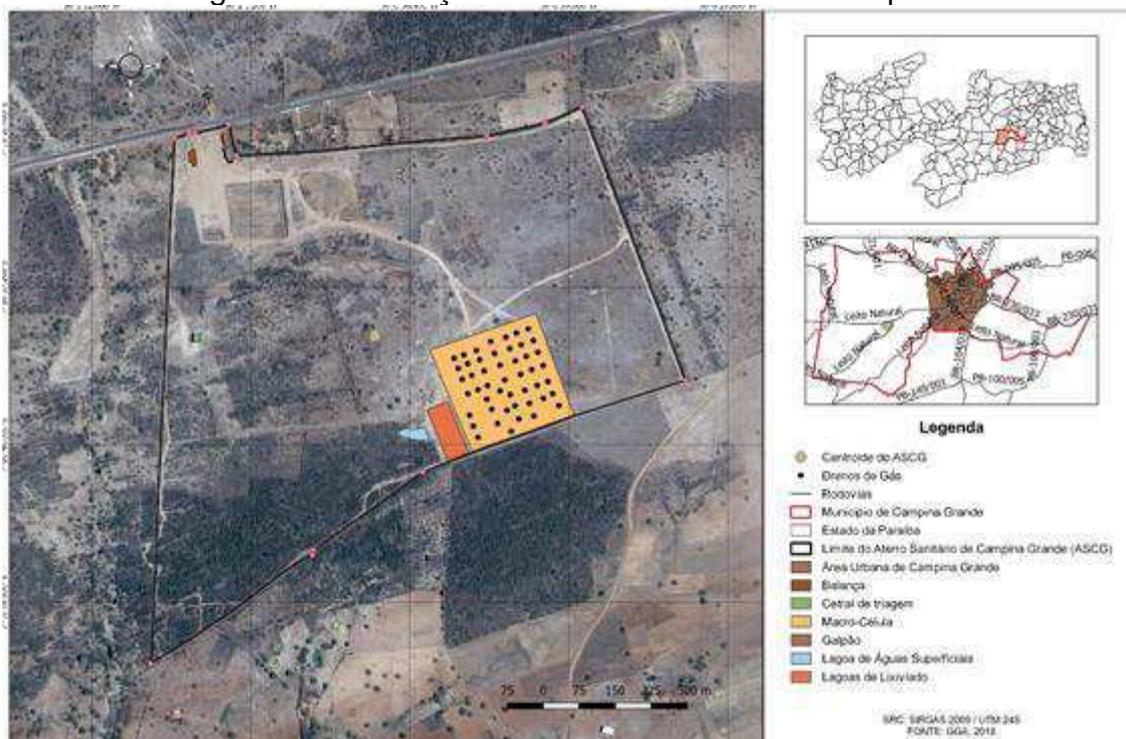
4.2 Campo experimental

O campo experimental para a execução desta pesquisa foi um aterro sanitário, que se encontra localizado no município de Campina Grande, Paraíba, Brasil.

O município de Campina Grande-PB pertence a mesorregião do Agreste Paraibano, situa-se nas coordenadas geográficas de latitude $07^{\circ}13'50''$ S e longitude $35^{\circ}52'52''$ W e está aproximadamente a 130 Km da capital do estado, João Pessoa (IBGE, 2010).

O Aterro Sanitário (Centro de Tratamento de Resíduos da Borborema – CTR da Borborema) ocupa uma área territorial de 80 ha, dos quais 40 ha foram destinados à construção de células para o aterramento dos RSU (Figura 4), e está localizado à aproximadamente 10 km do perímetro urbano da cidade de Campina Grande-PB, especificamente, no Distrito de Catolé de Boa Vista, na Fazenda Logradouro II (ECOTERRA AMBIENTAL Ltda, 2010).

Figura 4: Localização do aterro sanitário em Campina Grande



Fonte: GGA (2018)

Desde a implantação do aterro, em julho de 2015, até o presente momento, novembro de 2018, foram construídas quatro células para a disposição de RSU, sendo que após o encerramento da disposição do resíduo nessas células, foi realizada uma junção entre elas, o que dá início a construção de uma macrocélula com dimensões 200x200x40 metros, que está em operação atualmente.

Na Figura 5 ilustra a Célula 2, que é o objeto desse estudo. Essa célula de resíduos teve sua operação iniciada em dezembro de 2015 e encerrou sua operação em maio de 2016, com uma massa total de 62.359,5 t de RSU aterrados. A célula possui dimensões na base de 100x100x20 metros que correspondem ao comprimento, largura e altura, respectivamente. Além disso, esta célula é constituída de 4 taludes, sendo cada um com inclinação máxima de 1:2 (vertical:horizontal), bermas intermediárias de 6 metros de largura e um plator com altura de 5 metros (ECOTERRA AMBIENTAL Ltda, 2010).

Figura 5: Célula 2



Fonte: GGA (2018)

4.2.1 Sistema de drenagem de biogás

Na Célula 2, existem 9 drenos verticais, que conduzem o biogás diretamente para a atmosfera. Os drenos foram construídos com tubos de concreto com diâmetro interno de 30 cm, com pequenos orifícios para a entrada de biogás no seu interior. Além disso, para devida proteção, os tubos foram envolvidos por uma camada de brita e uma malha de ferro, como mostra a Figura 6:

Figura 6: Drenos de gases



Fonte: GGA (2018)

4.3 Composição gravimétrica dos resíduos no Aterro Sanitário de Campina Grande-PB

Foram coletados resíduos depositados na célula, com a abertura de uma fenda em um dos taludes da Célula 2, com auxílio de uma retroescavadeira. A composição gravimétrica dos RSU foi realizada pelo Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) e faz parte dessa pesquisa.

Sendo assim, para determinar a massa de cada fração dos resíduos em relação à massa total, foram seguidas as etapas metodológicas descritas a seguir, representadas na Figura 7:

- os RSU coletados foram dispostos em uma lona (Figura 7.a);
- procedeu-se a abertura das sacolas para facilitar a homogeneização (Figura 7.b);
- com o auxílio de uma pá enchedeira, a pilha de RSU foi quarteada (Figura 7.c);
- do quarteamento, foram dispostas 4 pilhas de resíduos, em que foram descartadas duas pilhas diametralmente opostas (Figura 7.d);
- as duas pilhas restantes foram homogeneizadas novamente, formando uma única pilha;
- as amostras foram dispostas em outra lona para a triagem do material;

- os materiais foram separados de acordo com as categorias: papel e papelão, plástico, metal, vidro, compósitos, têxteis sanitários, material putrescível e outros;
- os resíduos de cada categoria foram pesados.

Figura 7: Procedimento de amostragem dos resíduos



Fonte: GUEDES (2018)

4.4 Estimativa da geração de metano na Célula 2

Para aferir sobre a viabilidade de utilização do biogás para possível arrecadação de créditos de carbono, é necessário obter uma estimativa da quantidade total de biogás que irá ser produzido.

Por meio da metodologia do IPCC (1996), foi determinado o parâmetro L_0 , em $tCH_4.t^{-1}$ RSU. Essa variável representa a capacidade dos resíduos gerarem metano ao longo da sua degradação e é dependente da matéria orgânica contida nos resíduos, como mostra a Equação 1:

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times 16/12 \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

L_0 = potencial de geração de metano [$Nm^3CH_4.t^{-1}$ RSU]

FCM = fator de correção do CH_4 referente ao gerenciamento dos locais de destinação de resíduos [adimensional]

COD = carbono orgânico degradável [$tC.t^{-1}$ RSU]

COD_f = fração do COD transformado em biogás [%]

F = concentração de CH_4 no biogás [%]

16/12 = razão de conversão de carbono a metano [adimensional]

O fator de correção do CH_4 sugerido pelo IPCC (1996), para o caso de aterros sanitários, é de 1,0, como mostra o Quadro 03:

Quadro 3: Fator de correção do CH_4

Tipo de local de destinação de RSU	FCM
Lixão	0,4
Aterro Controlado	0,8
Aterro Sanitário	1,0
Locais sem categoria	0,6

Fonte: IPCC(1996)

Com o auxílio da composição do RSU, é possível o cálculo do COD (Equação 2) e COD_f (Equação 3).

$$COD = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,40 \times D) + (0,30 \times E) \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

COD = carbono orgânico degradável [$tC.t^{-1}RSU$]

A = fração de papel e papelão no resíduo [%]

B = fração de resíduos originados de parques e jardins [%]

C = fração de restos de alimentos no resíduo [%]

D = fração de tecidos no resíduo [%]

E = fração de madeira no resíduo [%]

$$COD_f = 0,014 \times T + 0,28 \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo:

COD_f = fração do COD transformado em biogás [%]

T = temperatura na zona anaeróbia [$^{\circ}C$]

4.5 Estimativa da vazão de metano

A estimativa da geração de metano na Célula 2 foi determinada por meio do *Landfill Gas Emissions Model* – LandGEM, versão 3.02 (USEPA, 2005). O programa emprega um modelo de primeira ordem para a determinação da vazão de metano, conforme a Equação 4:

$$\sum_{i=1}^n Q_{CH_4} = \sum k.L_0.M_i.e^{-k.t_i} \quad (\text{Eq 4})$$

Onde:

Q_{CH_4} = taxa de geração de CH_4 no ano de cálculo [$m^3.ano^{-1}$]

K = constante de decaimento [ano^{-1}]

L_0 = potencial de geração de metano [$Nm^3CH_4. t^{-1}RSU$]

M_i = taxa de resíduos recebidos no ano [t]

i = incremento de tempo [ano]

O parâmetro k utilizado foi baseado na metodologia do IPCC(1996) que recomenda valores entre $0,05$ e $0,08 \text{ ano}^{-1}$ para regiões com temperatura média anual superior a $20^\circ C$ e precipitação anual inferior a 1000 mm , como mostra o Quadro 4:

Quadro 4: Valores sugeridos de k

Precipitação Anual	Valores de k [ano^{-1}]		
	Resíduo relativamente inerte	Decomposição moderada	Decomposição alta
<250 mm	0,01.	0,02	0,03
250 mm a 500 mm	0,01	0,03	0,05
500 mm a 1000 mm	0,02	0,05	0,08
> 1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: IPCC (1996)

Diante disso, nesse trabalho foi simulada duas situações, em que uma delas intitulada Cenário 1, correspondente a uma decomposição alta dos resíduos, conseqüentemente uma boa produção de metano, com um parâmetro de $k = 0,08 \text{ ano}^{-1}$; e uma outra situação denominada Cenário 2, correspondente a uma decomposição moderada dos resíduos, conseqüentemente uma produção de metano menor, com um parâmetro de $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$.

4.6 Quantificação dos ganhos

Segundo ICLEI (2009), para a estimativa de redução de emissões de CH₄ e a respectiva geração de créditos de carbono, deve-se considerar a vazão total de metano gerado no aterro desde o ano de implementação dos sistemas até, aproximadamente, 15 anos após o encerramento do aterro, pois após esse tempo, ocorre o decaimento das emissões de metano pela estabilização da matéria orgânica.

Assim, nesse trabalho foi estimada uma vida útil de 15 anos para o sistema de queima de metano instalado na Célula 2.

Ainda segundo ICLEI (2009), para a quantificação de ganhos pela queima do metano gerado, deve-se fazer algumas considerações:

- Do total de metano gerado, estima-se que 60% será coletado pelo sistema de extração, pois a escape de gases tanto pelos drenos de biogás e tubulações como pela camada de cobertura de solo;
- O flare terá eficiência de queima estimada 90%;
- Além disto, estima-se que 20% do total de metano gerado seja oxidado nos drenos, portanto, apenas 80% será passível de geração de créditos.

Assim, após a obtenção da vazão de metano gerado na Célula 2, será feito descontos citados acima, para a obtenção da vazão de metano que irá ser realmente queimada.

Além disso, segundo IPCC (1996), é estimado que uma tonelada de metano equivalem a 21 créditos de carbono assim, a vazão de metano que irá ser queimada será multiplicada por 21 para obtenção do equivalente em toneladas de carbono.

4.6.1 Cotações monetárias

Após a determinação do total de créditos de carbono obtidos, foi calculada uma conversão entre as moedas para determinação do valor em reais. Foi utilizada a cotação do dia 10 de novembro de 2018, em que os valores estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Cotações monetárias em 10 de novembro de 2018

Moeda	Valor em reais
Dólar	3,73
Euro	4,23
Credito de Carbono	82,31

Fonte: Investing.com

4.7 Custos do projeto

Para a realização da análise econômica, utilizou-se os parâmetros dos custos de investimentos associados à tecnologia de biogás mais apropriados para a América Latina e Caribe, elaborados por Terraza e Willumsen em 2010. Esses parâmetros também foram adotados pela Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (ONUDI, 2010) e servem como base para a estimativa do preço das instalações nos países da América Latina, aqui demonstrados na Tabela 2:

Tabela 2: Custos de investimento de uma planta de biogás de aterro sanitário

Componentes	Custo	Custo/t (Dólar)
Preparação do projeto	10% a 15% do investimento total	0,08 - 0,18 US\$/t
Sistema de captação	30.000 - 50.000 US\$/ha	0,15 - 0,40 US\$/t
Sistema de bombeamento de gás	75 - 200 US\$/m ³ biogás/h	0,05 - 0,30US\$/t
Sistema de queima	40 - 80 US\$/m ³ biogás/h	0,02 - 0,04 US\$/t

Fonte: Terraza e Willumsen (2010).

Além disso, é necessária a apresentação de um projeto MDL a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima e ao comitê executivo da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima. Vanzin e Pandonfo (2005) desenvolveram um projeto MDL para o aterro sanitário de Santa Tecla-RS, onde estimaram um custo de R\$ 218.040,00 para custo com ensaio laboratorial, custos com materiais e taxas relacionadas aos órgãos responsáveis pela validação dos projetos.

Diante disso, vai ser adotado um custo de R\$200.000,00 para a elaboração de um projeto MDL para a Célula 2 do Aterro Sanitário de Campina Grande-PB.

Na Tabela 3 são apresentados os custos anuais de operação e manutenção associados à tecnologia de biogás de aterro mais apropriada para a América Latina e Caribe.

Tabela 3: Custos anuais de operação e manutenção para diferentes sistemas de biogás de aterro sanitário

Tipo de planta	Custo anual e operação e manutenção
Planta com sistema de tocha	4% a 8% do investimento total de investimento

Fonte: Terraza e Willumsen (2010).

4.8 Estimativa para o Aterro Sanitário

O Aterro Sanitário em Campina Grande-PB foi projetado para uma vida útil de 25 anos com a construção de 22 células para a deposição de resíduos sólidos. Assim, será feita uma estimativa para a geração e vazão de metano, e custos das instalações para todo o aterro sanitário, considerando que todas as células fossem homogêneas com relação à composição dos resíduos e massa de RSU aterrados.

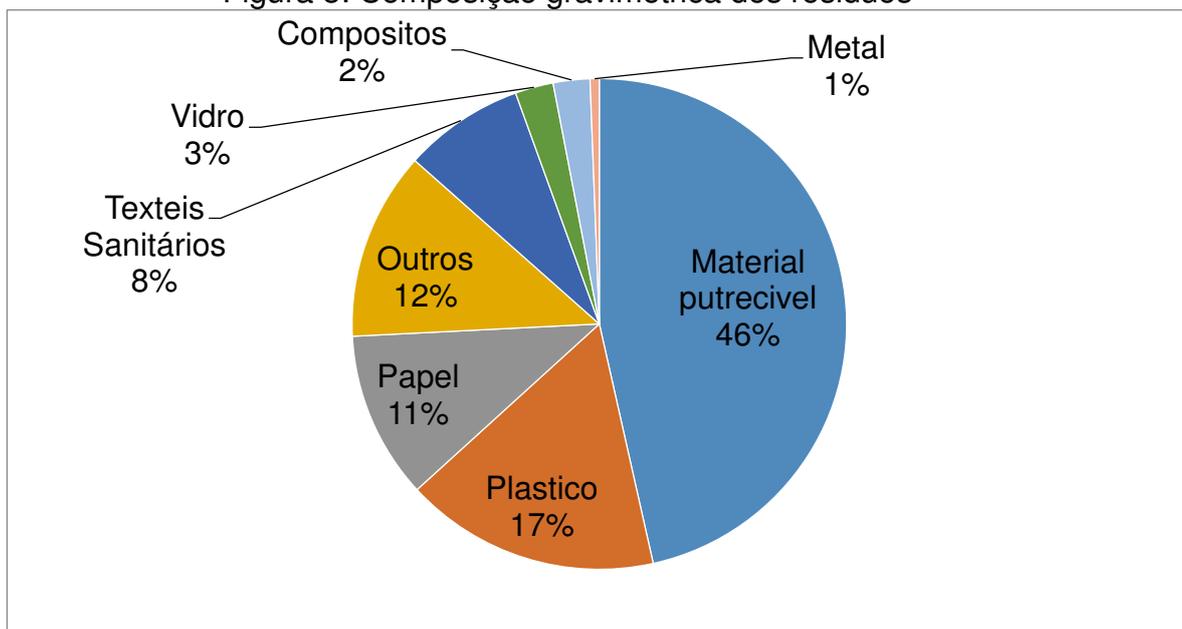
Portanto, todos os valores encontrados para a Célula 2 serão multiplicados por 22 para a obtenção de um valor equivalente ao Aterro Sanitário como um todo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Composição gravimétrica dos resíduos

O percentual da quantidade em massa de cada constituinte dos resíduos sólidos estão apresentados na Figura 8:

Figura 8: Composição gravimétrica dos resíduos



Fonte: GGA (2018)

Observando a Figura 8, verifica-se que 46,5% dos RSU produzidos em Campina Grande-PB são materiais putrescíveis, constituídos por restos de alimentos, cascas, restos de frutas e legumes, além disso, 11% de papeis e papelões e 8% de têxteis e sanitários, totalizando um total de 65%. Esses materiais fazem parte da fração biodegradável dos resíduos, possuindo uma alta capacidade de gerar metano durante o processo biodegradativo.

Outras categorias de RSU, como os plásticos (16,7%), metais (0,6%), vidros (2,5%) e compósitos (2,4%), que totalizam mais de 22% dos resíduos.

5.2 Obtenção teórica do potencial de geração de metano (L_0)

Na Tabela 4 estão apresentados os parâmetros que proporcionaram a obtenção teórica do potencial de geração de metano (L_0), por meio da metodologia do IPCC (1996). Para as condições locais do Aterro Sanitário em Campina Grande-PB, o valor do parâmetro L_0 foi de $118,68 \text{ Nm}^3\text{CH}_4\text{t}^{-1}$.

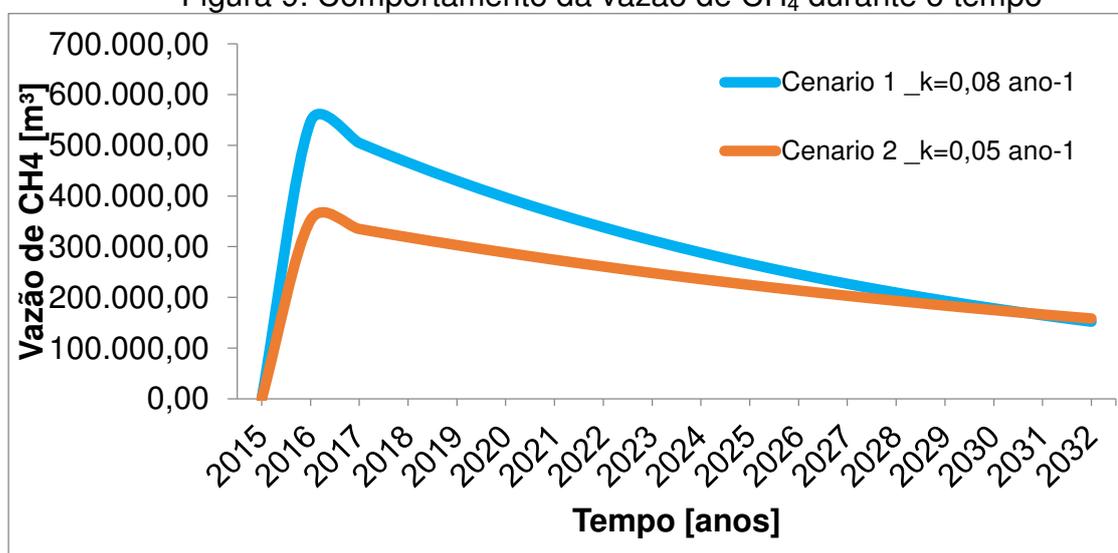
Tabela 4: Estimativa do parâmetro L_0

Componentes do RSU	Composição gravimétrica	FCM	COD	COD _f	F	L ₀
Papel e papelão	18,9%					
Resíduos de parques ou jardins	-					
Restos de alimentos	46,5%	1,0	145,35	0,77	57	118,68
Tecido	-					
Madeira	-					

Fonte: Próprio autor

5.3 Estimativa da vazão de metano

Na Figura 9 são apresentados os resultados da previsão teórica da vazão de metano na Célula 2, realizada com o Modelo LandGEM (USEPA,2005), durante o período de 2015 a 2032:

Figura 9: Comportamento da vazão de CH₄ durante o tempo

Fonte: Próprio autor

O Cenário 1, com $k = 0,08 \text{ ano}^{-1}$, obteve uma vazão total acumulada de metano no período observado de $4.967.623,27 \text{ m}^3$. Já para o Cenário 2, $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$, foi obtida uma vazão total acumulada de $3.808.109,80 \text{ m}^3$. A diferença de vazão entre os dois cenários é de $1.159.513,47 \text{ m}^3$ de metano.

Essa diferença nas vazões se deve a uma maior biodegradação dos resíduos, observada com a utilização do parâmetro $k = 0,08 \text{ ano}^{-1}$, no Cenário 1, assim há uma maior produção de metano quando comparado ao Cenário 2, que teve uma vazão de metano menor, com a utilização do parâmetro $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$. Essa diferença se mantém até o ano de 2030, ano em que o resíduo entra em estado de estabilização da sua biodegradação.

O comportamento apresentado na Figura 9, de dezembro de 2015 a maio de 2016, se deve ao fato da deposição de resíduos na Célula 2 está ativa, e portanto, a produção de metano também aumenta. Em maio de 2016, a célula teve suas atividades encerradas, assim, o comportamento da curva começa a ser regido pela constante de decaimento k , referente à degradação da matéria orgânica com o tempo.

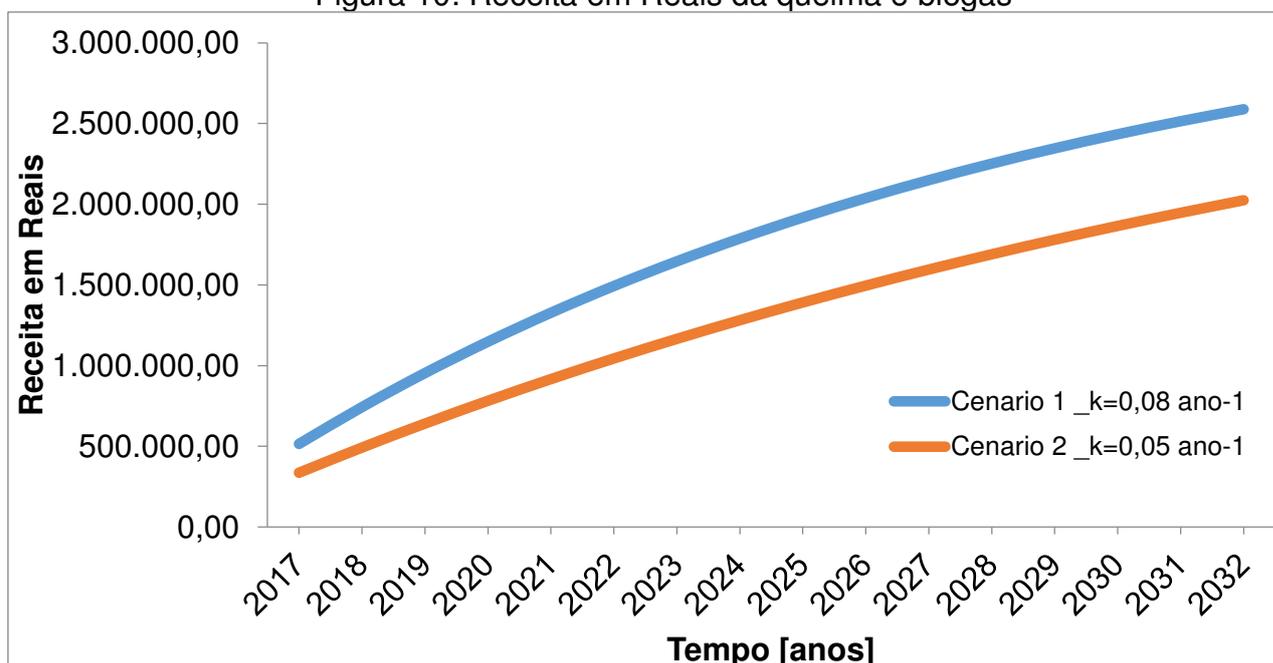
Com relação à estimativa de geração de metano para o Aterro Sanitário com 22 células, a vazão no Cenário 1 foi 109.287.711,9 m^3 , e no Cenário 2 foi 83.778.415,6 m^3 de metano.

5.4 Receita em créditos de carbono

Para a estimativa de ganhos econômicos com a venda de créditos de carbono, foi estimado que o início das operações do sistema de queima de metano iniciaria em 2017, pois o encerramento das operações de deposição de RSU na Célula 2 encerraram em maio de 2016, tendo assim um período de 6 meses para a instalação do sistema de queima. Além disso, foi considerado que o sistema de queima teria vida útil de 15 anos, segundo ICLEI (2009).

Na Figura 10, é apresentada a receita obtida durante um período de operação entre 2017 a 2032 e; todos os cálculos realizados estão localizados nos Anexos 1 e Anexo 2:

Figura 10: Receita em Reais da queima e biogás



Fonte: Autor

A receita obtida com a venda de créditos de carbono no Cenário 1, com $k = 0,08 \text{ ano}^{-1}$, teve um total acumulado de R\$ 2.588.625,90. Já para o Cenário 2, com $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$, foi obtida uma receita de R\$ 2.024.450,89. A diferença de ganhos entre os dois cenários foi de R\$ 564.175,01.

A diferença entre as receitas se deve a diferença de biodegradação simulada nos dois cenários. Além disso, observa-se um aumento da diferença entre as receitas encontradas quando comparado os anos de 2017 e 2032, essa diferença se deve a constante de decaimento k ser modelada por uma função exponencial na utilização de um modelo de primeira ordem do IPCC (1996) para a estimativa da vazão de metano.

As vazões de metano poderiam ser maiores se fossem adotadas alguns tipos de tecnologias para aumentar a eficiência de queima do metano, diminuir a oxidação desse gás nos drenos ou aumentar a eficiência de coleta de metano. Algumas alternativas já foram estudadas, por exemplo, Candiani (2011) que utilizou uma manta geotêxtil nas imediações dos drenos de biogás, e com isso conseguiu uma eficiência na coleta de biogás de mais de 80%.

Com relação à receita em créditos de carbono para o Aterro Sanitário com 22 células, no Cenário 1, obteve-se R\$ 56.949.769,80, e no Cenário 2, R\$ 44.537.919,58.

5.5 Viabilidade do projeto

Na Tabela 5 são apresentados os custos para a implantação de uma planta de biogás de aterro sanitário de acordo com Terraza e Willumsen (2010). Para o cálculo da viabilidade do projeto, foram utilizados os valores máximos de custos por tonelada de resíduo.

Tabela 5: Custo do projeto

Componentes	Custo [Dólar]	Custo [Reais]
Preparação do projeto	11.224,7	41.868,13
Sistema de captação	24.943,78	93.040,28
Sistema de bombeamento de gás	18.707,83	69.780,21
Sistema de queima	2.494,378	9.304,03
Projeto MDL	-	200.000,00
Total	-	413.992,65

Fonte: Próprio autor

Essa estimativa foi baseada na quantidade de resíduos depositados, e como para esse estudo, foi considerada apenas uma célula do aterro sanitário, os custos das instalações apresentados foram bastante reduzidos.

Na Tabela 6, são apresentados os valores anuais referentes a custos de operação e manutenção, de acordo com Terraza e Willumsen (2010):

Tabela 6: Custo de manutenção e operação anual projeto

Componentes	Custo [Dólar]	Custo [Reais]
Sistema de tocha	4.589,65	17.119,41

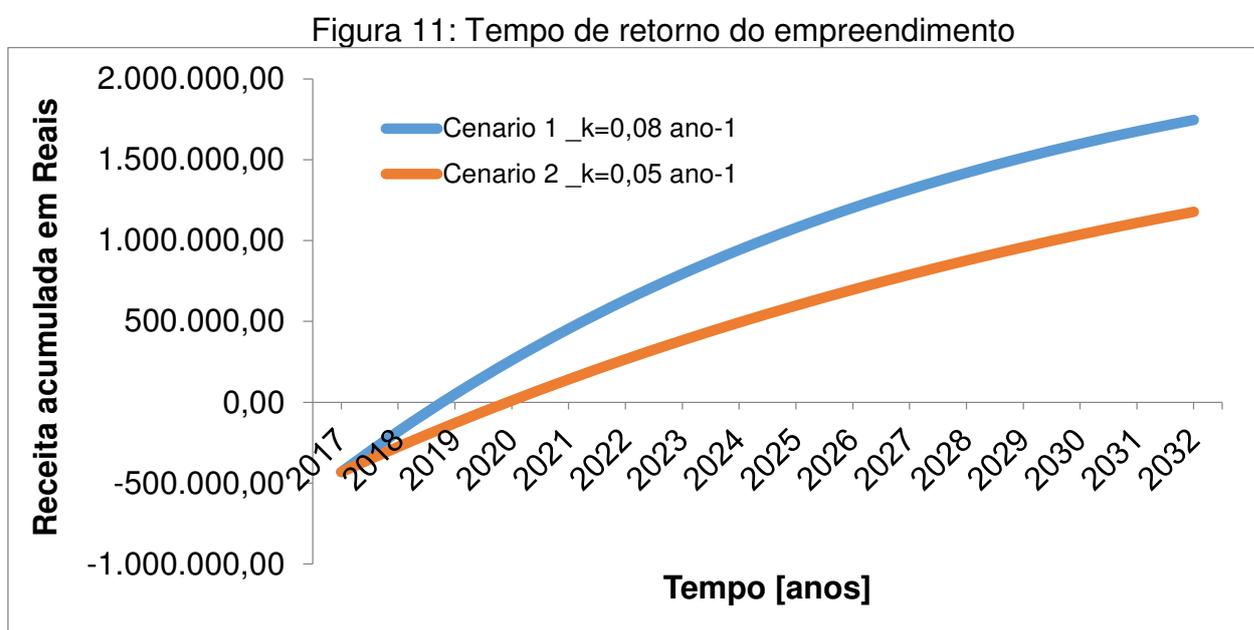
Fonte: Autor

Com relação ao custo da instalação de um sistema para queima de metano no Aterro Sanitário com 22 células, foi multiplicado por 22 a massa de resíduos aterrados na Célula 2, para estimativa do total de resíduos aterrados em todo o

aterro. Assim, obteve-se um custo de R\$ 4.907.838,39, com custos de manutenção e operação anuais de R\$ 100.972,41.

5.6 Tempo de retorno

O tempo de retorno estimado do empreendimento está apresentado na Figura 11e; todos os cálculos realizados estão localizados nos Anexos e Anexo 4:



Fonte: Próprio autor

O tempo de retorno do investimento quando analisado o Cenário 1, com $k = 0,08 \text{ ano}^{-1}$, foi de aproximadamente 1,8 anos. Já para o Cenário 2, com $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$, o tempo de retorno dos investimentos foi de aproximadamente 2,9 anos.

Com a contabilização dos gastos com a instalação do sistema e manutenção e operações anuais, a renda líquida durante 15 anos de operações no Cenário 1 foi estimada em R\$ 1.745.638,21. Já para o Cenário 2, a renda líquida foi estimada em 1.177.615,26, com uma diferença de R\$ 568.022,95 entre as rendas. Essa estimativa não considera juros e correções monetárias durante os anos.

O lucro estimado foi reduzido em razão de se tratar de apenas uma célula de resíduos, um sistema similar aplicado em todo o Aterro Sanitário em Campina Grande, irá gerar lucros bem maiores.

Com relação à receita em líquida para o Aterro Sanitário com 22 células, no Cenário 1, obteve-se R\$ 38.404.040,62, com um tempo de retorno de 0,8 anos e; no Cenário 2, R\$ 25.907.535,72 com um tempo de retorno de 1,5 anos.

6. CONCLUSÕES

- A instalação de um projeto para queima do metano na Célula 2 é viável devido ao reduzido tempo de retorno dos investimentos e da rentabilidade da operação do sistema ao longo dos anos;
- O potencial de geração de metano foi estimado em 118,68 Nm³CH₄ para cada tonelada de resíduo depositado na Célula 2;
- A vazão de metano gerado na Célula 2 foi estimada em 5.284.199,54 m³ considerando um cenário otimista e 4.132.540,92 m³ para um cenário conservador, durante 15 anos de operações;
- Um sistema para obtenção de créditos de carbono a partir da queima do biogás gerado na Célula 2 é viável, com um lucro total de R\$ 2.588.625,90 considerando um cenário otimista e 2.024.450,89 para um cenário conservador, em 15 anos de operações;
- O custo de implantação do projeto foi estimado em R\$ 413.992,62, com uma manutenção anual estimada em R\$ 17.119,41;
- A renda líquida foi estimada em R\$ 1.745.638,21 considerando um cenário otimista e R\$ 1.177.615,26 para um cenário conservador. O tempo de retorno do investimento foi estimado em 1,8 anos considerando um cenário otimista e 2,9 anos para um cenário conservador.
- De acordo com os resultados encontrados, a instalação de um sistema de queima do metano em aterros sanitários de RSU é viável pela possibilidade de

retorno financeiro e a lucratividade ao longo dos anos, devido à ascensão do mercado de crédito de carbono. Sendo assim, é interessante a análise da implantação desse projeto de MDL para os demais aterros sanitários que possuem condições meteorológicas e composição de resíduos semelhantes aos observados nesta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

ACGIH (AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS) In Hydrogen sulfide. Documentation of the threshold limits values and biological exposure indices. American Conference of Governmental Industrial Hygienists Inc. Cincinnati: c., 1991.

ALBUQUERQUE, E. M.; POVINELLI, J. (2011). Caracterização da eficiência dos processos de tratamento de lixiviado de aterro sanitário no Brasil. *In: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre-RS. trabalhos técnicos 26º CBSA, 2011.*

AMOORE, J.; HAUTALA, E. Odor as an Aid to Chemical Safety: Odor thresholds compared with Threshold Limit values and Volatilities for 214 industrial chemicals in Air and Water Dilution. *Journal of Applied Toxicology, Vol 3, n º6, 1983*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10006: solubilização de resíduos perigosos – procedimentos. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2016. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em: 26 de fev. 2018.

BIDONE, F.R.A. Metodologia e técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABES (Associação de Engenharia Sanitária e Ambiental). 1999.

BAHR, T.; FRICKE, K; HILLEBRECHT, K.; KOLSH, F.; REINHARD, B. Clean Development Mechanism – Tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões, 2006.

BRASIL, PNRS-Política Nacional de Resíduos Sólidos. (2010). Lei Nº 12.305/2010. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso 26 Fev 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). BIG – Banco de Informações de Geração, 2005. Acesso em: 17 Out. 2018.

CASTILHOS JR., A. B (Coord.). Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: ABES, RIMa, 2003. 294 p.

CANDIANI, Giovano. Analysis of biogás in sanitary landfill Caieiras. Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v.32, n. 1, p 69-77, jan./mar. 2011.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Padrões de qualidade do ar. CETESB. São Paulo 2001b Disponível em URL: <http://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/> . Acesso em 26 de fev de 2018)

CHRISTOPHERSEN, M.; KJELDSEN, P.; HOLST, H.; CHANTON, J. Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation. Waste Management & Research. nº 19. p 595-612, 2001a.

CONAMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE [CONAMA]. Resolução CONAMA nº 03/90, de 28/06/1990. [Estabelece

padrões primários e secundários de qualidade do ar e critérios de classificação de episódios críticos de poluição do ar].

COTTA, Michele Karina and TONELLO, Kelly Cristina. Os projetos florestais no contexto das mudanças climáticas.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. Proceedings online... Available from: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022006000200020&lng=en&nrm=abn>. Acess on: 20 Dec. 2018.

ECOTERRA AMBIENTAL Ltda. Estudo de Impacto Ambiental (EIA): Projeto de implantação de um aterro sanitário para resíduos sólidos no município de Campina Grande-PB. João Pessoa-PB, 2010.

FERNANDES, Juliana Gonçalves. Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental. Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2009.

FILHO, Luiz Fernandes De Brito. Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos [Rio de Janeiro]2005 XV, 222 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005) Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

FIORILLO, Celso Antônio Pacheco. Curso de direito ambiental brasileiro. São Paulo: Saraiva, 12^o ed. 2009.

FIORILLO, Celso Antônio Pacheco. Curso de direito ambiental brasileiro. São Paulo: Saraiva, 10^o ed. 2011.

FISCHER, H., Wahlen, M., Smith, J., Mastroianni, D. and Deck B. 1999. Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations. Science 283: 1712-1714.

FREITAS F., Mensagem recebida por natalie@iee.usp.br, em 13 abril. 2007.

GGA/UFMG – Grupo de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande. Acervo fotográfico 2018.

GENBEDIEN, A. et al. Landfill gas – from environment to energy. Luxembourg: Commission of the European Communities, Directorate-General Telecommunications, Information Industries and Innovation, 1992.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. 2010. Disponível: <<http://ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?lang=&codmun=250400&search=paraiba|campina-grande|infograficos:-dados-gerais-do-municipio>>. Acesso em: 20 de mai. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/04/aterros-sanitarios-protectem-meio-ambiente-de-contaminacao>>. Acesso em: 26 de fev. 2018. Meio Ambiente. 2012.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual. v.3. 1996.

LELIEVELD, J., CRUTZEN, P. J. and DENTENER, F. J. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus B*, 50: 128–150. doi:10.1034/j.1600-0889.1998.t01-1-00002.x, 1998.

LUNING, L.; TRENT, J. Gaseous emission of landfill sites. In: INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM, 4., 1993, Cagliari. Proceedings... Cagliari: CISA. p.657-668.

MAINIER, F. B.; FLUMINENSE, U. F.; DELAIDI, E.; et al. O SULFETO DE HIDROGÊNIO (H₂S) E O MEIO AMBIENTE. II Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, p. 612–618, 2005.

PORTELLA, M. O.; RIBEIRO, J. C. J. Aterros Sanitários: Aspectos Gerais e Destino Final dos Resíduos. Revista Direito Ambiental e sociedade, v. 4, n. 1, p. 115-134, 2014.

PROJETO APOEMA – Projeto APOEMA – Educação Ambiental. Disponível em <http://www.apoema.com.br/>. Acesso em 26/11/2018.

REGATTIERI, C.R. Quantificação da Emissão de Biogás em Aterros Sanitário – Estudo de Caso do Aterro Sanitário de São Carlos. 2009. 137 f Tese (Doutorado) – EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ROCHA, Poliana Carolina C.B.M. Potencial do lixo na geração de créditos de carbono: a experiência da Usina Verde. Dissertação – Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro, 2011.

RUSSO, M. A. T. Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário. Universidade do Minho, 2005, 298 p

TERRAZA, H; WILLUMSEM, Guidance note on Landfill gás capture and utilization. Inter-American Development Bank. Technical Notes Nº 108. 2010.

TCHOBANOGLIOUS, G., THIESEN, H., VIGIL, S. A.. Integrated solid waste management - engineering principles and management issues. New York: McGraw-Hill International Editions. 978 p, 1993.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills – Background Information for Proposed Standards and Guidelines. Emission Standards Division. 1991.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). LANDGEM (Landfill Gas Emission Model), Version 3.01 – User's Guide, EPA – Environmental Research Group, 2005.

UNFCCC. Investment and Financial Flows to Address Climate Change. UNFCCC Secretariat, Bonn. http://unfccc.int/files/cooperation_and_support/financial_mechanism/application/pdf/bac kground_paper.pdf, 2007.

VANZIN, E. PANDOLFO, A. Análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no aterro metropolitano Santa Tecla XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil, 2006.

WHO - World Health Organization. Hydrogen Sulfide: Human Health Aspects. Concise International Chemical Assessment Document 53. Geneva, 2003

8. ANEXO 01

No anexo 01, encontra-se o memorial de cálculo utilizado para a determinação da vazão de metano e renda com a comercialização de créditos de carbono, com relação a um cenário otimista de biodegradação de resíduos, realizados no presente trabalho:

Ano	Vazão de CH ₄ em [m ³ .ano ⁻¹] Com k = 0,08 ano ⁻¹	Vazão com 60% de eficiência de coleta	Vazão após perda de 20% do metano por oxidação nos drenos	Vazão de queima com eficiência de 90%	Volume de Metano [t.ano ⁻¹]	Equivalência em CO ₂ [ton.ano ⁻¹]	Receita obtida com os créditos de carbono [euros]	Receita obtida com os créditos de carbono [reais]
2015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2016	546.545,31	327.927,19	262.341,75	236.107,57	154,89	3.252,62	63.295,95	267.741,85
2017	504.524,91	302.714,95	242.171,96	217.954,76	142,98	3.002,54	58.429,52	247.156,88
2018	465.735,19	279.441,12	223.552,89	201.197,60	131,99	2.771,70	53.937,25	228.154,55
2019	429.927,77	257.956,66	206.365,33	185.728,80	121,84	2.558,60	49.790,35	210.613,20
2020	396.873,35	238.124,01	190.499,21	171.449,29	112,47	2.361,89	45.962,29	194.420,49
2021	366.360,28	219.816,17	175.852,93	158.267,64	103,82	2.180,30	42.428,54	179.472,73
2022	338.193,16	202.915,90	162.332,72	146.099,45	95,84	2.012,67	39.166,48	165.674,21
2023	312.191,64	187.314,98	149.851,98	134.866,79	88,47	1.857,92	36.155,22	152.936,57
2024	288.189,20	172.913,52	138.330,82	124.497,74	81,67	1.715,08	33.375,47	141.178,25
2025	266.032,16	159.619,30	127.695,44	114.925,89	75,39	1.583,22	30.809,44	130.323,95
2026	245.578,64	147.347,18	117.877,75	106.089,97	69,60	1.461,50	28.440,70	120.304,17
2027	226.697,66	136.018,59	108.814,87	97.933,39	64,24	1.349,13	26.254,08	111.054,74
2028	209.268,31	125.560,99	100.448,79	90.403,91	59,30	1.245,40	24.235,57	102.516,45
2029	193.179,00	115.907,40	92.725,92	83.453,33	54,75	1.149,65	22.372,25	94.634,61
2030	178.326,69	106.996,02	85.596,81	77.037,13	50,54	1.061,26	20.652,19	87.358,76
2031	164.616,28	98.769,77	79.015,82	71.114,23	46,65	979,67	19.064,37	80.642,29
2032	151.959,98	91.175,99	72.940,79	65.646,71	43,06	904,35	17.598,63	74.442,22

9. ANEXO 02

No anexo 02, encontra-se o memorial de cálculo utilizado para a determinação da vazão de metano e renda com a comercialização de créditos de carbono, com relação a um cenário conservador de biodegradação de resíduos, realizados no presente trabalho:

Ano	Vazão de CH ₄ em [m ³ .ano ⁻¹] Com k = 0,08 ano ⁻¹	Vazão com 60% de eficiência de coleta	Vazão após perda de 20% do metano por oxidação nos drenos	Vazão de queima com eficiência de 90%	Volume de Metano [t.ano ⁻¹]	Equivalência em CO ₂ [ton.ano ⁻¹]	Receita obtida com os créditos de carbono [euros]	Receita obtida com os créditos de carbono [reais]
2015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2016	351.993,81	211.196,29	168.957,03	152.061,33	99,75	2.094,80	40.764,75	172.434,88
2017	334.826,87	200.896,12	160.716,90	144.645,21	94,89	1.992,63	38.776,63	164.025,13
2018	318.497,17	191.098,30	152.878,64	137.590,78	90,26	1.895,45	36.885,47	156.025,53
2019	302.963,88	181.778,33	145.422,66	130.880,40	85,86	1.803,01	35.086,54	148.416,07
2020	288.188,16	172.912,89	138.330,31	124.497,28	81,67	1.715,07	33.375,35	141.177,74
2021	274.133,05	164.479,83	131.583,87	118.425,48	77,69	1.631,43	31.747,62	134.292,42
2022	260.763,43	156.458,06	125.166,44	112.649,80	73,90	1.551,86	30.199,27	127.742,90
2023	248.045,84	148.827,51	119.062,01	107.155,80	70,29	1.476,18	28.726,43	121.512,80
2024	235.948,51	141.569,10	113.255,28	101.929,75	66,87	1.404,18	27.325,43	115.586,55
2025	224.441,16	134.664,70	107.731,76	96.958,58	63,60	1.335,70	25.992,75	109.949,33
2026	213.495,04	128.097,02	102.477,62	92.229,86	60,50	1.270,56	24.725,07	104.587,04
2027	203.082,76	121.849,66	97.479,73	87.731,75	57,55	1.208,59	23.519,21	99.486,27
2028	193.178,30	115.906,98	92.725,58	83.453,02	54,75	1.149,65	22.372,17	94.634,27
2029	183.756,88	110.254,13	88.203,30	79.382,97	52,08	1.093,58	21.281,06	90.018,90
2030	174.794,95	104.876,97	83.901,58	75.511,42	49,54	1.040,25	20.243,17	85.628,63
2031	166.270,10	99.762,06	79.809,65	71.828,68	47,12	989,51	19.255,90	81.452,47
2032	158.161,01	94.896,61	75.917,29	68.325,56	44,82	941,25	18.316,78	77.479,98

10. ANEXO 03

No anexo 03, encontra-se o memorial de cálculo utilizado para a determinação do tempo de retorno do investimento e da receita líquida acumulada, com relação a um cenário otimista de biodegradação de resíduos, realizados no presente trabalho:

Anos	Receita acumulada com consideração dos custos do sistema
2017	-431.112,03
2018	-180.489,59
2019	49.547,87
2020	260.583,02
2021	454.076,80
2022	631.377,88
2023	793.731,20
2024	942.286,00
2025	1.078.103,16
2026	1.202.162,00
2027	1.315.366,53
2028	1.418.551,29
2029	1.512.486,62
2030	1.597.883,66
2031	1.675.398,86
2032	1.745.638,21

11. ANEXO 04

No anexo 04, encontra-se o memorial de cálculo utilizado para a determinação do tempo de retorno do investimento e da receita líquida acumulada, com relação a um cenário conservador de biodegradação de resíduos, realizados no presente trabalho:

Anos	Receita acumulada com consideração dos custos do sistema
2017	-431.112,03
2018	-275.796,56
2019	-128.890,85
2020	10.015,27
2021	141.311,93
2022	265.370,26
2023	382.543,27
2024	493.166,75
2025	597.560,15
2026	696.027,29
2027	788.857,21
2028	876.324,84
2029	958.691,70
2030	1.036.206,56
2031	1.109.106,05
2032	1.177.615,26