



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ROBERTO CARNEIRO LEÃO MAIA

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS EM
ATERRO SANITÁRIO**

RECIFE, 2016

ROBERTO CANEIRO LEÃO MAIA

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos
requisitos para aprovação na disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso.

Área de concentração: Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

RECIFE, 2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

M217e Maia, Roberto Carneiro Leão.

Estudo de viabilidade econômica e financeira para geração de energia a partir do biogás em aterro sanitário. / Roberto Carneiro Leão Maia - 2016.

52folhas, Ils.; e Tab.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Graduação em Engenharia Civil, 2016.

Inclui Referências.

1. Engenharia Civil.
2. Resíduos sólidos urbanos.
3. Biogás
4. Aterro sanitário.
5. Célula energética.
6. Viabilidade econômica.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO: Roberto Carneiro Leão Maia

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

Examinador 1: Prof. Fernando Jordão Vasconcelos

Examinador 2: Prof.^a Maria do Carmo Martins Sobral

**TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: ESTUDO DE
VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A
PARTIR DO BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO**

LOCAL: UFPE – CTG Centro de Tecnologia e Geociências

DATA: 13/12/2016 HORÁRIO DE INÍCIO: 15:00.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: _____ (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) () **aprovado(s) (nota > = 7,0)**, pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será **considerado aprovado com exame final**.

2) () **reprovado(s). (nota <3,0)**

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 13 de Dezembro de 2016

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato 1:

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-530.

Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

Sem dúvida, gostaria de dedicar esse trabalho à minha família por tornar esse sonho possível, em especial a meus pais, Rejane e Luiz por todo apoio, dedicação e devoção.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, pelos bons momentos de convivência familiar e os quais são indispensáveis na minha vida.

Ao Prof. Dr. Fernando Jucá, pelo incentivo, motivação e pela simplicidade de partilhar conhecimentos e gerar valor.

À Projetec, por trazer a vivência prática no âmbito da engenharia.

Aos meus amigos, que contribuíram de certa forma direta ou indireta para esse trabalho.

RESUMO

O crescimento populacional e a intensificação das atividades humanas têm gerado um acelerado aumento na produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), tornando-se um grave problema para prefeituras e para a sociedade. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305, de 2010, impôs o encerramento de todas as disposições inadequadas existentes, multando o poder municipal em caso de descumprimento. Além disso, o Brasil vive hoje uma crise energética e econômica o que resulta em elevados índices de desemprego e tarifas de energia mais onerosas. No entanto, existem possibilidades que podem minorar essas questões, uma delas é a produção de energia a partir do biogás em aterros sanitários, essa energia é largamente desperdiçada uma vez que em diversos aterros não dispõe de equipamentos necessários para sua produção. Esta pesquisa realizou um estudo de viabilidade econômica para a produção de energia elétrica e aproveitamento dos certificados de emissões reduzidas gerados através do biogás em um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos. Ainda, visando analisar diferentes cenários, foi elaborado uma análise de risco através da Simulação de Monte Carlo. Este trabalho foi desenvolvido com base em estudos prévios que permitiram a caracterização e quantificação dos resíduos gerados na Cidade do Recife, utilizando como local experimental o Aterro da CTR Candeias, localizado no Município de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco. As simulações realizadas consideraram o porte e a taxa de disposição de resíduos em uma determinada célula do aterro semelhantes à de pequenos e médios municípios brasileiros. Os resultados permitiram identificar vários fatores que apontam para uma viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás associado a comercialização dos créditos de carbono, previstos no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (UNESCO), além de incentivar o desenvolvimento de uma matriz energética renovável que vem sendo pouco explorada no Brasil, a qual pode ser aplicada em vários aterros de pequeno e médio porte.

Palavras-Chave: Resíduos Sólidos Urbanos; Biogás; Aterro Sanitário; Célula Energética; Viabilidade Econômica; Análise de Risco; Simulação Monte Carlo.

ABSTRACT

Population growth and the intensification of human activities have led to an accelerated increase in the production of municipal solid waste (MSW), which has become a serious problem for municipalities and our society. The National Solid Waste Policy (PNRS), instituted by the Law 12,305, of 2010, imposed the closure of all existing inadequate disposals, fining the municipalities in case of noncompliance. In addition, Brazil is currently experiencing an energy and economic crisis, resulting in high rates of unemployment and higher energy tariffs. However, there are possibilities that can lessen these issues, one of which is the production of energy from biogas in landfills, this energy is largely wasted once several landfills do not have the necessary equipment for their production. This research carried out an economic feasibility study for the production of electric energy and the use of the reduced emissions certificates generated through the biogas in an urban solid waste landfill. Also, in order to analyze different scenarios, a risk analysis was elaborated through Monte Carlo Simulation. This work was developed based on previous studies that allowed the characterization and quantification of the residues generated in the City of Recife, using as an experimental site the Landfill of the Candeias CTR, located in the City of Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco. The simulations carried out considered the size and rate of waste disposal in a given cell in the landfill similar to that of small and medium Brazilian cities. The results allowed to identify several factors that point to an economic viability of the biogas energy utilization associated with the commercialization of the carbon credits provided for in the Clean Development Mechanism (UNESCO), as well as to encourage the development of a renewable energy matrix that has been little explored In Brazil, which can be applied in several small and medium-sized landfills.

Keywords: Municipal Solid Waste; Biogas; Landfill; Energy Cell; Economic Viability; Risk Analysis; Monte Carlo Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Etapas de Formação do Biogás – Fonte: Desenvolvimento Próprio	4
Figura 2 – Elevação da geração de resíduos por habitante	9
Figura 3 - Crescimento do RSU em função do tempo	9
Figura 4 – Relação PIB, população e geração de resíduos por região – Fonte IBGE (2010)	10
Figura 5 – Contraste entre a disposição adequada e inadequada de RSU no Brasil	11
Figura 6 – Gastos municipais médios com gerenciamento do RSU no Brasil de 2008 a 2012 – Fonte ABRELPE 2012	12
Figura 7 – Esquema de coleta pneumática por sucção.....	15
Figura 8 – Decomposição da matéria orgânica em função do tempo e composição dos gases gerados CASSINI (2014).....	17
Figura 9 – Rede de captação de biogás. Fonte: ALVES (2000)	20
Figura 10 - Comportamento da composição gravimétrica nas rotas de coleta estudadas em Recife (GRS, 2014)	25
Figura 11 - Composição gravimétrica média, mínima e máxima dos resíduos coletados em 31 rotas da Cidade do Recife (GRS, 20014).....	27
Figura 13 – Variação da cotação de Crédito de Carbono – 27/10/2016 (Investing.com)	35
Figura 14 – Ciclo de aprovação de um projeto de MDL – Fonte MCTI - 2016	35
Figura 12 – Projeção populacional – Elaboração Própria.....	38
Figura 15 – Quantidade de m ³ de biogás produzido por tonelada de resíduo	39
Figura 16 – Demonstrativos das receitas ano a ano	40
Figura 17 – Fluxo de Caixa de Projeto	42
Figura 18 - Fluxo de Caixa Alavancado	43
Figura 19 – Curva Gaussiana de risco do VPL.....	44
Figura 20 – Distribuição Gaussiana de risco da TIR	45
Figura 21 – Análise de sensibilidade das variáveis.....	45
Figura 22 – Distribuição de projetos de MDL no Brasil – Fonte Google 2016.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Destinação final de RSU entre 1989 e 2008 - Fonte IBGE (2008).....	14
Tabela 2- Fatores que influenciam na produção do biogás.....	19
Tabela 3 - Comparação das tecnologias (USEPA, 1996 – Adaptado).....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa e motivação.....	2
1.2	Objetivos gerais e específicos.....	2
1.3	Apresentação do trabalho.....	2
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1	Digestão anaeróbica.....	3
2.1.1	<i>Origem do biogás</i>	3
2.2	Resíduos sólidos urbanos.....	5
2.2.1	<i>Tratamento e disposição</i>	5
2.2.2	<i>Operacionalidade de um aterro</i>	7
2.3	Panorama dos resíduos sólidos urbano no Brasil.....	9
2.3.1	<i>Aterros Sanitários</i>	13
2.3.2	<i>Futuro do resíduos sólidos urbanos</i>	14
2.4	Produção do biogás.....	16
2.4.1	<i>Formação do biogás</i>	16
2.4.2	<i>Fatores que influenciam na geração do biogás</i>	17
2.4.3	<i>Captação do biogás de aterro sanitário</i>	19
2.5	Conversão do biogás em energia elétrica.....	20
2.6	Estudo de viabilidade técnica e econômica.....	21
2.6.1	<i>Viabilidade econômica financeira</i>	22
2.6.2	<i>Análise de Risco</i>	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	Célula energética.....	24
3.1.1	<i>A escolha da tecnologia a ser aplicada</i>	28
3.2	Parâmetros utilizados para o cálculo.....	30

3.2.1	<i>Projeções</i>	30
3.2.2	<i>Estudo de viabilidade</i>	31
3.2.2.1	<i>CAPEX</i>	32
3.2.2.2	<i>OPEX</i>	33
3.2.2.3	<i>WACC</i>	33
3.2.2.4	<i>Receitas</i>	34
3.2.3	<i>Análise de risco</i>	36
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
4.1.1	<i>Projeções</i>	37
4.1.2	<i>Fluxo de Caixa</i>	39
4.1.3	<i>VPL e TIR</i>	44
4.1.4	<i>Simulação Monte Carlo</i>	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
6	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305, de 2010, estabelece que todos os municípios apresentem um plano de gestão de resíduos sólidos. Entre as diretrizes apresentadas por essa lei, foi atribuída uma meta para que o Brasil encerre todos os lixões até 2014, os quais terão suas demandas supridas pelos aterros sanitários. Além disso, os resíduos recicláveis não poderão ser enviados para os aterros sanitários e os municípios que desrespeitarem a norma podem ser multados.

Esta mesma Política aponta para a necessidade do aproveitamento energético dos resíduos sólidos no Brasil, como forma de gerar novas energias alternativas e reduzir a emissão de gases de efeito estufa, resultando em um benefício duplo para a sociedade. Atualmente no Brasil esta parcela de energia é insignificante em nossa matriz energética (menos de 0,1%), o que é um contrassenso quando comparado aos países desenvolvidos, onde esta parcela pode alcançar até 5%.

Pernambuco, hoje, conta com apenas 18 aterros sanitários que atendem 35 municípios e 200 lixões espalhados pelo estado, portando, existe uma deficiência de aterros e uma urgência para cumprir o prazo determinado pelo CONAMA no fechamento desses lixões, além de atender a PNRS (2010). Além disso, no Estado não há qualquer tipo de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.

O biogás é um produto da decomposição anaeróbica da matéria orgânica que possui potencial para aproveitamento energético por apresentar metano em sua composição. Diante disso, a utilização do biogás como fonte de energia renovável tem sido uma opção que vem sendo cada vez mais praticada em aterros sanitários.

Na Alemanha em 2013 foram produzidos 197,1 bilhões de kWh de energia primária a partir de substratos orgânicos, nesse mesmo ano Itaipu produziu 98,6 bilhões de kWh. Ainda nesse ano, a potência instalada a partir do biogás no Brasil era cerca de 80 MW. Esse valor que representa 0,1% da nossa matriz energética pode alcançar até 536 MW de potência instalada, utilizando apenas aterros sanitários.

Portanto, considerando esse contexto, um estudo de viabilidade econômica e financeira será realizado com o intuito de avaliar a rentabilidade da implementação de uma célula energética em um aterro sanitário em Pernambuco.

1.1 Justificativa e motivação

Os processos de produção de biogás, a partir de resíduos sólidos urbanos, são, em primeiro lugar, processos de tratamento que oferecem vantagens sociais, ambientais e econômicas, pois reduzem e/ou estabilizam o volume de resíduos a ser destinado a aterros, reduzem a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e geram energia. Torna-se evidente os benefícios da produção do biogás, não só por ser uma fonte de energia renovável, mas também por contribuir na melhoria da gestão de resíduos sólidos e ajudar na atenuação da crise energética vivenciada pelo país.

1.2 Objetivos gerais e específicos

O presente relatório de conclusão de curso tem como principal objetivo avaliar a se a instalação de uma célula energética em um aterro sanitário na Cidade do Recife tem possibilidade de trazer retornos financeiros dentro de um período de tempo aceitável.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- Apresentar as principais tecnologias disponíveis
- Apresentar qual tecnologia para geração de energia e o tipo de instalação melhor se enquadram na Cidade de Recife
- Calcular o valor presente líquido e a taxa interna de retorno para comercialização de energia elétrica e receitas de mecanismo de desenvolvimento limpo
- Verificar o risco associado ao projeto.

1.3 Apresentação do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, incluindo esta introdução (Capítulo 1). O referencial teórico aborda os conceitos da pesquisa estão no Capítulo 2. Em seguida se apresenta a metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho, considerando os dados primários e secundários utilizados, suas fontes, forma de tratamento e abrangência. Além disso, neste Capítulo 3 foram apresentados os métodos utilizados para análise de viabilidade econômica e de riscos para os diferentes cenários propostos. No Capítulo 4 foram apresentados os resultados da pesquisa, fazendo-se uma análise crítica do que foi obtido, além de uma comparação com estudos de caso semelhantes existentes na literatura. Por fim, as principais conclusões e considerações finais da pesquisa estão apresentadas no Capítulo 5.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Digestão anaeróbica

A digestão anaeróbica (ou anaeróbia) é um processo de decomposição de matéria orgânica por bactérias em um meio onde a presença de oxigênio gasoso é escassa ou totalmente zero.

No que tange à utilização da digestão anaeróbica, atualmente, pode-se citar o tratamento de resíduos como os provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's), ou em aterros sanitários que, por meio de biodigestores ou células energéticas utilizam o gás resultante do processo para gerar energia. No tocante aos processos que decorrem durante a digestão anaeróbica, afirma-se que a combinação destes resulta na decomposição da matéria: a primeira fase é a liquefação ou hidrólise onde o material orgânico complexo é transformado em compostos dissolvidos ou matéria orgânica volátil; a segunda fase é a gaseificação que pode ser subdividida em duas fases fermentação ácida ou acidogênese, onde os compostos são transformados em ácidos orgânicos voláteis (fórmico, acético, propiônico, butírico e valérico), e a fermentação acetogênica ou acetogênese, onde os produtos da subfase anterior são transformados em acetato, hidrogênio e monóxido de carbono; a terceira e última fase é a metanogênese, onde os produtos da acetogênese são transformados, principalmente em metano (CH₄), embora também sejam gerados outros gases.

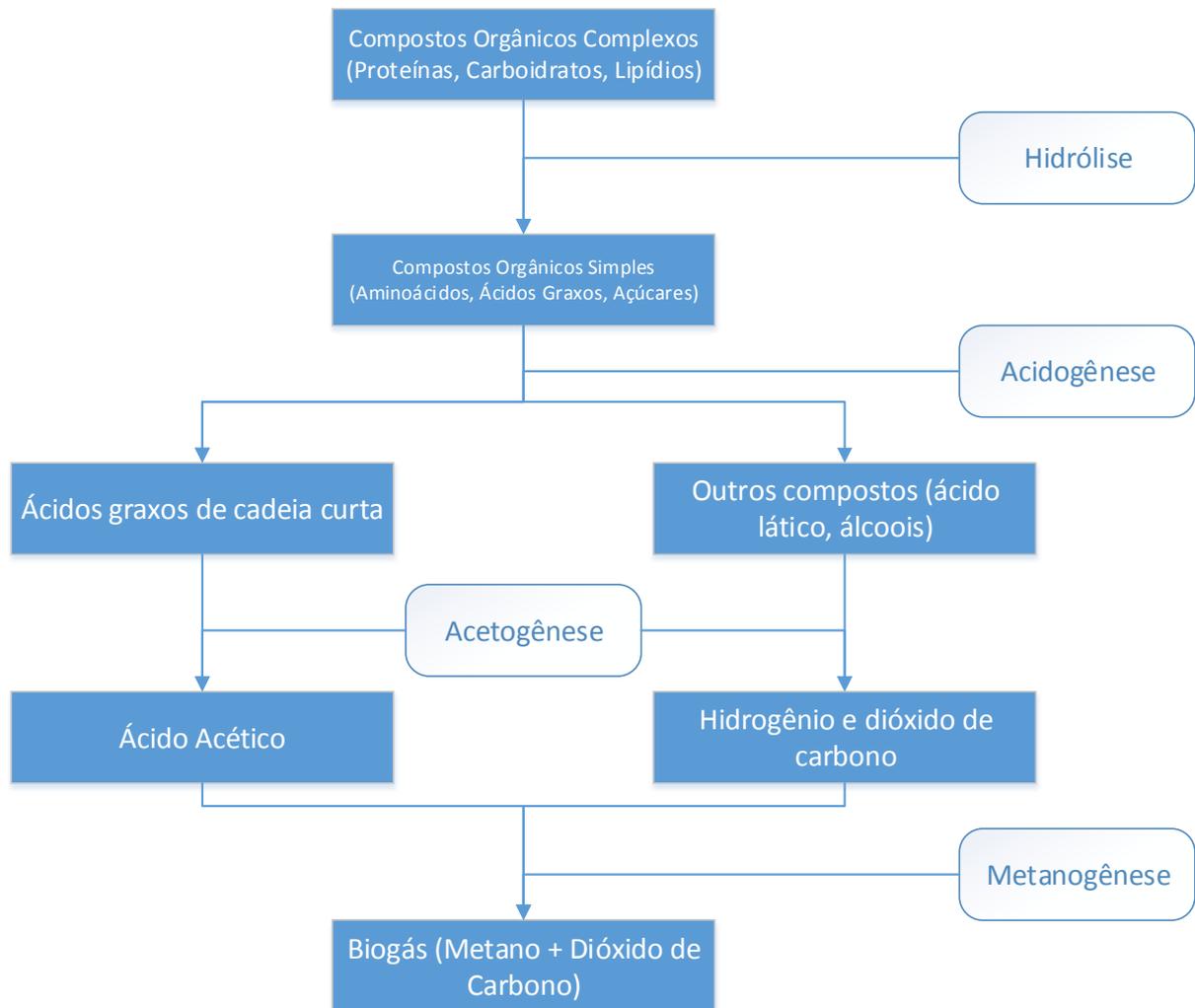
2.1.1 Origem do biogás

De maneira intuitiva, a parcela “bio” do nome biogás indica um processo biológico. Nessa ótica, a matéria orgânica quando decomposta em meio anaeróbio, ou seja, através de um processo biológico, dá origem à uma mistura gasosa chamada de biogás.

Tal processo biológico ocorre normalmente na natureza, em pântanos, fundo de lagos e no rúmeme de animais, ou seja, em locais com grande presença de matéria orgânica e bactérias anaeróbicas.

O processo de formação do biogás se divide em vários estágios, como mostra a figura a seguir. Para que todo o processo seja realizado de forma adequada, todas as etapas de decomposição devem estar em consonância entre si.

Figura 1 Etapas de Formação do Biogás – Fonte: Desenvolvimento Próprio



Na primeira etapa, como destacado na figura, chama-se hidrólise. Nesse momento, bactérias hidrolíticas, por meio de liberação de enzima, transformam os compostos da matéria orgânica mais complexa em substâncias mais simples. A seguir, atuam as bactérias fermentativas acidogênicas, tais microorganismos têm como finalidade decompor os compostos orgânicos simples em ácidos graxos de cadeia curta (ácido acético, propiônico e butírico), hidrogênio, dióxido de carbono, ácido lático e álcoois. Essa fase é chamada de acidogênese e os compostos formados dependem da concentração de hidrogênio nas substâncias consumidas. Posteriormente, na fase chamada de acetogênese, a atuação das bactérias acetogênicas convertem os componentes em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Vale ressaltar que a acidogênese já converte parte dos compostos orgânicos simples em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, os mesmos compostos que a acetogênese tem como resultado de conversão. Nessa etapa, a pressão parcial do hidrogênio é determinante. Por motivos de

cunho energético, uma concentração de hidrogênio muito elevada impede a conversão dos compostos intermediários da acidogênese. Conseqüentemente, ocorre o acúmulo de ácidos orgânicos que suprimem a metanogênese. Por fim, no último estágio, conhecido como metanogênese, ocorre a transformação do ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio em metano, por meio das arqueas metanogênicas.

De maneira geral, as quatro fases supracitadas ocorrem paralelamente em um processo de um único estágio. Porém, cada grupo de bactérias possui critérios e condições ótimas diferentes, tais como pH e temperatura, portanto, deve-se escolher um intervalo que seja favorável para todas, tendo como vista o maior percentual de metano.

2.2 Resíduos sólidos urbanos

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de acordo com a norma NBR.10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, vulgarmente denominados de lixo urbano, são resultantes da atividade doméstica e comercial dos centros urbanos. A composição varia de acordo com a população, situação socioeconômica e da cultura de cada sociedade. Esses resíduos possuem diversas classificações e tipos e devem ter seu acondicionamento adequado.

2.2.1 Tratamento e disposição

O aterro sanitário tem como objetivo ser o local de disposição final dos resíduos sólidos urbanos, uma vez que o mesmo é dimensionado para minorar os impactos causados por tais resíduos. Dessa maneira, um aterro deve possuir medidas de engenharia para confinar resíduos sólidos à menor área possível e reduzir os mesmos ao menor volume possível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão da jornada de trabalho ou em intervalos menores, se necessário. Deve também ser impermeabilizado e possuir acesso restrito, ter a quantidade de lixo controlada e conhecer que tipos de resíduos estão sendo depositados. De preferência, os aterros sanitários devem ser construídos em locais afastados das cidades em razão do mau cheiro e da possibilidade de contaminação do solo e das águas subterrâneas. Essa contaminação pode ocorrer por infiltração do chorume ou percolato, líquido contendo componentes tóxicos que flui do lixo para o solo e corpos d'água.

Atualmente, existem normas que regulam a implantação dos aterros, uma dessas exigências é a implantação de mantas impermeabilizantes que evitem essa infiltração. Além disso, é requerido remover o chorume produzido por sistemas de drenagem para ser tratado.

Ademais ao chorume produzido, existem gases que são emitidos durante o acondicionamento dos resíduos e estes podem ser aproveitados como combustíveis. Outras maneiras ambientalmente mais viáveis são a reciclagem, a compostagem, a reutilização e a redução.

No que diz respeito ao tipo dos resíduos que são direcionados para o aterro, estes são resíduos não recicláveis, uma vez que o objetivo do aterro é dar uma destinação final aos componentes. Portanto, materiais recicláveis são direcionados para locais onde estes sofrerão transformações em matéria-prima e retornarão para a sociedade em curto prazo. No entanto, para que a reciclagem ocorra, é necessário que o município possua programas e incentivos de coleta seletiva do lixo.

A seguir serão apresentadas metodologias de tratamento de resíduos com o objetivo de reduzir o volume gerado, são elas: compostagem, incineração e reciclagem. Tais técnicas são utilizadas largamente, uma vez que a diminuição do volume de resíduos destinados a aterros tem como consequência benefícios socioambientais.

A compostagem é o processo de tratamento de resíduos em que ocorre, por meio de processos físicos, químicos e biológicos, a transformação da matéria orgânica em um material estável e utilizável na agricultura. Esta transformação ocorre naturalmente e é realizada por microrganismos presentes no próprio resíduo, porém pode ser acelerado pela intervenção humana (BRITO 2010).

Assim, a compostagem é que transforma a matéria orgânica, como estrume, folhas, papel e restos de comida, em um material semelhante ao solo, a que se chama composto, e que pode ser utilizado como adubo. Dessa forma, trata-se de uma reciclagem da matéria orgânica.

A incineração é o processo de queima de resíduos a elevadas temperaturas (900 a 1200°C) com tempo de permanência controlada, onde ocorre decomposição térmica da parcela orgânica dos resíduos, a consequência disso é a redução do peso e volume do resíduo inicial. Além disso, existe a possibilidade de aproveitar o calor gerado nesse processo para geração de energia térmica ou elétrica. O Brasil não é conhecido pelo uso de tal técnica, no entanto, esse processo vem ganhando força nos últimos anos devido aos aterros sanitários estarem sobrecarregados.

Por fim, a reciclagem consiste na triagem dos resíduos, onde são separados diversos materiais tendo como critério sua composição, para posterior utilização na produção de novos produtos. Esse processo é bastante vantajoso do ponto de vista socioeconômico e ambiental,

uma vez que reduz a quantidade de resíduos destinados aterros e diminui a necessidade de extração de recursos naturais utilizados no processo de fabricação.

2.2.2 Operacionalidade de um aterro

O gerenciamento de resíduos sólidos tem como objetivo a coleta, tratamento e disposição final do lixo gerado pela população, seguindo normas socioambientais de uma maneira economicamente viável. Dessa forma, se faz necessária uma constante evolução de técnicas e práticas para tornar sua operação cada vez mais eficaz.

A dinâmica de operação de um aterro sanitário, apesar de simples, deve possuir um grande controle e eficiência uma vez que trata diretamente com contaminantes. Além disso, todos os procedimentos que ocorrem durante sua operação devem ser devidamente registrados e catalogados para que permita a avaliação do aterro e suas instalações.

Inicialmente, para os recebimentos dos resíduos, necessita-se de uma inspeção preliminar onde ocorrem conferências, vistorias e pesagens. Para tanto, verifica-se a origem, natureza e classe dos resíduos e os motoristas são orientados onde devem descarregar tal resíduo. Dessa forma, a partir das definições da norma NBR 10.004/87, apenas podem ser depositados resíduos de Classe II não inertes. Portanto, se encaixam nessa definição: resíduos sólidos urbanos de origem domiciliar e comercial; resíduos dos serviços de capina, varrição, poda e raspagem; resíduos de gradeamento e lodos desidratados das Estações de Tratamento de Esgoto; resíduos desidratados de veículos limpa-fossas; resíduos desidratados de Estações de Tratamento de Água e resíduos sólidos provenientes de indústrias, comércios ou outras origens que tenham sua classificação como Classe II comprovada por laudo técnico de análises laboratoriais, conforme normas específicas da ABNT.

Após depositado o resíduo, um dos aspectos que possui suma importância na funcionalidade do aterro é a impermeabilização da base, pois, tal camada deve garantir a separação segura do resíduo e suas substâncias tóxicas do lençol freático. Para que essa impermeabilização ocorra de maneira eficiente, é necessário possuir camadas de solo argiloso, baixa permeabilidade ou geomembrana sintética com espessuras adequadas. Durante a execução das camadas é fundamental um rigoroso controle de compactação em cada espessura de solo espalhado para garantir sua funcionalidade.

Outro componente de infraestrutura essencial para ao aterro é a drenagem interna. O bom funcionamento do sistema de drenagem interna de percolados e de gases é fundamental para a

estabilidade do aterro sanitário. Portanto, deve-se construir drenos internos horizontais e verticais, os quais devem ser interligados buscando a melhor eficiência na drenagem dos gases e chorume. No entanto, o que ainda é muito usual em aterros, queimar os gases emitidos como mecanismo de controle, esta prática compreende em um grande desperdício energético no que tange os propósitos desse documento.

Além da drenagem interna, é necessária uma drenagem superficial, uma vez que os aterros operam ao céu aberto, é necessário um sistema eficiente que conduza a água para cursos d'águas antes que a mesma se contamine com o chorume produzido. Dessa maneira, deve-se sempre realizar manutenções para garantir que todos os canais de drenagem se encontrem desobstruídos.

No que tange à disposição de resíduos, deve-se realizar sempre um controle rigoroso sobre sua delimitação e altura na qual o tratorista deve trabalhar e estabelecer uma área para descargas emergencial, previamente preparada, para quando ocorrerem chuvas que impeçam a execução segura dos trabalhos. Os resíduos devem ser descarregados em pilhas imediatamente a jusante das frentes de operações, supervisionada por um fiscal. O desmonte dessas pilhas de resíduos deverá ser feito com o auxílio da lâmina do trator de esteira que, em seguida, procederá a seu espalhamento e compactação.

Após descarga dos resíduos deve-se realizar o espalhamento e compactação destes. O equipamento utilizado para compactação pode ser um trator esteira com peso operacional no mínimo 15 toneladas. O espalhamento e compactação é realizado formando rampas de 1 na vertical para 3 na horizontal, efetuando movimentos repetidos até que todo material disposto em cada camada esteja adequadamente adensado. Periodicamente, é necessário realizar testes de densidade de forma a realizar controles sobre a compactação.

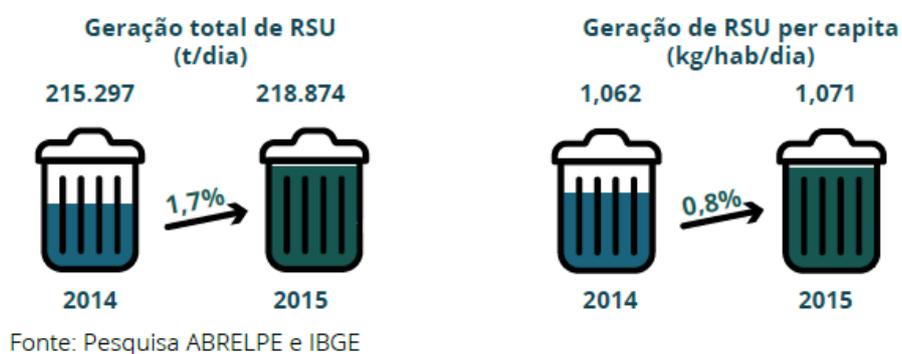
Por fim, com os resíduos devidamente compactados, deve-se realizar o recobrimento. Esse processo consiste em adicionar sobre os resíduos já adensados uma camada de terra. A cobertura pode ser diária, que evita arraste de materiais pela ação do vento e odores ou final que é composta por argila compactada e possui uma espessura maior. A compactação final só ocorre quando a capacidade da plataforma do aterro é esgotada. Atualmente, a CTR localizado na Muribeca é o aterro sanitário que acondiciona os resíduos provenientes da Região Metropolitana do Recife, no entanto, a prática proposta por esse trabalho evidencia uma inovação no que tange a combinação de receitas por venda de energia e crédito de carbono.

Assim, os resultados obtidos nesse documento, correspondem a uma proposta inovadora para o uso dos resíduos sólidos urbanos de Recife.

2.3 Panorama dos resíduos sólidos urbano no Brasil

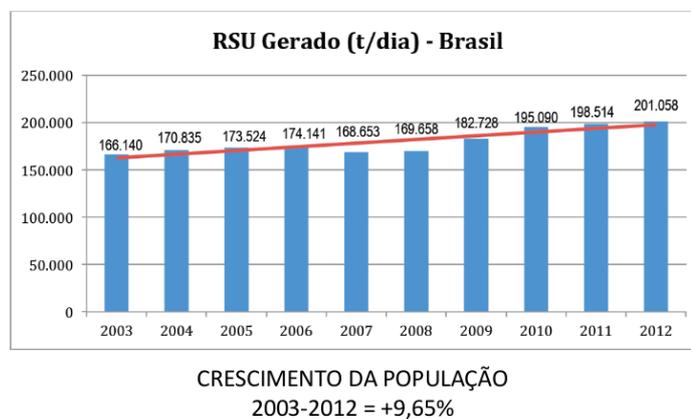
A geração total de RSU no Brasil em 2015 foi de aproximadamente 218.874 toneladas por dia, o que representa um aumento de 1,7% em relação à geração em 2014, índice superior à taxa de crescimento populacional no país no mesmo período, que foi de 0,8% (ABRELPE, 2015). Portanto, pode-se concluir que a quantidade de produção de resíduos por habitante aumentou, como mostra a figura:

Figura 2 – Elevação da geração de resíduos por habitante



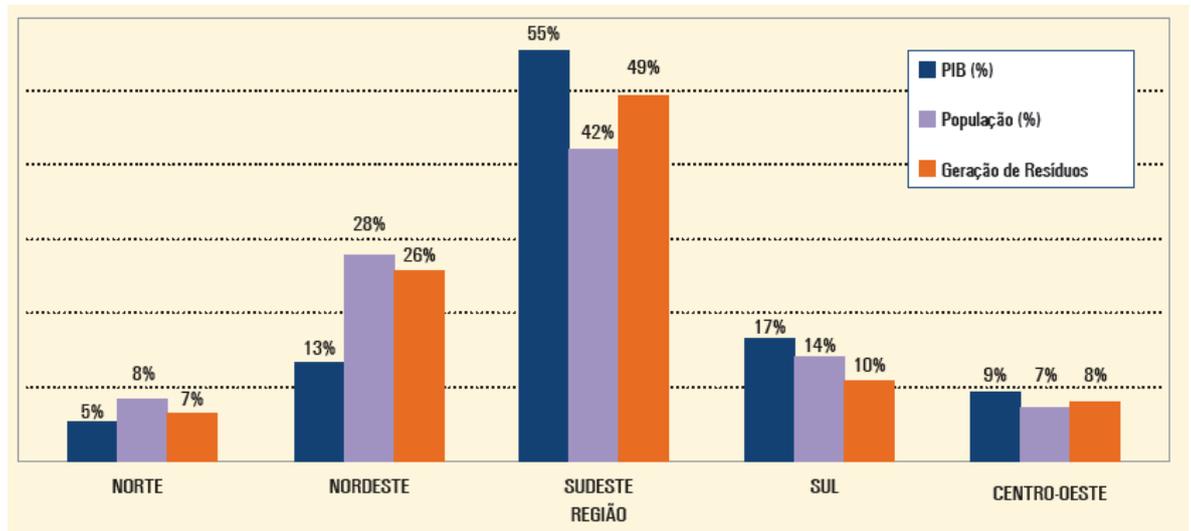
Pode-se notar, na figura acima, que ocorreu um crescimento de 0,8% no total de kilograma de RSU gerado por habitante em 2015, a consequência disso é a evolução tecnológica, carência de reciclagem e reutilização e a falta programas de incentivo à minoração da geração de resíduos. Além disso, quando o período de 2003 até 2012, foi constatado que a população cresceu 9,65% e a quantidade gerada de RSU cresceu 21%, isso mostra que esse crescimento desigual não ocorre em anos específicos e sim é uma tendência.

Figura 3 - Crescimento do RSU em função do tempo



A geração de resíduos depende não só da população, mas também do PIB da região. É sabido que quanto maior o poder aquisitivo de uma região maior a quantidade de RSU produzido por ela, a figura a seguir apresenta os percentuais de geração de resíduos, população e PIB das regiões do país.

Figura 4 – Relação PIB, população e geração de resíduos por região – Fonte IBGE (2010)



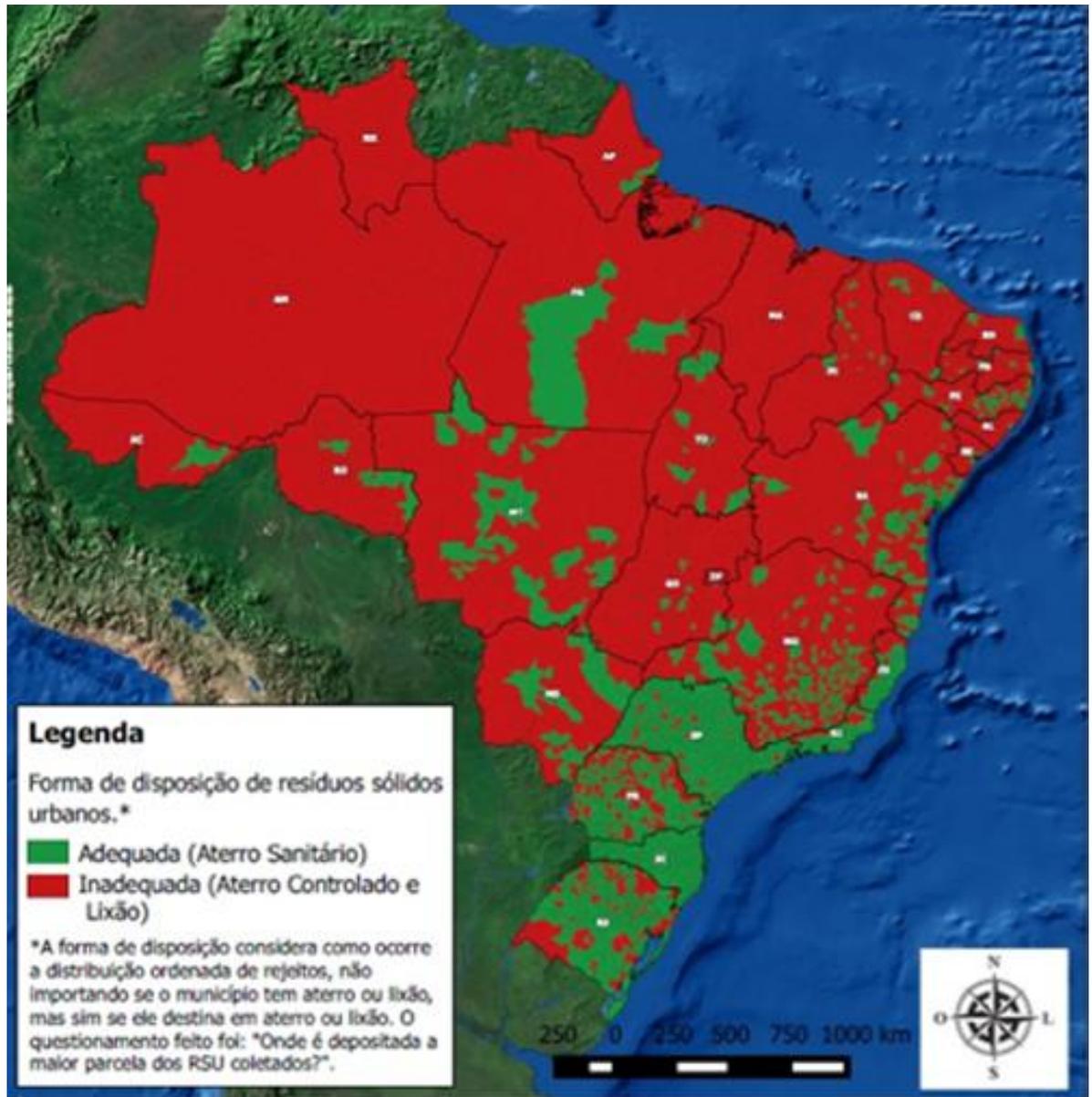
A região Sudeste por ser a mais populosa e por concentrar 50% do PIB é responsável pela maior geração de resíduos do Brasil. Já o Nordeste está em segundo lugar na quantidade de volume gerado. Por fim, a região Sul apresenta um baixo percentual na geração de resíduos em relação ao seu PIB e população, isso é devido ao forte incentivo à reciclagem existente.

Neste sentido, é importante salientar que a geração dos resíduos e, conseqüentemente, seu tratamento e disposição final estão relacionados não apenas à população ou PIB de uma região, estado ou município, mas também à gestão e ao gerenciamento dos resíduos pelo poder municipal, que é capaz de implementar ações que incentivem a redução de resíduos ou o aproveitamento de resíduos.

O grande problema desse crescimento na geração de resíduos é que a coleta e destinação final não acompanham tais taxas e a consequência disso são deposições irregulares e maiores impactos ambientais. Além disso, as diretrizes e condutas sobre a disposição final e aproveitamento dos resíduos na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS – Lei 12.305/2010) não vem sendo cumprida de forma correta, pois ainda existem grandes números de lixões espalhados por todo país. Tal descumprimento vem resultando em insatisfações de órgãos ambientais e podem acarretar em multas para as prefeituras imputadas, como mostra a

figura a seguir, que indica como vermelho os locais onde não há destinação correta do RSU e como verde as regiões onde a destinação é adequada.

Figura 5 – Contraste entre a disposição adequada e inadequada de RSU no Brasil



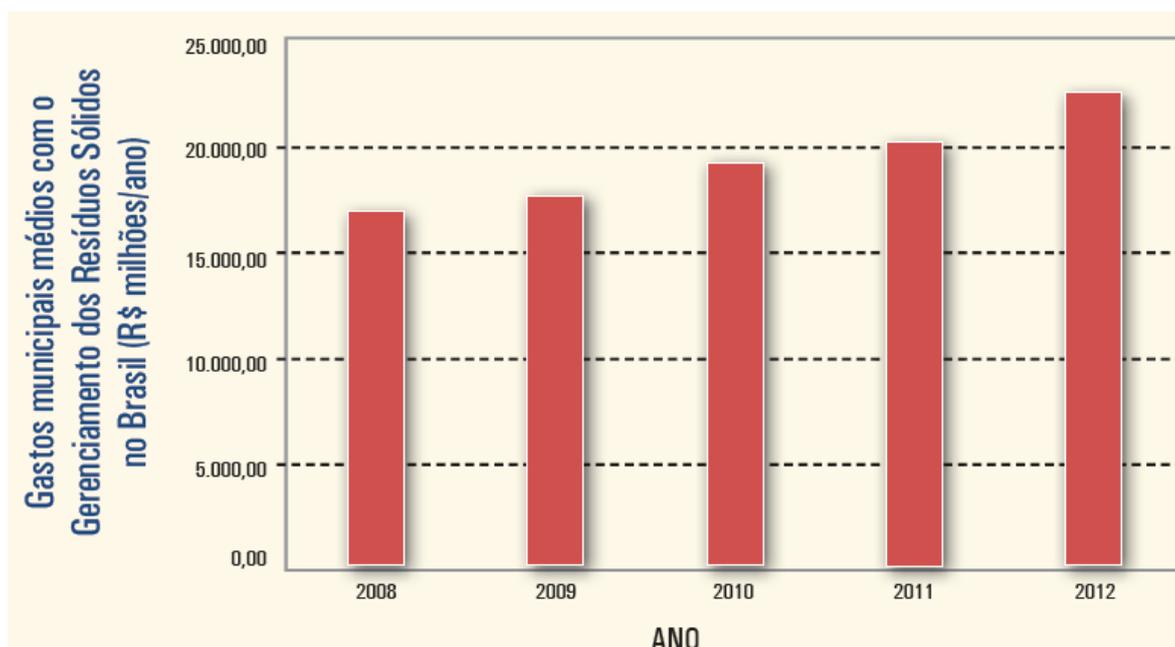
Ademais, o conceito de gestão de RSU é comumente confundido com gerenciamento e é usualmente empregado quando se pretende abranger os aspectos políticos, institucionais, administrativos, operacionais, financeiros, sociais e ambientais, envolvidos direta ou indiretamente com os resíduos.

Portanto, gerenciar significa acompanhar de forma criteriosa todo o ciclo dos resíduos, da geração à disposição final, empregando as técnicas e tecnologias mais compatíveis com a realidade local, promovendo condições adequadas para um destino final ambientalmente

seguro, tanto no presente como no futuro. Em síntese, é o conjunto de ações técnico-operacionais que visam implementar, orientar, coordenar, controlar e fiscalizar os objetivos estabelecidos na gestão. O gerenciamento dos RSU constitui responsabilidade da administração municipal e envolve uma sequência de atividades que auxiliam a melhoria do sistema de limpeza urbana, abrangendo a redução, reutilização e reciclagem (3 R); o acondicionamento; a coleta e transporte dos resíduos; a limpeza dos logradouros; o tratamento (compostagem, reciclagem, incineração, etc.) e a disposição final (aterros sanitários).

No tocante aos aspectos econômicos do gerenciamento e gestão do RSU gerados no país, pode-se afirmar que os municípios estão investindo cada vez mais, como mostra o gráfico abaixo, tais gastos incluem coleta, transporte, tratamento e destinação final do RSU.

Figura 6 – Gastos municipais médios com gerenciamento do RSU no Brasil de 2008 a 2012 – Fonte ABRELPE 2012



No entanto, ao analisar os gastos per capita com gerenciamento de resíduos sólidos em algumas importantes cidades do mundo, que incluem investimentos para a prestação de serviços de Gestão de Resíduos Sólidos em todas as suas etapas operacionais, englobando a coleta, transporte, transbordo, tratamento e disposição final ambientalmente adequada, observou-se uma discrepância em relação ao Brasil. A média internacional é de R\$ 429,78/hab./ano enquanto a média brasileira se encontra em R\$ 88,01/hab./ano. (Gestão da Limpeza Urbana, 2011).

Dessa maneira, compreendendo a situação em que o Brasil se encontra em relação ao Resíduos Sólidos Urbanos, as legislações vigentes e as dificuldades, é possível direcionar estudos para determinar qual aspectos poderiam trazer maiores benefícios para a região.

2.3.1 Aterros Sanitários

Ainda no panorama sobre o RSU no Brasil, é necessário focar na análise dos aterros sanitários, principal objeto para geração de biogás desse documento. Nos dias atuais tanto as grandes cidades como as pequenas, vêm encontrando grandes problemas que estão relacionados ao lixo sólido, resultado estes, cada vez mais de uma sociedade consumista nos diversos sentidos, bem como com um crescente aumento na geração de resíduos, como mencionado anteriormente.

O motivo dessa tendência é a elevação do nível populacional, que gera uma maior quantidade de dejetos, como também em grande parte pelas indústrias de bens de consumo que não se adequaram em receber e processar os próprios produtos descartados na natureza. Assim, a falta de um local adequado para o processamento desses resíduos gerados, impossibilita tornar o meio ambiente mais adequado aos resultados provocados por este consumo crescente, e impactando de forma negativa a sociedade. Além disso, a coleta seletiva não é algo muito praticado na maioria das cidades brasileiras, tornando as alternativas de tratamento mais limitadas.

Dessa forma, a metodologia de destinação final para os resíduos deve ser estudada e planejada para que melhor se adeque a situação da região. Como exemplo pode-se citar o Japão que não dispõe de grandes áreas para destinação de aterros e possui rigorosas leis de ocupação do solo, necessitando focar na redução do volume dos resíduos e, portanto, utiliza de incineração e aproveitamento de cinzas para obras civis. Já o Estados Unidos, país de grande dimensão, utilizam técnicas de aterros sanitários como destino final para resíduos sólidos urbanos. O Brasil, assim como o EUA, possui dimensão suficiente para disposição de resíduos sólidos, não necessitando realizar a incineração como o Japão.

No tocante ao gerenciamento dos serviços de limpeza urbana nas cidades de médio e grande porte, vem se percebendo um aumento da terceirização dos serviços, modelo cada vez mais adotado no Brasil, em substituição dos serviços, até então executados pela administração municipal. Essa forma de prestação de serviços se dá através da contratação, pela municipalidade, de empresas privadas, que passam a executar, com seus próprios meios

(equipamentos e pessoal), coleta, a limpeza de logradouros, o tratamento e a destinação final dos resíduos. Nos municípios de pequeno porte, ainda predomina a execução dos serviços pela municipalidade.

Por fim, devido à falta de dados mais atuais disponíveis, tendo como referência um espaço de tempo de 20 anos (entre 1989 e 2008), é possível identificar uma perspectiva otimista quanto à disposição final dos resíduos no Brasil, no entanto, ainda muito longe da situação ideal. Segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) do ano de 2008, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os vazadouros a céu aberto, também conhecidos como lixões, ainda são responsáveis pelo destino de 50,8% dos resíduos sólidos urbanos dos municípios do Brasil, como mostra a tabela.

Tabela 1 Destinação final de RSU entre 1989 e 2008 - Fonte IBGE (2008)

Ano	Vazadouro a céu aberto (%)	Aterro controlado (%)	Aterro sanitário (%)
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

2.3.2 Futuro do resíduos sólidos urbanos

No que tange ao futuro dos resíduos sólidos urbanos, pode-se citar propostas para melhorias na coleta, sendo uma delas já aplicada, a coleta pneumática por sucção. A coleta pneumática de resíduos sólidos é adotada em países da Europa, Ásia e América do Norte para tornar menos custoso e poluente o recolhimento do lixo urbano. A tecnologia funciona da seguinte maneira: a população deposita sacos de resíduos em coletores instalados nas vias e/ou edifícios. Quando esses coletores, conectados a uma tubulação subterrânea, estão cheios, um sensor aciona o disparo dos resíduos, que seguem em vácuo, por sucção, até as centrais de coleta, onde os materiais são separados e compactados em contêineres estanques, para destinação final.

Figura 7 – Esquema de coleta pneumática por sucção.



Além do método supracitado e outros que buscam melhorar a eficiência da coleta dos resíduos, a utilização do resíduo para geração energia e divisas para o Mercado de Carbono por meio do biogás é o futuro mais promissor do RSU. O propósito é obter energia a partir dos resíduos sólidos através do biogás proveniente de várias fontes, em especial aterros sanitários. O biogás é produto resultante do processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica encontrada nos aterros, agricultura e estações de tratamento de esgoto, pela ação de bactérias. Denominado “gás verde”, tem como base o gás metano (CH_4), grande contribuinte para o efeito estufa, mas que pode ser aproveitado como fonte alternativa de energia renovável e na geração de divisas no âmbito do Mercado de Carbono. Vale ressaltar que o impacto de efeito estufa do biogás é 21 vezes menor do que o dióxido de carbono, ou seja, a utilização do biogás não somente é benéfica devido ao seu potencial energético, mas também por reduzir a emissão de gases de efeito estufa, minorando o aquecimento global.

Em 2020, a União Europeia suprirá 20% da energia primária e 35% da energia elétrica com fontes renováveis (BMU, 2011). A produção de biogás na União Europeia correspondeu, em 2011, a 10.858 Mtoe (million tons oil equivalents) com 66,5% produzidos com substratos da agricultura; 23,6% nos aterros e 9,9% nas estações de tratamento de esgoto (lodos).

Em 2013 o Brasil gerou cerca de 80MW em plataformas de biogás. São 22 usinas injetando energia na rede elétrica a partir do Sistema Interligado Nacional (SIN). A maioria dessas usinas estão instaladas em aterros sanitários, em propriedades rurais e em unidades de resíduos da agropecuária. No entanto, considera-se esse número de usinas e seu valor energético produzido como baixo, visto que com apenas aterros sanitários seria possível gerar até 536MW a partir do biogás produzido. Disso posto, existe muitas oportunidades de crescimento e expansão, juntamente com desenvolvimento de melhores práticas e tecnologias para a área.

Os processos de produção de biogás, a partir de resíduos sólidos urbanos, são, em primeiro lugar, processos de tratamento que oferecem vantagens sociais, ambientais e econômicas, pois reduzem e/ou estabilizam o volume de resíduos a ser destinado a aterros, reduzem a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e geram energia. Torna-se evidente os benefícios da produção do biogás, não só por ser uma fonte de energia renovável, mas também por contribuir na melhoria da gestão de resíduos sólidos e ajudar na atenuação da crise energética vivenciada pelo país.

Apesar de todos esses benefícios, o biogás ainda enfrenta alguns desafios, em especial no que se refere ao biogás proveniente de aterros sanitários. Os municípios brasileiros não dispõem de uma gestão eficiente de resíduos sólidos, resultando em uma coleta seletiva precária, o que dificulta a triagem da matéria orgânica, matéria prima do biogás.

2.4 Produção do biogás

2.4.1 Formação do biogás

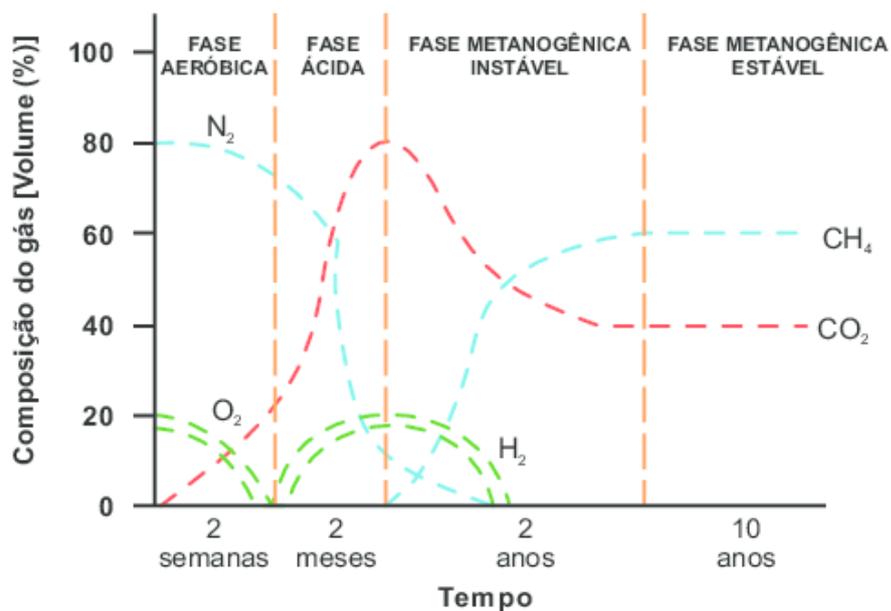
O biogás é formado a partir da degradação da matéria orgânica. Sua produção é possível a partir de uma grande variedade de resíduos orgânicos como: lixo doméstico, resíduos das atividades agrícolas e pecuárias, lodo de esgoto, entre outros. Usualmente, a composição do biogás se dá por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfúrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e amins voláteis. Tais percentuais oscilam a depender do resíduo, do tratamento e da eficiência do processo, podendo possuir um teor de metano de até 80%. Em um aterro sanitário o potencial de geração de biogás pode chegar até 400 m³/ton de resíduo (ALVES, 2008). No mais, quando se faz o uso de um biodigestor para captação do gás verde esse potencial pode ser ainda maior.

Considera-se a decomposição microbiológica da matéria degradável complexa como o processo mais relevante em termos de geração de biogás. Tal processo é descrito como longo e sequencial e abrangem microrganismos aeróbicos e anaeróbicos em razão dos metabolismos distintos que se sucedem ou se superpõem.

O procedimento de decomposição em um aterro sanitário começa logo após a deposição e disposição dos resíduos. Nessa etapa predomina a condição aeróbica pela presença do oxigênio nos espaços vazios dos resíduos onde ocorre a ação dos microrganismos aeróbicos, são eles bactérias, leveduras e fungos. Assim, são produzidos dióxido de carbono, água, calor e outros subprodutos como biomassa e moléculas complexas durante essa fase.

Com o consumo do oxigênio, inicia-se a fase anaeróbica, onde atuam as bactérias anaeróbicas. Essa etapa, além de ser a mais duradoura, é dita como a mais significativa em termos do gás metano o que a torna foco de diversos estudos laboratoriais e modelagens. Como mostrado anteriormente no item de origem do biogás, o processo anaeróbico é subdividido nas quatro fases, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese as quais dependem de outros condicionantes. A imagem a seguir representa principais fases da biodegradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, analisado em função do tempo e composição dos gases gerados.

Figura 8 – Decomposição da matéria orgânica em função do tempo e composição dos gases gerados
CASSINI (2014)



Portanto, em um aterro, as fases de degradação, a velocidade de decomposição e a consequente geração de biogás dependem de diversos fatores tais como a composição do resíduo, do teor de umidade dos resíduos, idade do resíduo, pH, temperatura, tamanho das partículas, densidade dos resíduos, flora microbiana, além das condições ambientais.

2.4.2 Fatores que influenciam na geração do biogás

Como supracitado no item referencial teórico, existem fatores que interferem na produção do biogás, estes serão avaliados nessa seção desse documento.

- Impermeabilidade ao ar: As bactérias metanogênicas são essencialmente anaeróbias. A decomposição de matéria orgânica na presença de ar (oxigênio) irá produzir apenas dióxido de carbono (CO₂) (JUNIOR, 2000).
- Natureza do substrato: Os substratos nutritivos devem prover as fontes de alimentos aos microrganismos, elementos químicos constituindo o material celular e os necessários às atividades enzimáticas, particularmente os oligoelementos, como o cálcio, magnésio, potássio, sódio, zinco, ferro, cobalto, cobre, molibdênio e manganês. Em fortes concentrações, esses elementos têm um efeito inibidor sobre o processo de fermentação. Por outro lado, os elementos majoritários como o carbono, nitrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre, têm uma importância fundamental no rendimento dos gases de fermentação (PECORA, 2006).
- Composição dos resíduos: Quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de metano e vazão de biogás. Os principais nutrientes dos microrganismos são carbono, nitrogênio e sais orgânicos. Uma relação específica de carbono para nitrogênio deve ser mantida entre 20:1 e 30:1. A principal fonte de nitrogênio está nas dejeções humanas e de animais, enquanto os polímeros presentes nos restos de culturas representam o principal fornecedor de carbono. A produção de biogás não é bem sucedida, se apenas uma fonte de material for utilizada (JUNIOR, 2000).
- Teor de água: Um baixo teor de água dentro do mecanismo utilizado para a captação do biogás implica numa inibição no seu processo de formação.
- Idade do resíduo: A geração do biogás num aterro possui duas variáveis depende do tempo: tempo de atraso, período que vai da disposição do resíduo até o início da geração do metano e tempo de conversão, período que vai da disposição do resíduo até o término da geração do metano. Resíduos novos possuem um potencial de geração de metano maior em comparação aos envelhecidos, devido ao fato de já terem passado por degradação.
- Temperatura: A atividade enzimática das bactérias depende estritamente da temperatura, uma vez que é conhecido que alterações bruscas de temperatura causam desequilíbrio nas culturas envolvidas, principalmente nas bactérias formadoras de metano. Em torno de 10 °C essa atividade é muito reduzida e acima

de 65 °C as enzimas são destruídas pelo calor. Portanto, a faixa ideal para a produção de biogás é de 32 °C a 37 °C (bactérias mesofílicas) e de 50 °C a 60 °C (bactérias termofílicas) (JUNIOR, 2000).

- pH: A concentração em íons OH⁻ no meio exterior tem uma grande influência sobre o crescimento dos microrganismos. Na digestão anaeróbia, observam-se duas fases sucessivas: a primeira se caracteriza por uma diminuição do pH em patamares próximos de 5,0 e a segunda por um aumento do pH e sua estabilização em valores próximos da neutralidade. A redução do pH é devida à ação das bactérias acidogênicas, as quais liberam rapidamente ácidos graxos voláteis. As bactérias metanogênicas, que têm taxas de crescimento mais fracas que as primeiras, se instalam progressivamente e induzem a elevação do pH através da catálise do ácido acético.

Além disso, em especial para aterros sanitários existem outros fatores que também possuem influência sobre a produção do biogás, a tabela a seguir apresenta um resumo e classifica os aspectos gerais e dos relativos aos aterros.

Tabela 2- Fatores que influenciam na produção do biogás

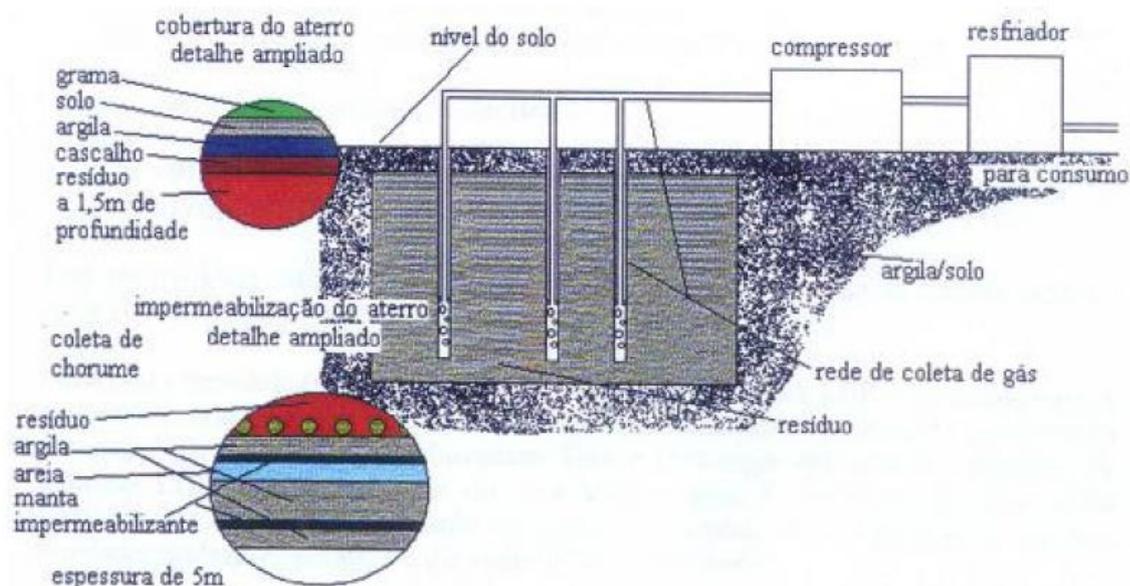
Geometria e operação do aterro	Características dos resíduos	Ambiente interno	Ambiente externo
Dimensão do aterro	Composição do lixo	Umidade da massa na degradação	Precipitação e infiltração
Impermeabilização do aterro	Umidade do lixo	PH das células	Variação na pressão atmosférica
Compactação do lixo	Peso específico	Temperatura	Temperatura

Portanto, o balizamento desses parâmetros com as boas práticas já conhecidas se torna essencial, uma vez que para atingir boas receitas na comercialização do biogás é necessário um produto de qualidade.

2.4.3 Captação do biogás de aterro sanitário

No que tange ao mecanismo de captação do biogás proveniente de aterros sanitários, o método mais simples e que será utilizado na confecção do fluxo de caixa é por meio de uma rede tubos verticais como mostra a figura:

Figura 9 – Rede de captação de biogás. Fonte: ALVES (2000)



O processo de coleta se inicia após uma porção do aterro ser fechada por terra ou pelos próprios resíduos. Cada extremidade de tubo é conectada a uma tubulação lateral que transporta o gás para um coletor principal. Como todo sistema que envolve aspectos econômicos e ambientais deve ser planejado para que um operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás caso seja necessário. O gás verde é succionado do aterro por meio de pressão negativa nos tubos de transmissão, a maior dificuldade de um sistema como esse é regular a qualidade e a quantidade do gás e intervir em caso de vazamentos.

Após a coleta e antes da utilização do biogás para o processo de conversão de energia, o biogás é tratado para a remoção de algum condensado que não foi coletado, assim como particulados e impurezas. O mecanismo de purificação tem como objetivo além de aumentar o poder calorífico e eliminar o gás sulfúrico, pois sua presença oxida o motor e gerador o que pode reduzir a eficiência do sistema.

Por fim, segundo Cunha (2002), a captação do biogás resultante da decomposição dos resíduos orgânicos compactados em aterros é viável do ponto de vista econômico, energético e ambiental, traz redução de custos para a Prefeitura local e um destino nobre para o lixo.

2.5 Conversão do biogás em energia elétrica

A matriz energética brasileira é composta por 80% hidrelétricas 19,9% termoeletricas e 0,1% eólica e é caracterizada por um sistema com grandes centrais de geração e uma extensa

rede de linhas de transmissão e distribuição de energia. Analisando esse quadro, pode-se observar que dentre vários motivos relacionados à crise energética brasileira, podem ser destacados a dependência dos reservatórios de água na geração de energia por meio das hidrelétricas e na necessidade de alto investimento para expandir a produção, visto que se trata de uma geração centralizada.

Tendo isso em vista, a EPE Empresa de Pesquisa de Energia propôs um conceito de oferta descentralizada de energia, ou seja, da produção de energia mais próxima ao ponto de consumo, com atendimento prioritário à demanda e com escalas relativamente reduzidas. A oferta descentralizada de energia aparece no cenário nacional como importante rota de estabilização da oferta, quando o país experimenta as limitações impostas pelo sistema energético atual, a exemplo dos períodos de seca registrados em 2014. Essa dependência ocasiona em prejuízos para o crescimento do país, uma vez que não haja balanço entre as ofertas suficientes para compensar as épocas de seca.

Diante desse cenário, a geração de energia por meio do biogás aparece com forte potencial. O gás verde, por suas características próprias, é a fonte que mais se assemelha à energia hidráulica pela possibilidade de ser armazenado e despachado continuamente, diferentemente das fontes solar e eólica, que se caracterizam pela intermitência de entrada nas redes.

Além disso, com as constantes elevações nos preços de combustíveis e os crescentes anseios por fontes de energias limpas vêm estimulando pesquisas para produzir novas formas de produção energética visando à redução da utilização de recursos naturais.

Por fim, a conversão do biogás em energia elétrica pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por diversas atividades, em destaque, para os resíduos sólidos. Ademais, tal processo contribuiria para a redução do potencial tóxico das emissões de metano, somando à redução de custos com energia um ganho ambiental para sociedade.

2.6 Estudo de viabilidade técnica e econômica

O Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE) faz parte da microeconomia que é segmento da economia que tem como objetivo analisar o comportamento de cada ator econômico de forma individual podendo ser empresas, famílias ou trabalhadores. Portanto, a microeconomia tem como objetivo compreender um mercado específico para determinado produto ou empresa e determinar variáveis que detêm de maior interferência sobre os resultados

econômicos. Portanto, o EVTE é um estudo exploratório determinante para tomada de decisões sobre um produto ou empreendimento. Tendo isso em vista, o EVTE faz análises de dados favoráveis e desfavoráveis no que tange ao produto a ser elaborado e demonstra a compatibilidade ou não de deste com a realidade de mercado.

2.6.1 Viabilidade econômica financeira

No que tange a implantação de novos projetos, deve-se, primeiramente, realizar diversos estudos sobre sua exequibilidade, dentre todos os estudos, o mais determinante é o estudo de viabilidade econômica financeira. Além disso, por se tratar de uma inovação tecnológica, para que seja implantado é necessário verificar com maior cautela sua viabilidade, pois, qualquer premissa errada ou mal estimada, acarretará em resultados não reais e a consequência disso é a perda de recursos.

Existem diversas técnicas para a realização das análises de viabilidade financeira e econômica de um investimento. Os enfoques mais utilizados integram procedimentos de cálculo do valor do dinheiro no tempo e considerações de risco e retorno do investimento (GITMAN, 2014). São eles: valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR).

O valor presente líquido e a taxa interna de retorno permitem analisar a viabilidade financeira de projetos ou novos negócios por meio de estimativas de investimentos e previsões de retornos futuros, ou seja, realizando um fluxo de caixa. O VPL considera todas as entradas e saídas de caixa ao longo do tempo previsto para duração do projeto para o tempo presente e a TIR é a taxa que iguala o projeto a zero. Assim, a TIR indica a taxa de lucratividade do projeto, porém, para interpretar tal taxa, deve-se sempre considerar qual seria a TIR em investimentos de risco zero, como Tesouro Direto e poupança. Portanto, é de suma importância considerar qual a rentabilidade do capital sem risco, pois, uma vez que a TIR do projeto não está acima desse patamar de risco zero o projeto não é considerado viável mesmo possuindo uma rentabilidade. Estudos de viabilidade são recorrentes no âmbito de produção de biogás, no entanto, o presente documento envolve um estudo de viabilidade onde são considerados financiamento, cálculo do WACC (Weighted Average Cost of Capital), projeções entre outros. Portanto, um estudo de viabilidade que abrange esses conceitos possui uma maior precisão nos resultados.

2.6.2 Análise de Risco

Todo projeto a ser elaborado exige que sejam realizadas previsões e especulações, portanto, todo projeto possui um risco inerente que também precisa ser avaliado. Entende-se

que quanto maior o risco da classe de investimento, maior a exigência de rentabilidade por parte do investidor, por isso que investimentos no tesouro nacional e na poupança não trazem o mesmo retorno de uma aplicação na bolsa de valores. No entanto, o contrário também é verdadeiro, uma aplicação na bolsa possui uma probabilidade de dar prejuízo muito maior que qualquer investimento em poupança ou tesouro.

Assim, existem vários tipos de riscos que podem ser apontados quando se trata de um projeto de engenharia. Existe o risco financeiro que representa a parte do investimento que é realizada com capital de terceiros, sendo esses cobrados uma taxa de juros. O risco de inflação e cambial, uma vez que o projeto possa utilizar de insumos que são importados ou exportados. O risco legal, que depende do surgimento de novas leis, normas ou resoluções, em especial para as ambientais que sofrem alterações com maior frequência. Portanto, existem diversos tipos de riscos que podem afetar um projeto, em especial quando o projeto é elaborado para uma longa duração.

Na literatura existem estudos e trabalhos no que tange ao estudo de viabilidade de uma usina de biogás, no entanto não existem casos utilizando uma avaliação de risco como a simulação Monte Carlo.

3 METODOLOGIA

3.1 Célula energética

Primeiramente, a proposta desse trabalho envolve utilizar uma área já licenciada para operar com resíduos e pertencente ao aterro sanitário da Muribeca na Região Metropolitana de Recife. A partir disso se faz necessário avaliar qual mecanismo e qual tecnologia serão a melhor opção para a situação em questão.

Atualmente uma das tecnologias mais utilizadas para produção do biogás é o biodigestor. Tal equipamento consiste em uma câmara na qual ocorre o processo de digestão anaeróbica e possui como resultado a formação de produtos gasosos e biofertilizantes. O biodigestor, apesar de ser muito utilizado para Estações de Tratamento de Esgoto e em fazendas, não será utilizado para esse estudo. O motivo dessa decisão é devido à redução de custos e facilidades construtivas entre outras abordadas a seguir.

Pelo fato da sociedade brasileira ser muito conservadora em relação a mudanças de tecnologias e devido à crise econômica, a abordagem proposta para esse estudo será na utilização de uma célula do aterro sanitário onde serão instalados os equipamentos e dispositivos necessários para a conversão do gás captado em energia elétrica.

Além disso, para buscar um maior aproveitamento da célula energética é necessário buscar dados secundários no que tange à gravimetria das rotas de coleta da Região Metropolitana do Recife. Assim, com base no estudo desenvolvido pelo Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) em 2014 que teve como objetivo desenvolver análise técnica das características dos resíduos sólidos urbanos (RSU) de cada rota de coleta na Cidade do Recife torna-se possível estabelecer critérios para a utilização dessa célula proposta.

Os resultados de composição gravimétrica obtidos nos estudos do GRS para a Cidade do Recife, considerando os 21 componentes gerais existentes nos resíduos, estão ilustrados na Figura 10. Nesta Figura é possível visualizar os teores mais elevados e evidenciados em quase todas as rotas dos materiais plástico filme, papel/papelão e resíduos alimentares.

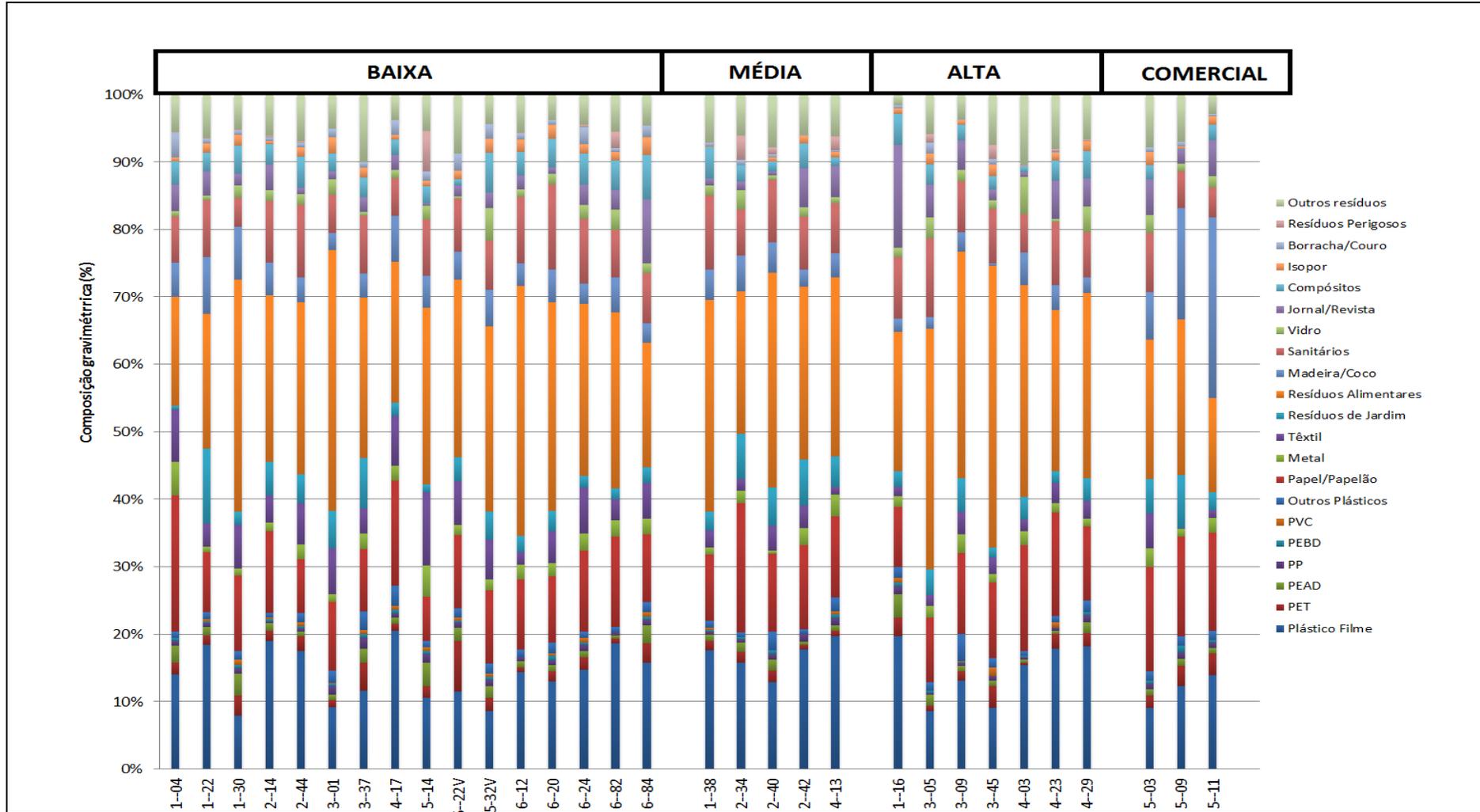


Figura 10 - Comportamento da composição gravimétrica nas rotas de coleta estudadas em Recife (GRS, 2014)

Já a Figura 11 ilustra a variação da composição gravimétrica média das rotas estudadas. Portanto, de acordo com os dados expostos, é possível observar que os resíduos alimentares ainda compõem a maior parte (em massa) dos resíduos coletados na Cidade do Recife, com um valor médio de 27%, sendo o valor mínimo encontrado de 14% no Bairro de Santo Antônio e o valor máximo encontrado de 41,7% no Bairro da Madalena. Ademais, pode-se analisar que rotas onde há predominância do setor comercial, em especial para o Bairro Santo Amaro com 27%, que possuem uma maior concentração de madeira e coco.

Dessa forma, a proposta desse documento é atribuir a uma ou mais células específicas do aterro as rotas com os resíduos mais propícios à geração de biogás obtendo assim um rendimento e a produção mais eficiente. Nestes locais serão implantados sistemas de captação de gás através de drenos. Nesse sentido, serão abordadas a seguir as tecnologias para a conversão do biogás em energia elétrica para posteriormente realizar as considerações financeiras e determinar um possível fluxo de caixa para essa solução. Cada célula do aterro na Muribeca possui uma dimensão de 4 ha, no entanto, para esse caso específico será designado uma célula de 60 x 60m e de 10m de altura, resultando em um volume de 36.000m³. A primeira razão para essa dimensão é a diminuição de custo, uma vez que é um projeto experimental e investimentos em inovação usualmente estão atrelados a maiores riscos. Além disso, a crise econômica agrava a incerteza dos investidores. Outra razão é que a rota de resíduos utilizada não necessita de um volume superior a 36.000 m³ para seu acondicionamento.

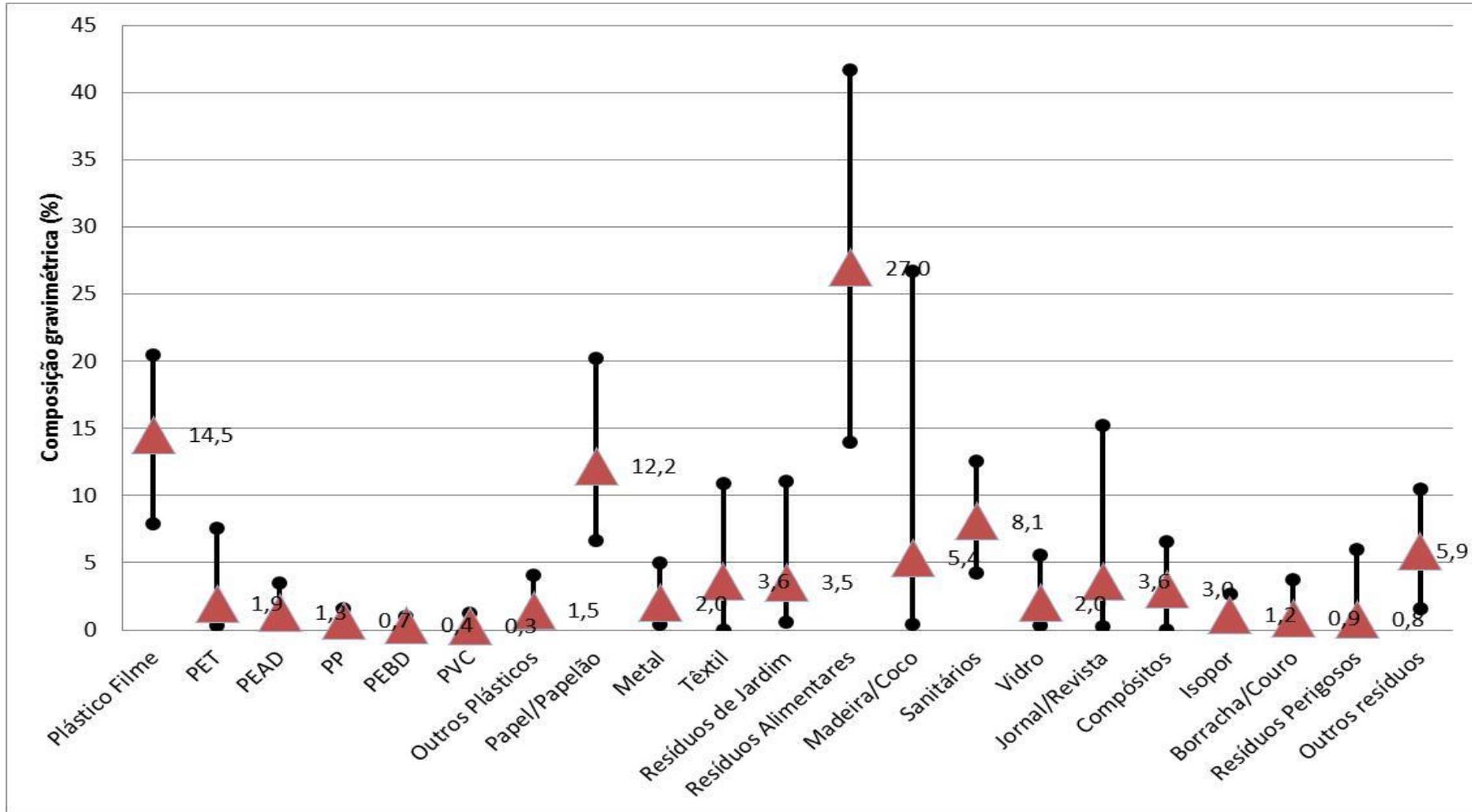


Figura 11 - Composição gravimétrica média, mínima e máxima dos resíduos coletados em 31 rotas da Cidade do Recife (GRS, 20014)

3.1.1 A escolha da tecnologia a ser aplicada

A conversão energética de um combustível consiste na transformação de um tipo de energia em outro. Sob essa ótica, a conversão energética do biogás representa um processo de transformação da energia química de suas moléculas em energia mecânica através de uma combustão controlada. A partir disso, essa energia mecânica poderá acionar um alternador gerando, então, a energia elétrica.

Como dito anteriormente, a geração de energia elétrica a partir do biogás apresenta vantagens como a utilização de um combustível renovável de baixo, menor emissão de poluentes e balanço de carbono negativo, além da possibilidade de geração descentralizada de energia, reduzindo os custos com transmissão.

Várias são as tecnologias disponíveis para a transformação energética do biogás, entre elas destacam-se as caldeiras, turbinas a gás e os motores de combustão interna, as quais serão explanadas a seguir.

- Caldeiras a vapor

As caldeiras a vapor são equipamentos capazes de produzir vapor d'água, saturado ou superaquecido, a partir da queima de um combustível. O funcionamento básico de uma caldeira constitui na energia térmica da combustão que é transferida para a caldeira, onde ocorre o aquecimento da água e posterior vaporização. O vapor gerado pode ser encaminhado para processos industriais ou para uma turbina a vapor. Ao passar pela turbina tal vapor se expande e exerce um trabalho sobre as paletas, gerando potência mecânica que por sua vez aciona um alternador produzindo energia elétrica.

- Turbinas a gás

As turbinas a gás são classificadas de acordo com o ciclo de operação, fechado ou aberto, sendo o último o mais comum. O ciclo aberto corresponde ao processo onde o fluido quando comprimido no compressor eleva sua pressão e, portanto, sua temperatura. Este então entra na câmara de combustão e, em contato com o combustível reage iniciando o processo de queima. Os gases com elevadas temperaturas resultantes da combustão, expandem-se na turbina gerando energia mecânica, além de acionar o compressor.

- Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna funcionam de maneira similar a um motor de carro, ou seja, a partir da queima da injeção de combustível em cilindros para que sua queima resulte na movimentação destes. Dessa forma, a energia mecânica é gerada com a transformação do movimento retilíneo do pistão em circular por meio de um virabequim. Tal mecanismo é amplamente utilizado, por se tratar de processo prático e que apresenta grande durabilidade (CORREA, 2003)

A tabela a seguir destaca as características, diferenças, vantagens e desvantagens das tecnologias supracitadas:

Tabela 3 - Comparação das tecnologias (USEPA, 1996 – Adaptado)

Características	Motores de combustão	Turbinas	Caldeiras a vapor
Potência típica dos projetos (MW)	≥1,0	>3,0	>8,0
Vazão de biogás requerida (m³/h)	730	2.400	6.000
Investimento para implantação (US\$/kW)	1.100-1.300	1.200-1.700	2.000-2.500
Custo de operação e manutenção	25%-35%	20-28%	20-30%
Potencial de cogeração	Baixo	Médio	Alto
Compressão do gás na entrada (atm)	0,15 – 2,4	12,0	0,15 – 0,35
Vantagens	Baixo custo, alta eficiência e usado largamente	Baixa corrosão, instalações de pequenas dimensões, baixo custo de manutenção e baixas emissões de NO _x	Baixa corrosão e suporta variação na vazão e composição do biogás

Desvantagens	Problemas com material particulado, corrosão de patês do motor e altas emissões de NO _x	Problemas com elevada compressão do gás	Ineficiência em unidades menores, requer grande quantidade de água e alto investimento
---------------------	--	---	--

As microturbinas não foram consideradas nesse comparativo, porque sua potência instalada é de 30kW a 100kW, inferior a necessária, e porque seu rendimento elétrico é de até 28% (CENBIO, 2005).

Dessa forma, de acordo com os objetivos aqui expostos, a tecnologia ideal para a conversão do biogás em energia elétrica, no caso da célula energética, será o motor de combustão interna.

Nesse sentido, com a escolha do uso de motores de combustão interna, é necessário prever a execução da purificação do gás, etapa que antecede a geração de energia elétrica. Como dito anteriormente a purificação do gás é utilizada para remoção de indesejados que causariam danos aos motores e equipamentos e diminuição do poder calorífico do gás. Para tanto, pode-se dividir a purificação do gás em dois tipos, o primário e o secundário. O tipo de tratamento primário tem como objetivo remover o condensado de H₂O e material particulado que causam incrustações na tubulação e desgaste no motor, respectivamente. Para isso existem técnicas como separador e drenos de condensado e filtros que permitem purificar o gás quanto às impurezas acima mencionadas.

Já o tratamento secundário, mais oneroso, envolve a remoção de compostos químicos existentes no biogás, como gás sulfúrico, halogenados, amônia e outros, para tanto, necessita de técnicas de adsorção, absorção e condensação.

3.2 Parâmetros utilizados para o cálculo

3.2.1 Projeções

No que tange às projeções, foram realizadas previsões quanto ao crescimento da produção dos resíduos sólidos. Para tanto, é necessário prever o crescimento anual de produção dos resíduos sólidos juntamente com o crescimento populacional. A razão disso é o fato de que a cada ano cada habitante produz mais resíduo, ou seja, existe um crescimento na quantidade de resíduo produzida e no número de habitantes.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE-2016) a população estimada de Recife para 2016 é de 1.625.583 e esta possui um crescimento populacional de

0,78% ao ano. Esse estudo trata apenas das rotas de coleta do Bairro da Madalena, portanto, é um erro extrapolar tal crescimento populacional do Brasil e até do Estado de PE para essa pequena parcela da Cidade do Recife. Dessa forma, o IBGE, assim como uma série de estudiosos, vem desenvolvendo metodologias específicas no que tange a projeções populacionais. Atualmente, os métodos mais utilizados são o das Componentes Demográficas, o AiBi e a Progressão Geométrica. Desses, o mais comumente utilizado é a da Progressão Geométrica, que assume uma taxa de crescimento constante similar à do último período observado. Atualmente, a popularidade desse método deve-se muito mais a sua facilidade de entendimento e aplicação do que a sua acurácia. Primeiramente aplicado no Brasil pelos demógrafos Madeira e Simões (1972), o método AiBi é bastante utilizado para estimativa de população de municípios, sendo muito aplicado em pesquisas e trabalhos científicos.

Utilizou-se a forma do método para calcular primeiramente a população da Cidade do Recife e posteriormente a população no Bairro da Madalena.

$$p = a \times P + b$$

Onde p é a população da área menor (Recife), P a população da área maior (Pernambuco) e os coeficientes a e b são calculados da seguinte forma:

$$a = \frac{P(2010) - p(2010)}{P(2000) - p(2000)}$$

$$b = p(2000) - a \times P(2000)$$

Ainda, no Brasil, a geração de RSU tem registrado considerável elevação, incrementada pelo crescente urbanização. Cidades com maior concentração populacional, as médias de geração superam 1,2 kg/hab.dia, quantidade esta equivalente à verificada nos países desenvolvidos. No entanto, por considerar o Bairro da Madalena, o valor de produção de resíduos será de 1,0 kg/hab.dia, por não ser um bairro dotado apenas de residências de alto padrão.

3.2.2 Estudo de viabilidade

No que tange à análise de viabilidade para a implantação de novos projetos, é necessário realizar uma previsão de receitas e despesas do empreendimento, levando em consideração a inflação, taxa interna de retorno, fluxo de caixa, valor presente líquido e riscos do projeto. Para tanto, é necessário detalhar e classificar as despesas para atingir um maior grau de confiabilidade no estudo. Assim ficam subdivididos da seguinte forma:

- Despesas

- Infraestrutura (CAPEX)
- Custo de operação e manutenção (OPEX)
- Receitas
 - Energia elétrica produzida
 - Incentivos fiscais
 - Crédito devido ao MDL

O Protocolo de Quioto, entre vários outros elementos, foi pioneiro na possibilidade de utilização de mecanismos de mercado para que os países desenvolvidos possam cumprir os compromissos quantificados de redução e limitação de emissão de gases de efeito estufa (GEE). No caso do Brasil, a participação no mencionado mercado ocorre por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, por ser o único mecanismo do Protocolo de Quioto que admite a participação voluntária de países em desenvolvimento. Além disso, serão estabelecidas projeções populacionais e, conseqüentemente, projeções do aumento da quantidade de resíduo produzido, pois a viabilidade depende da taxa de retorno em um tempo útil de utilização. Assim, a depender dos custos iniciais e da disponibilidade de caixa, o espaço de tempo para tornar o projeto viável pode variar.

Assim, como o projeto em questão se trata de uma proposta para utilizar os gases emitidos na decomposição de resíduos para convertê-los em energia, o projeto se enquadra no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

Uma série de fatores de ordem técnica, financeira e de gestão precisam ser superados para tornar os projetos de aproveitamento de biogás mais numerosos em países em desenvolvimento, como o Brasil. Estas barreiras incluem restrições institucionais e econômicas em distintas esferas de governo, falta de financiamento de longo prazo e de políticas de incentivo fiscal específica para o setor, bem como incertezas político-partidárias, carência de conhecimento técnico e de experiências de sucesso duradoura, ausência de tecnologia nacional e falta de dados confiáveis sobre a geração e composição dos resíduos, produção de biogás e vida útil dos aterros.

3.2.2.1 CAPEX

CAPEX é a abreviação da expressão inglesa *capital expenditure* (em português, despesas de capital ou investimento em bens de capital) e que determina a soma dos recursos despendidos na aquisição (ou introdução de melhorias) de bens de capital, ou seja, partes não-consumíveis do produto ou sistema. Dessa forma, para o CAPEX serão contabilizadas todas as novas

instalações, infraestrutura e equipamentos para executar o projeto em questão. No que se refere ao projeto em questão, esses custos são contabilizados como implantação de poços, rede de coleta de biogás, obtenção de licenças, taxas, projetos, sistema de extração, purificação do gás, usina de energia e etc. Por fim, com base na literatura a estimativa o CAPEX será utilizado um universo de US\$ 850 até US\$ 1.100 por kW.

3.2.2.2 OPEX

O OPEX é uma abreviação da expressão inglesa operational expenditure, que significa o capital destinado para manutenção e operação da infraestrutura, equipamentos e imóveis. Os custos do OPEX serão contabilizados como equipe (engenheiros e técnicos) necessária para coordenação do projeto, manutenção da infraestrutura da célula, combustível, monitoramento ambiental etc. Por fim, com base na literatura internacional será utilizada uma variação para o OPEX de US\$ 0,013 a US\$ 0,018 por kWh e de acordo com Cardoso Filho (2001) 1m³ de biogás equivale a 1,43kwh.

3.2.2.3 WACC

O WACC (Weighted Average Cost of Capital) ou Custo Médio Ponderado de Capital é uma taxa que mede a remuneração requerida sobre o capital investido em uma determinada empresa ou entidade com fins lucrativos. Essa taxa mede também o custo de oportunidade dos investidores ou credores do negócio. Os termos "Médio" e "Ponderado" são utilizados já que nem todos os investidores e credores requerem a mesma taxa de remuneração sobre o capital que investiram e, portanto, deve-se calcular uma média ponderada. Para o projeto será utilizado o financiamento CAIXA Saneamento Para Todos onde é obtida a menor taxa de juros do mercado. Tal financiamento atende no máximo 80% do projeto, logo, 20% será necessariamente capital próprio. Para calcular o Custo de Capital Próprio do projeto, foi utilizada uma média da Taxa Selic dos últimos 10 anos, um coeficiente de risco da empresa e o beta da companhia. O Índice Beta é um indicador que mede a sensibilidade de um ativo em relação ao comportamento de uma carteira que represente o mercado. Portanto, o índice beta é a covariância entre o retorno do ativo e do mercado dividido sobre a variância do retorno do mercado. De maneira mais simples, o índice beta apresenta como a ação de uma empresa variou em relação a bolsa de valores onde ela é vendida. Assim, para calcular o beta é necessário utilizar dados de uma empresa que pratique o mesmo negócio na IBOVESPA, tal empresa é a CPFL Energias Renováveis S.A.

Dessa forma, de posse do Custo de Capital Próprio é possível realizar a ponderação com o Custo de Capital de Terceiros (financiamento) e calcular o WACC que será a taxa mínima a ser vencida pela TIR (Taxa Interna de Retorno) para tornar o projeto viável.

3.2.2.4 Receitas

Receita é o valor recebido, apurado ou arrecadado. No caso desse projeto a receita será tudo aquilo que representar uma entrada de caixa, ou seja, uma entrada de recurso. Para a contabilização da receita serão consideradas a venda da energia produzida e créditos ambientais (MDL) referentes à redução de emissões de gases.

De acordo com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), em seu Leilão de Energia A-5 do dia 29/04/2016 foram contratados energia proveniente do biogás a um preço médio de R\$ 235,95/MWh.

Além disso, a ANEEL em sua Nota Técnica nº 0043/2010-SRD/ANEEL afirma que empreendimentos que utilizem como insumo energético, no mínimo, 50% de biomassa composta de resíduos sólidos urbanos e/ou de biogás de aterro sanitário ou biodigestores de resíduos vegetais ou animais, assim como lodos de estações de tratamento de esgoto vão possuir 100% de redução de tarifa nos sistemas de transmissão e distribuição.

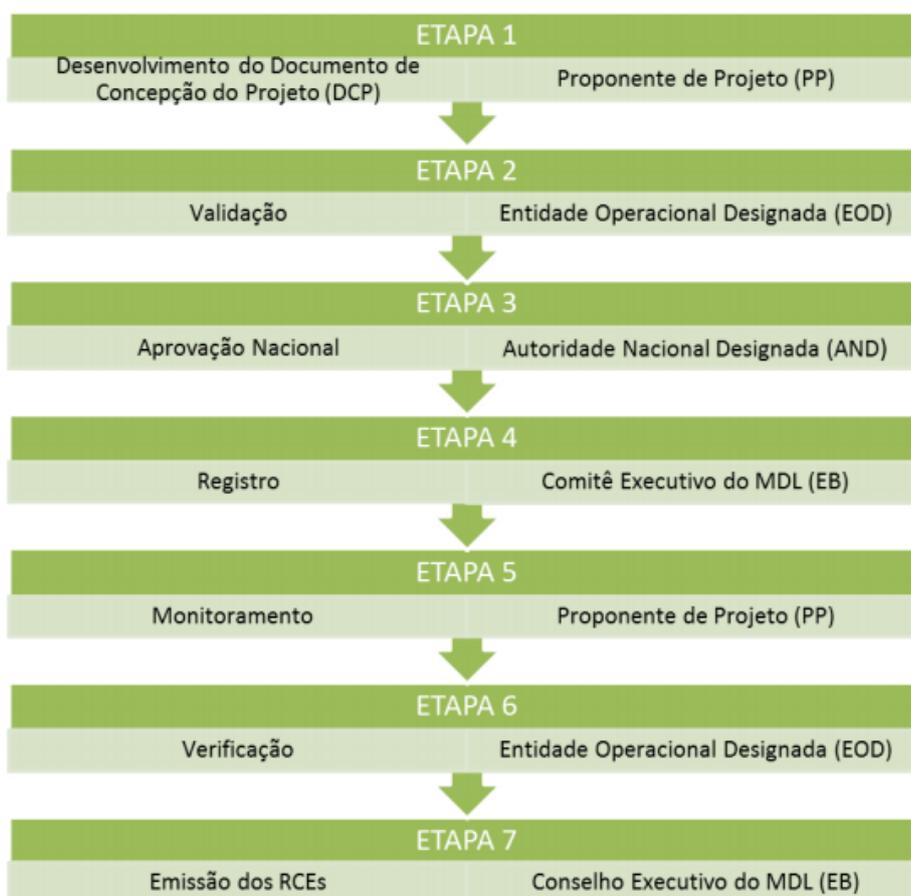
Além disso, como o biogás tem como base o CH₄ que um dos principais precursores do efeito estufa, sua utilização como fonte de energia passa a gerar divisas no Mercado de Carbono. É estabelecido que 1 tonelada de metano equivale a 21 créditos de carbono e cada crédito de carbono tem seu preço negociado na bolsa de valores. O site (<http://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>) visitado em 17/10/2016 apresentou a cotação de € 5,81 o que vale, também na cotação desse mesmo dia, R\$ 20,43 por crédito de carbono, logo tem-se R\$ 429,10 por tonelada de gás metano. Pelo fato de sua comercialização ser tratada na bolsa de valores, sua cotação varia de acordo com decisões mundiais como o encontro do G20 e entre outros. A imagem a seguir demonstra o quanto o preço do crédito de carbono.

Figura 12 – Variação da cotação de Crédito de Carbono – 27/10/2016 (Investing.com)



Para que seja possível a venda de créditos de carbono, é necessário que o projeto passe por algumas etapas até ser aprovado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, estas são apresentadas na imagem a seguir:

Figura 13 – Ciclo de aprovação de um projeto de MDL – Fonte MCTI - 2016



Ademais, de acordo com o Decreto nº 4213 de 2002, é possível obter incentivos fiscais quanto ao imposto de renda. A seguir, como referência, segue o trecho da legislação que aponta o enquadramento do projeto em questão.

Art. 1º Este Decreto define os empreendimentos prioritários para o desenvolvimento regional, nas áreas de atuação da extinta Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE, para fins dos benefícios de redução do imposto de renda, inclusive de reinvestimento, de que tratam os arts. 1º, 2º e 3º da Medida Provisória nº 2.199-14, de 24 de agosto de 2001.

Art. 2º São considerados prioritários para fins dos benefícios de que trata o art. 1o, os empreendimentos nos seguintes setores:

I - de infraestrutura, representados pelos projetos de energia, telecomunicações, transportes, instalação de gasodutos, produção de gás, abastecimento de água e esgotamento sanitário.

Portanto, é possível obter 75% de desconto no imposto de renda durante 10 anos.

Por fim, para calcular a receita serão utilizados parâmetros como produção de m³ de biogás por tonelada de resíduo, aproveitamento de captação que para a célula é de 50% e a conversão de 1 m³ de biogás em 1,43 kWh.

3.2.3 Análise de risco

Para a análise de risco, será utilizada a metodologia da Simulação Monte Carlo. A Simulação Monte Carlo é um instrumento de análise de risco que permite investigar os impactos causados sobre resultados realizando diversas combinações possíveis entre suas variáveis independentes. Uma alternativa para a mensuração de riscos associados a modelos projetivos como o de fluxo de caixa é a utilização da Simulação de Monte Carlo, que é definida por Andrade (1998) como um processo que opera modelos estocásticos e que lida experimentalmente com as variáveis descritas.

A primeira aparição dessa metodologia se deu durante a Segunda Guerra Mundial, no Projeto Manhattan, para a construção da bomba atômica. Sua intenção era chegar a soluções aproximadas de problemas referentes à difusão randômica de nêutrons no material nuclear, através de simulações. O nome Monte Carlo foi dado por um de seus criadores, o matemático austríaco Stanislaw Ulam, e é uma referência aos jogos de roletas nos cassinos de Mônaco.

Desse modo, um modelo financeiro projetivo que utilize SMC converter-se-ia, de um modelo determinístico, que não incorpora nenhum elemento probabilístico, em um estocástico,

que incorpora componentes probabilísticos essenciais para a tomada de decisão em ambientes de incerteza. Para esse documento a simulação Monte Carlo será utilizada para estimar o VPL e a TIR e associá-los a uma probabilidade de ocorrência.

Nesse sentido, foram escolhidas variáveis independentes e estas associadas a alguma distribuição. A escolha da distribuição tem como modelo ideal uma distribuição normal ou gaussiana, no entanto, devido à falta de dados e das particularidades de cada projeto as distribuições se restringiram a distribuições triangulares. Tal distribuição possui 3 valores, um máximo, um mínimo e um mais provável. Para esse projeto as variáveis independentes associadas a uma distribuição triangular são:

- CAPEX por kW
- OPEX por kWh
- Produção de biogás a cada ano
- Composição média de CH₄
- Preço por Crédito de Carbono

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados será baseada nos dados que foram utilizados no fluxo de caixa, comentando como foi obtido cada despesa e cada receita para que seja possível determinar a viabilidade do projeto e qual seu risco associado.

4.1.1 Projeções

De acordo com o método apresentado anteriormene, a tabela a seguir demonstra as projeções esperadas para a população do Bairro da Madalena.

Figura 14 – Projeção populacional – Elaboração Própria

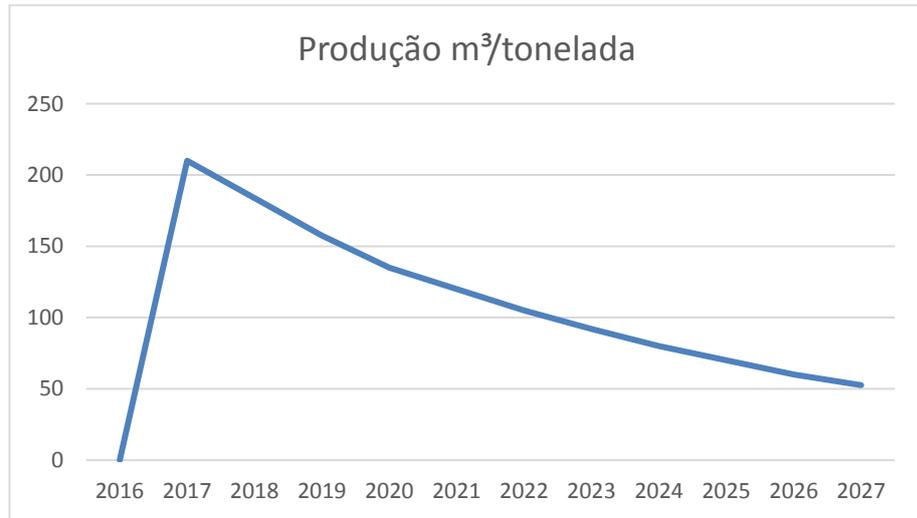
Ano	Brasil	Pernambuco	Recife	Madalena
2000	173.448.346	8.119.689	1.422.905	19.744
2001	175.885.229	8.212.595		
2002	178.276.128	8.304.375		
2003	180.619.108	8.395.002		
2004	182.911.487	8.484.308		
2005	185.150.806	8.572.129		
2006	187.335.137	8.658.333		
2007	189.462.755	8.742.825		
2008	191.532.439	8.825.549		
2009	193.543.969	8.906.488		
2010	195.497.797	8.985.658	1.537.704	23.082
2011	197.397.018	9.062.506	1.547.892	23.378
2011	197.397.018	9.062.506	1.547.892	23.378
2012	199.242.462	9.136.697	1.557.727	23.664
2013	201.032.714	9.208.550	1.567.252	23.941
2014	202.768.562	9.278.152	1.576.479	24.210
2015	204.450.649	9.345.603	1.585.421	24.470
2016	206.081.432	9.410.772	1.594.060	24.721
2017	207.660.929	9.473.707	1.602.403	24.963
2018	209.186.802	9.534.634	1.610.480	25.198
2019	210.659.013	9.593.588	1.618.296	25.425
2020	212.077.375	9.650.604	1.625.854	25.645
2021	213.440.458	9.705.888	1.633.183	25.858
2022	214.747.509	9.759.391	1.640.276	26.065
2023	215.998.724	9.810.850	1.647.097	26.263
2024	217.193.093	9.860.222	1.653.642	26.453
2025	218.330.014	9.907.481	1.659.907	26.636
2026	219.408.552	9.952.805	1.665.916	26.810
2027	220.428.030	9.996.161	1.671.663	26.977

Por fim, como demonstrado anteriormente, constatou-se que o bairro da Madalena possui a maior produção de matéria orgânica em seus resíduos. Assim com a projeção realizada, pode-se estimar que em 2016 o Bairro da Madalena terá produzido um total de 9.023 toneladas da produção da Cidade do Recife. Tal estudo apontou, também, que os resíduos provenientes do Bairro da Madalena possuem 41,7% de material orgânico, ideal para o biogás. Assim, devido ao volume previsto para a célula, a mesma tem apenas dimensão para acondicionar 4 anos de resíduo. Como a produção de biogás decresce com o tempo, apesar de reduzida, ainda existirão receitas factíveis até 2027.

4.1.2 Fluxo de Caixa

No que tange o fluxo de caixa operacional do projeto foram utilizados os dados da projeção da quantidade de resíduos para o Bairro da Madalena. Similarmente, foram utilizadas as previsões da produção demandada de biogás ao longo dos anos. Como a célula possui um volume limitado e a degradação diminui com o tempo, obtém-se a seguinte previsão:

Figura 15 – Quantidade de m³ de biogás produzido por tonelada de resíduo



Dessa forma, cada ano possuirá uma OPEX diferente, ou seja, cada ano terá um cálculo de manutenção e operação diferente, sendo este diretamente proporcional à quantidade de biogás produzida. Vale ressaltar que o resíduo captado em 2017 produzirá menos biogás em 2018, no entanto, o resíduo captado em 2018 estará em sua máxima decomposição. Dessa forma, ocorrerá uma sobreposição de diversas curvas como essa apresentada anteriormente. A seguir tem-se uma tabela que apresenta o cálculo das receitas ano a ano. Lembrando que apenas os 4 primeiros anos (2017 – 2020) de resíduos vão ser acondicionados pela célula.

Ano	m ³ /tonelada	m ³ de biogás	m ³ captado	m ³ de CH4	Ton CH4	Receita MDS	kWh	Receita Energia	Acumulado Receita
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	210	1.928.749,79	964.374,89	530.406,19	350,07	R\$ 174.645,71	1.379.056,10	R\$ 325.388,29	R\$ 500.034,00
2018	183,75	3.634.552,36	1.817.276,18	999.501,90	659,67	R\$ 329.103,85	2.598.704,94	R\$ 613.164,43	R\$ 942.268,28
2019	157,5	5.112.568,07	2.556.284,04	1.405.956,22	927,93	R\$ 462.936,20	3.655.486,17	R\$ 862.511,96	R\$ 1.325.448,16
2020	135	6.394.196,58	3.197.098,29	1.758.404,06	1.160,55	R\$ 578.985,95	4.571.850,55	R\$ 1.078.728,14	R\$ 1.657.714,08
2021	120	5.555.252,37	2.777.626,18	1.527.694,40	1.008,28	R\$ 503.020,67	3.972.005,44	R\$ 937.194,68	R\$ 1.440.215,35
2022	105	4.820.884,30	2.410.442,15	1.325.743,18	874,99	R\$ 436.524,62	3.446.932,27	R\$ 813.303,67	R\$ 1.249.828,29
2023	92	4.210.298,03	2.105.149,01	1.157.831,96	764,17	R\$ 381.236,85	3.010.363,09	R\$ 710.295,17	R\$ 1.091.532,02
2024	80	3.698.087,12	1.849.043,56	1.016.973,96	671,20	R\$ 334.856,84	2.644.132,29	R\$ 623.883,01	R\$ 958.739,86
2025	70	3.232.206,40	1.616.103,20	888.856,76	586,65	R\$ 292.671,97	2.311.027,58	R\$ 545.286,96	R\$ 837.958,92
2026	60	2.813.052,38	1.406.526,19	773.589,40	510,57	R\$ 254.718,13	2.011.332,45	R\$ 474.573,89	R\$ 729.292,02
2027	52,5	2.444.969,73	1.222.484,87	672.366,68	443,76	R\$ 221.388,74	1.748.153,36	R\$ 412.476,79	R\$ 633.865,52

Figura 16 – Demonstrativos das receitas ano a ano

O fluxo de caixa de projeto é obtido a partir do custo de capital próprio e considera que todo o investimento é realizado no primeiro ano do projeto. Já o fluxo de caixa alavancado, considera despesas financeiras, ou seja, o investimento inicial é menor, resultando em uma melhor compensação do fluxo de caixa. Como mencionado anteriormente, o financiamento utilizado será o financiamento de CAIXA Saneamento Para Todos, o qual possui uma taxa de 9% a.a. e financia até 80% do projeto.

O CAPEX total calculado para uma usina de 500kW é R\$ 3.756.000,00, portanto considerando 2% de projetos e obras calcula-se que o projeto terá R\$ 3.004.800,00 de financiamento e R\$ 901.440,00 de capital próprio.

A seguir são apresentadas 2 figuras onde a primeira mostra o Fluxo de Caixa de Projeto que possui todo o investimento de todo o CAPEX no primeiro ano (2017) como recursos próprios, por isso a taxa de desconto é o Custo de Capital Próprio que é 11,59%. A segunda figura apresentada é o Fluxo de Caixa Alavancado, o qual possui despesas financeira e a taxa de desconto é o WACC, 8,95% e tem como resultado um retorno melhor, como mostra o fluxo de caixa a seguir.

		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
	(=) Receita Operacional Bruta	R\$ 500.034,00	R\$ 942.268,28	R\$ 1.325.448,16	R\$ 1.657.714,08	R\$ 1.440.215,35	R\$ 1.249.828,29	R\$ 1.091.532,02	R\$ 958.739,86	R\$ 837.958,92	R\$ 729.292,02	R\$ 633.865,52
9,25%	(-) Impostos Diretos	R\$ 46.253,14	R\$ 87.159,82	R\$ 122.603,95	R\$ 153.338,55	R\$ 133.219,92	R\$ 115.609,12	R\$ 100.966,71	R\$ 88.683,44	R\$ 77.511,20	R\$ 67.459,51	R\$ 58.632,56
	ROL	R\$ 453.780,85	R\$ 855.108,47	R\$ 1.202.844,21	R\$ 1.504.375,53	R\$ 1.306.995,43	R\$ 1.134.219,18	R\$ 990.565,31	R\$ 870.056,42	R\$ 760.447,72	R\$ 661.832,51	R\$ 575.232,96
	(-) OPEX	R\$ 101.436,47	R\$ 191.147,74	R\$ 268.879,29	R\$ 336.282,47	R\$ 292.160,86	R\$ 253.539,10	R\$ 221.427,26	R\$ 194.489,15	R\$ 169.987,63	R\$ 147.943,56	R\$ 128.585,42
	Lucro Operacional	R\$ 352.344,38	R\$ 663.960,73	R\$ 933.964,92	R\$ 1.168.093,06	R\$ 1.014.834,57	R\$ 880.680,07	R\$ 769.138,05	R\$ 675.567,27	R\$ 590.460,09	R\$ 513.888,95	R\$ 446.647,54
10%	(-) Custo Administrativo	R\$ 35.234,44	R\$ 66.396,07	R\$ 93.396,49	R\$ 116.809,31	R\$ 101.483,46	R\$ 88.068,01	R\$ 76.913,81	R\$ 67.556,73	R\$ 59.046,01	R\$ 51.388,90	R\$ 44.664,75
	Lucro Bruto	R\$ 317.109,94	R\$ 597.564,65	R\$ 840.568,43	R\$ 1.051.283,76	R\$ 913.351,12	R\$ 792.612,07	R\$ 692.224,25	R\$ 608.010,54	R\$ 531.414,08	R\$ 462.500,06	R\$ 401.982,79
10%	(-) Depreciação	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00
	Lucro Antes do IR	-R\$ 66.002,06	R\$ 214.452,65	R\$ 457.456,43	R\$ 668.171,76	R\$ 530.239,12	R\$ 409.500,07	R\$ 309.112,25	R\$ 224.898,54	R\$ 148.302,08	R\$ 79.388,06	R\$ 18.870,79
34%	IR	R\$ -	R\$ 18.228,48	R\$ 38.883,80	R\$ 56.794,60	R\$ 45.070,32	R\$ 34.807,51	R\$ 26.274,54	R\$ 19.116,38	R\$ 12.605,68	R\$ 6.747,98	R\$ 6.416,07
	Lucro Líquido	-R\$ 66.002,06	R\$ 196.224,18	R\$ 418.572,63	R\$ 611.377,16	R\$ 485.168,79	R\$ 374.692,56	R\$ 282.837,71	R\$ 205.782,17	R\$ 135.696,40	R\$ 72.640,07	R\$ 12.454,72
	(+) Depreciação	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00	R\$ 383.112,00
	(-) Investimento	R\$ 3.831.120,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
	Fluxo de Caixa Operacional	-R\$ 3.514.010,06	R\$ 579.336,18	R\$ 801.684,63	R\$ 994.489,16	R\$ 868.280,79	R\$ 757.804,56	R\$ 665.949,71	R\$ 588.894,17	R\$ 518.808,40	R\$ 455.752,07	R\$ 395.566,72

Taxa de desconto	11,59%	capm
VPL	R\$ 446.732,46	
TIR	15%	

Figura 17 – Fluxo de Caixa de Projeto

		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
	(=) Receita Operacional Bruta	R\$ 500.034,00	R\$ 942.268,28	R\$ 1.325.448,16	R\$ 1.657.714,08	R\$ 1.440.215,35	R\$ 1.249.828,29	R\$ 1.091.532,02	R\$ 958.739,86	R\$ 837.958,92	R\$ 729.292,02	R\$ 633.865,52
9,25%	(-) Impostos Diretos	R\$ 46.253,14	R\$ 87.159,82	R\$ 122.603,95	R\$ 153.338,55	R\$ 133.219,92	R\$ 115.609,12	R\$ 100.966,71	R\$ 88.683,44	R\$ 77.511,20	R\$ 67.459,51	R\$ 58.632,56
	ROL	R\$ 453.780,85	R\$ 855.108,47	R\$ 1.202.844,21	R\$ 1.504.375,53	R\$ 1.306.995,43	R\$ 1.134.219,18	R\$ 990.565,31	R\$ 870.056,42	R\$ 760.447,72	R\$ 661.832,51	R\$ 575.232,96
	(-) OPEX	R\$ 101.436,47	R\$ 191.147,74	R\$ 268.879,29	R\$ 336.282,47	R\$ 292.160,86	R\$ 253.539,10	R\$ 221.427,26	R\$ 194.489,15	R\$ 169.987,63	R\$ 147.943,56	R\$ 128.585,42
	Lucro Operacional	R\$ 352.344,38	R\$ 663.960,73	R\$ 933.964,92	R\$ 1.168.093,06	R\$ 1.014.834,57	R\$ 880.680,07	R\$ 769.138,05	R\$ 675.567,27	R\$ 590.460,09	R\$ 513.888,95	R\$ 446.647,54
10%	(-) Custo Administrativo	R\$ 35.234,44	R\$ 66.396,07	R\$ 93.396,49	R\$ 116.809,31	R\$ 101.483,46	R\$ 88.068,01	R\$ 76.913,81	R\$ 67.556,73	R\$ 59.046,01	R\$ 51.388,90	R\$ 44.664,75
	Lucro Bruto	R\$ 317.109,94	R\$ 597.564,65	R\$ 840.568,43	R\$ 1.051.283,76	R\$ 913.351,12	R\$ 792.612,07	R\$ 692.224,25	R\$ 608.010,54	R\$ 531.414,08	R\$ 462.500,06	R\$ 401.982,79
10%	(-) Depreciação	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00
	(-) Despesas Financeiras	R\$ 543.868,80	R\$ 516.825,60	R\$ 489.782,40	R\$ 462.739,20	R\$ 435.696,00	R\$ 408.652,80	R\$ 381.609,60	R\$ 354.566,40	R\$ 327.523,20	R\$ 300.480,00	R\$ -
	Lucro Antes do IR	-R\$ 309.390,86	-R\$ 1.892,95	R\$ 268.154,03	R\$ 505.912,56	R\$ 395.023,12	R\$ 301.327,27	R\$ 227.982,65	R\$ 170.812,14	R\$ 121.258,88	R\$ 79.388,06	R\$ 401.982,79
34%	IR	R\$ -	R\$ -	R\$ 22.793,09	R\$ 43.002,57	R\$ 33.576,96	R\$ 25.612,82	R\$ 19.378,53	R\$ 14.519,03	R\$ 10.307,00	R\$ 6.747,98	R\$ 136.674,15
	Lucro Líquido	-R\$ 309.390,86	-R\$ 1.892,95	R\$ 245.360,94	R\$ 462.909,99	R\$ 361.446,15	R\$ 275.714,45	R\$ 208.604,12	R\$ 156.293,11	R\$ 110.951,87	R\$ 72.640,07	R\$ 265.308,64
	(+) Depreciação	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ 82.632,00	R\$ -
	(-) Investimento	R\$ 826.320,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
	Fluxo de Caixa Operacional	-R\$ 1.053.078,86	R\$ 80.739,05	R\$ 327.992,94	R\$ 545.541,99	R\$ 444.078,15	R\$ 358.346,45	R\$ 291.236,12	R\$ 238.925,11	R\$ 193.583,87	R\$ 155.272,07	R\$ 265.308,64

Taxa de desconto	8,95%	wacc
VPL	R\$ 784.375,49	
TIR	25%	

Figura 18 - Fluxo de Caixa Alavancado

4.1.3 VPL e TIR

O Valor Presente Líquido e a Taxa Interna de Retorno são parâmetros utilizados na grande maioria dos projetos para a determinação de sua viabilidade. É sabido que o dinheiro possui um valor, porém, tal valor se reduz com o tempo. Dessa forma, para analisar projetos que possuirão uma duração considerável é necessário trazer para a data atual todos os fluxos de caixa de um projeto e soma-los com o valor do investimento inicial, usando uma taxa de desconto.

Esse método se trata do VPL. Já a TIR é a taxa de retorno de um investimento que zera o VPL levando em conta o valor do dinheiro no tempo. É um método de análise de engenharia econômica muito utilizado devido à facilidade de interpretação. A análise consiste em comparar o resultado da TIR com a taxa de desconto, sendo a TIR superior, o projeto é viável.

Como mostrado anteriormente, para as considerações realizadas nesse documento, o projeto é viável, porém, como toda previsão, existem incertezas. Essas incertezas são atreladas a riscos, os quais devem ser previstos, para isso utilizaremos uma análise de risco, chamada de Simulação Monte Carlo.

4.1.4 Simulação Monte Carlo

Sendo assim, realizando 82.162 iterações para o VPL do Fluxo de Caixa de Projeto e Alavancado, observa-se que variando todos esses pressupostos acima, uma certeza de 93% de que o VPL dará acima de 0 e com 83% de chance da TIR da superior ao Custo de Capital Próprio, ambas com a seguinte análise de sensibilidade. Como as variações são as mesmas não existe discrepância entre o Fluxo de Caixa de Projeto e Alavancado.

Figura 19 – Curva Gaussiana de risco do VPL

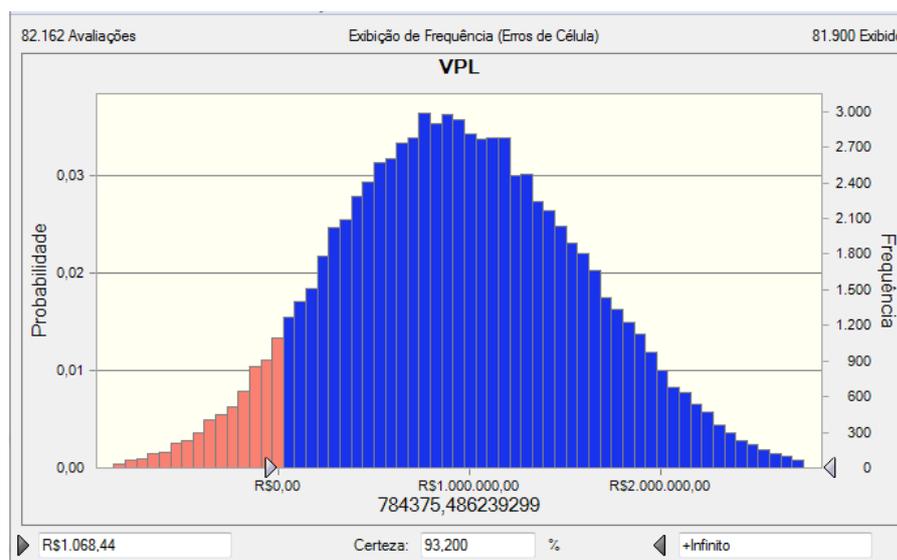


Figura 20 – Distribuição Gaussiana de risco da TIR

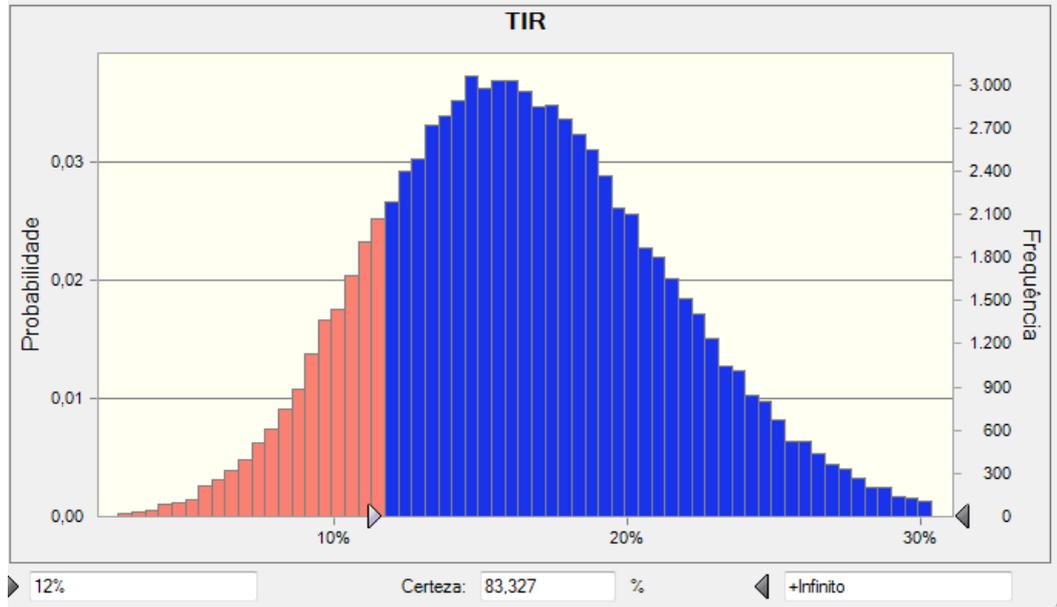
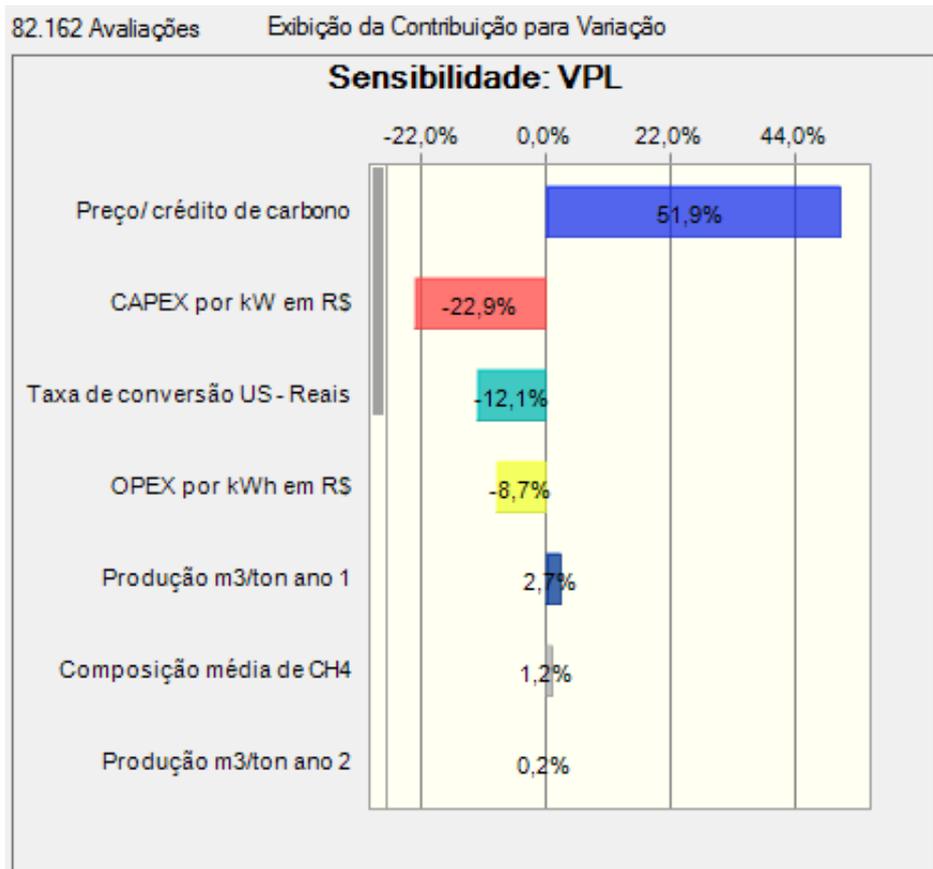


Figura 21 – Análise de sensibilidade das variáveis



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de viabilidade foi realizada considerando dados de mercado e projeções econômicas para uma célula energética de pequeno porte em um aterro sanitário na Região Metropolitana de Recife. Com o objetivo de prever cenários, foi realizada uma análise de risco através da Simulação de Monte Carlo, variando variáveis independentes e analisando todos os possíveis resultados.

Por fim, é possível concluir que o projeto possui grandes chances de sucesso, no entanto ele é bastante dependente do preço por crédito de carbono, como mostra na análise de sensibilidade (52%), ou seja, a oscilação dessa variável (preço/credito de carbono) resulta em um maior impacto no VPL e TIR. Assim, se tratando de um preço bastante volátil e dependente de acordos internacionais como Protocolo de Quioto e entre outros é necessário realizar estudos mais aprofundados da variação desse preço.

Atualmente, observa-se uma tendência crescente no mercado de projetos de MDL, a imagem a seguir mostra a distribuição de projetos em execução na atualidade, onde se observa uma maior concentração nos estados do Sul e Sudeste do Brasil.

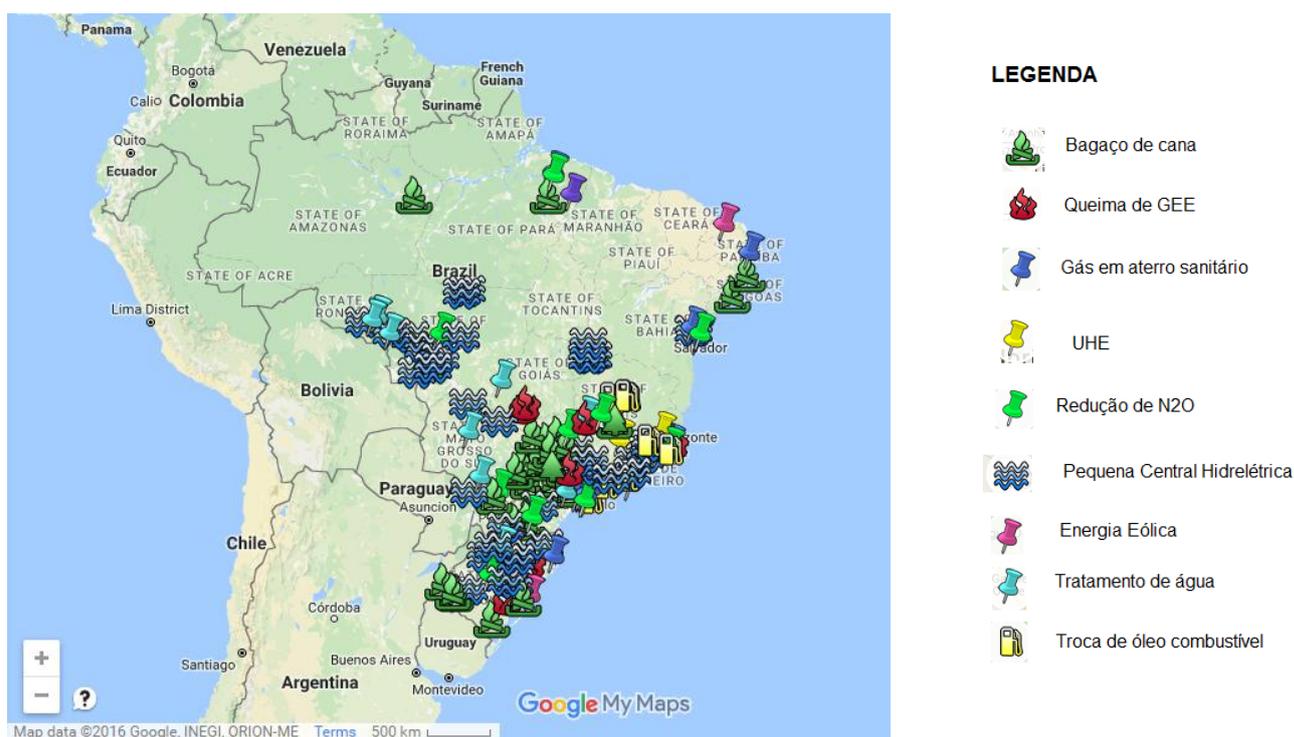


Figura 22 – Distribuição de projetos de MDL no Brasil – Fonte Google 2016

Ademais, com o objetivo de dar continuidade a metodologia apresentada, sugiro pesquisas futuras nesse mesmo âmbito, porém considerando biodigestores, balanço de massa e tecnologias mais avançadas que possam surgir.

Além disso, uma abordagem relevante seria considerar que tais células energéticas possam ser replicadas e aproveitar a infraestrutura construída para a implantação da primeira. Dessa forma, é possível reduzir os custos de implantação e melhorar a rentabilidade do projeto.

O objetivo principal é provar para ao setor privado que é possível obter lucros em projetos de energia sustentável.

6 REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos 2015** São Paulo, 2016.

ALVES, J.W.S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**, 2000.

ANDRADE, S. C. **Um modelo de medição de risco de crédito**. *Revista Resenha BM&F*, n. 140, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ATEPE - ASSOCIAÇÃO TECNOLÓGICA DE PERNMABUCO. **Estudo da geração e composição dos resíduos sólidos urbanos da cidade do Recife** – Recife, 2014

BLEY JR, C. **Biogás – A Energia Invisível**. Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás – São Paulo, 2014.

CASSINI, S. T.; COELHO, S. T.; PECORA, V. **Biogás- Biocombustíveis ANP**, Rio de Janeiro, 2014.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Projeto de Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto** – ENERG-BIOG. Relatório Técnico Final, São Paulo, 2005

CUNHA, M. E. G. **Análise do Setor Ambiental no Aproveitamento Energético de Resíduos: Um estudo de caso do município de Campinas**. Dissertação de Mestrado. Planejamento de Sistemas Energéticos/Área Interdisciplinar. UNICAMP, Campinas, 2002.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica - estudo de caso**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Guia Prático do Biogás – Geração e Utilização, Alemanha. **Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás**, 2010.

GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira**. São Paulo: Harbra, 2002

JUNIOR, A. B. C. **Simulação do comportamento de um resíduo modelo em aterro sanitário e estudo da evolução bio-físico-química**, 2000.

MALINA, G. An overview of developments of bio-waste treatment towards biogas generation in Poland. In: **Proceedings Sardinia 2003**, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Itália, 2003.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos aterros sanitários nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil.** Estudo preparado pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA e Fundação de Estudos Agrários “Luiz de Queiroz” – FEALQ. 2004.

MOTTA, R. R.; CALÔBA, G. M. **Análise de investimentos: tomada de decisão em projetos industriais.** São Paulo: Atlas, 2002.

MOURA, L. A. A. **Econômica ambiental: gestão de custos e investimentos.** São Paulo: Ed. Juarez de Oliveira Ltda. 2000.

ROBINSON, A.; SEWELL, G.; DAMODARAN, N.; DAVID, E.; KALAS-ADAMS, N. Landfills in developing countries and global warming. In: **Proceedings Sardinia 2003**, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Itália, 2003.

SILVA, E. R. *et al.* **Estimativa da Produção de Biogás nos Aterros de Caieiras e Santo André** In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande - PB 2010

SOLER, A., VAMPEL, F. **usando o Método de Monte Carlo para agendamento de parada de operação:** um caso de sucesso Kraton Polimers. Revista Mundo PM, São Paulo, 2009.

SOUZA, Alceu; CLEMENTE, Ademir. **Decisões financeiras e Análise de investimentos: Fundamentos, Técnicas e Aplicações.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2004

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Turning a liability into an asset: A Landfill gas-to-energy Project development handbook.** Landfill Methane Outreach Program (LMOP), EPA 430-B-96-0004. 1996.

WESTON, J. F; BRIGHAM, E. F. **Fundamentos da Administração Financeira.** 10. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2000.