

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

MAMIULE DE SIQUEIRA

**Análise de viabilidade técnica-financeira para aproveitamento energético de
biogás proveniente de aterro sanitário. Um estudo de caso: um aterro sanitário
no estado de São Paulo.**

São Paulo

2018

MAMIULE DE SIQUEIRA

Análise de viabilidade técnica-financeira para aproveitamento energético de biogás proveniente de aterro sanitário. Um estudo de caso: um aterro sanitário no estado de São Paulo.

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de Concentração: Bioenergia – biogás e biometano.

Orientadora: Profa. Suani Teixeira Coelho

São Paulo

2018

Catalogação-na-publicação

De Siqueira, Mamiule

Análise de viabilidade técnica-financeira para aproveitamento energético de biogás proveniente de aterro sanitário. Um estudo de caso: um aterro sanitário no estado de São Paulo / M. Siqueira -- São Paulo, 2018. 58p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Aproveitamento Energético 2. Aterro Sanitário 3. Biogás 4. Energia Elétrica 5. Biometano.

Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao meu filho, Daniel, que me inspira diariamente a ser uma pessoa melhor com sua inocência e amor incondicional.

À minha mãe, Maria Goreti, e ao meu pai, Ivo, por todo amor, carinho e pelo exemplo de dedicação e de caráter.

Ao meu esposo, Neto, por acreditar em mim, me apoiar e me incentivar. Gratidão pela ajuda neste trabalho e pela sua dedicação com nosso filho nos momentos de estudo.

À minha orientadora, Professora Dra. Suani Teixeira Coelho, pela disposição na elaboração desta monografia.

Aos professores e colegas do PECE por todo aprendizado e conhecimento compartilhado na área de energias renováveis.

Aos colegas do grupo Biogás, Tiago Silva, pela prontidão em me ajudar com todas as dúvidas, Marco Mazaferro, pela disponibilidade em me indicar valores de investimento de uma planta de purificação, Francisco Santo e Thiago Villasbôas, pela divulgação de materiais científicos.

E aos colegas de trabalho, Gleisa Nery, Pedro Stech, João Fuzaro, Ricardo Cortez, Adriano Almeida e Igor Urasaki, pelo incentivo, auxílio e paciência em me ensinar.

RESUMO

Nesse trabalho foi desenvolvido um estudo de caso que visa analisar o aproveitamento energético do biogás de um aterro sanitário no estado de São Paulo, que tem recebimento diário de 1.500 toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). O método utilizado para estimar a geração de biogás foi através do programa Modelo Biogás – Aterro 1.0 da CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Este programa emprega um modelo matemático (equação diferencial de primeira ordem) que estima a geração de metano no processo de degradação anaeróbia para cada porção de resíduo depositado no aterro. Considerado o período de uso entre 2019 a 2034, onde o encerramento do aterro é 2028, a média da geração de biogás obtida foi de 7.100 m³/h. Visando o potencial deste biogás, neste estudo foram avaliados dois aproveitamentos distintos, geração de energia elétrica e de biometano (um substituto do gás natural). Primeiramente, foi analisado o potencial elétrico, que a partir da vazão de biogás obtida no modelo e dos valores conhecidos de poder calorífico do biogás e da eficiência do grupo gerador adotado, resultaram em potencial energético médio de 15,0 MW. Para este projeto a potência elétrica selecionada foi de 5,7 MW. O excedente de biogás, com vazão média de 4.400m³/h, por sua vez, foi contabilizado para produção de biometano. Considerando o biogás com 55% de CH₄ (metano), o volume mensal de biometano obtido no processo de purificação varia de 800.545 a 1.785.244 Nm³ entre os anos 2019 e 2034. As análises financeiras foram realizadas por meio de indicadores econômicos e demonstraram viabilidade em ambas as tecnologias. O *payback* para a usina de geração de energia elétrica foi de aproximadamente 4 anos e a Taxa Interna de Retorno (TIR) resultou em 20%, considerando taxa de atratividade 12%. Para a planta de purificação de biogás, o *payback* foi no quarto ano, e a TIR obtida foi de 26%, considerando a mesma taxa de desconto de 12%. Por fim, o estudo demonstrou viabilidade técnica e econômica para o projeto.

Palavras-chave: Aproveitamento Energético. Aterro Sanitário. Biogás. Energia Elétrica. Biometano.

ABSTRACT

The paper developed a case study to analyze the energy usage of biogas from a landfill in São Paulo state, which receives on a daily basis about 1,500 tons of Urban Solid Waste (USW). The method to estimate the biogas quantity generation was provided with the software Modelo Biogás – Aterro 1.0 from CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo). This software uses a mathematical model (first order ordinary differential equations) that estimates methane generation during the process of anaerobic degradation for each portion of the urban solid waste disposed into the landfill. Considering the period between 2019 and 2034 and taking into account that the landfill will stop receiving USW in 2028, the average quantity of generated biogas is about 7,100 m³/h. In the study, two different uses were analyzed, the production of electric energy and the production of biomethane (substitute for natural gas). Firstly, it was evaluated the potential of the electric energy generation, which was calculated from the biogas flow rate and calorific value, and from the generator efficiency, resulting in a power output estimation of 15.0 MW. The installed conversion system chosen for this project has the maximum energy output of 5.7 MW, the remaining biogas volume shall be used for the production of biomethane. The gas purification plant for biomethane, gas flow at about 4,400m³/h, production was designed to process the remaining biogas from the landfill. Considering the biogas with a 55% of CH₄ (methane), the total monthly biomethane production may reach 80,545 to 1,785,244 Nm³ between 2019 and 2034. The financial viability performed for both electrical energy and biomethane production presented significant positive results. Considering the hurdle rate of 12% on the two studies, the payback for the power generation plant was approximately 4 years and the Internal Rate of Return (IRR) resulted in 20%, considering a 12% attractiveness rate. For the biogas purification plant, the payback was in the fourth year, and the IRR obtained was 26%, considering the same discount rate of 12%. In conclusion, the study has consistently proven the technical and financial viability.

Keywords: Energy Utilization. Landfill Sanitary. Biogas. Electrical Energy. Biomethane.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1- Contribuição energética por fonte (em porcentagem)	14
Figura 3.2 – Maquete de aterro sanitário	18
Figura 3.3 - Processo de digestão anaeróbia.....	19
Figura 3.4- Potencial brasileiro de Biogás	21
Figura 3.5 - Possibilidades de comercialização dos energéticos de resíduos.....	24
Figura 3.6 - Diagrama dos princípios utilizados para remoção de gases de enxofre do biogás.....	26
Figura 3.7 – Processos de tratamento do biogás.....	27
Figura 3.8 – Campo de entrada de dados no programa CETESB. Erro! Indicador não definido. 31	
Figura 4.1 – Premissas de valor sugerido do programa CETESB para cálculo da vazão de biogás.	32
Figura 4.2 – Moto gerador GE Jenbacher, modelo JGC 420 GS.	33
Figura 4.3 – Datasheet Moto gerador GE Jenbacher.....	33
Figura 4.4 – Possíveis sequências de upgrading.	35
Figura 4.5 – Mapa ilustrativo da distância entre o aterro e o gasoduto existente.....	36
Figura 4.6 – Esquema de fluxo de caixa.	39
Figura 5.1 – Estimativa de vazão anual de metano – Modelo Biogás da CETESB...42	
Figura 5.2 – Potencial de geração de biogás – Modelo CETESB.	43
Figura 5.3 – Potencial de capacidade instalada de energia elétrica – Modelo CETESB.	45
Figura 5.4– Fluxo de caixa do projeto da UTE.	49
Figura 5.5 – Tempo de retorno do investimento do projeto da UTE – Payback.50	
Figura 5.6 – Fluxo de caixa – Planta de purificação de biogás.	52
Figura 5.7 – Tempo de retorno de investimento – Planta de purificação de biogás..52	

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição gravimétrica média dos RSU no Brasil	17
Tabela 5.1 – Tabela de potência de capacidade de instalação.....	44
Tabela 5.2 – Tabela de vazão excedente de biogás, após queima direta.....	46
Tabela 5.3 – Potencial de geração de biometano, a partir do biogás excedente. – Modelo CETESB.	47
Tabela 5.4 – Tabela de Faturamento bruto e líquido.....	49
Tabela 5.5 – Tabela de fluxo de caixa.....	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Contextualização e justificativa	10
1.2. Problema.....	11
2. OBJETIVOS	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1. Energias Renováveis	13
3.2. Matriz Energética Brasileira	14
3.3. Produção de Biogás a partir de Aterros Sanitários	15
3.4. Aproveitamento Energético do Biogás	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1. Aterro sanitário estudado.....	28
4.2. Análise técnica: potencial gerador de biogás	29
4.2.1. Modelo de geração Biogás – CETESB	29
4.3. Condições de geração da energia elétrica.....	32
4.4. Condições de geração de biometano.....	34
4.5. Condições de venda da energia elétrica	37
4.6. Condições de venda do biometano	38
4.7. Análise econômica (TIR, VPL e <i>Payback</i>)	38
4.7.1. Valor presente Líquido – VPL	39
4.7.2. Taxa interna de retorno –TIR	40
4.7.3. <i>Payback</i>	40
5. RESULTADOS	42
5.1. Análise quantitativa de biogás	42
5.2. Produção de energia elétrica.....	44
5.3. Produção de biometano.....	46
5.4. Análise de viabilidade financeira do projeto proposto	47
5.4.1. Energia elétrica:	48
5.4.2. Biometano:	50
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	53
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização e justificativa

Diante da busca de soluções ambientalmente corretas para destinação final dos resíduos e da necessidade de ampliação e expansão na matriz energética, o uso de energias renováveis derivada do aproveitamento energético dos resíduos, é um tema atual e de predominante importância (ANDREAZI, 2017).

Ao longo da história, frequentemente o meio ambiente vem sendo degradado para satisfazer às necessidades básicas dos seres humanos. Desde os séculos XIX quando a energia industrial (mecânica e térmica), e posteriormente no século XX, a energia elétrica foram exploradas, o suprimento de energia para diferentes usos foi prioridade em relação à preservação do meio ambiente. Diante deste fato, novas tecnologias têm sido desenvolvidas a fim de solucionar o uso racional de recursos naturais, visando minimizar os impactos ambientais (GOLDEMBERG, 2007).

Atualmente, em vista das tecnologias disponíveis para tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) não se pode desprezar o resíduo pós-consumo como material sem valor. Esse entendimento pode construir um novo modelo para alterar o perfil do saneamento, necessário na maioria dos municípios brasileiros, a medida em que o saneamento deixa de ser um problema sério de saúde pública, e ainda possibilita aumentar o suprimento de água, energia, gera renda e aumenta a vida útil do aterro (LINO, 2014).

Devido ao crescimento populacional e ao consumo excessivo, energético e de recursos, a crescente geração de resíduos é desafio da sociedade moderna (JACOBI e BESEN, 2011). O descarte desse excesso de resíduos deve ser equacionado afim de mitigar os impactos ambientais, assim como atender à Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) que preconiza a prevenção e a redução na geração de resíduos, priorizando a reciclagem e a reutilização dos resíduos sólidos, assim, destinando apenas os rejeitos em soluções finais de disposição (BRASIL, 2010).

A importância da racionalização do uso de energia na ótica estratégica e de sustentabilidade de uma empresa é altamente relevante, visto que o mercado tem se

demonstrado orientado às empresas comprometidas com o meio ambiente e a qualidade de vida das pessoas. Empresas de saneamento ganham destaque em prestação de serviços sustentáveis, as quais se demonstrem tecnologicamente inovadoras, afim de utilizar eficientemente de forma energética seus processos de prestação de serviço assim como sua lucratividade (LAUREANO, 2014).

1.2. Problema

O biogás, gás produzido na degradação anaeróbica no interior de um aterro sanitário, é composto por aproximadamente 50% de metano (CH_4), 40% de dióxido de carbono (CO_2), 9% de nitrogênio, e concentrações residuais de compostos orgânicos voláteis, poluentes perigosos e outros elementos (SILVA, 2008).

O dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4) são gases potencialmente poluentes, considerados gases de efeito estufa. Os gases de efeito estufa (GEE) são gases que absorvem parte dos raios solares e resultam na forma de radiação na atmosfera, aquecendo o planeta em um efeito de estufa (COSTA, 2015).

O aterro sanitário é considerado solução adequada para disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) no mundo todo. No Brasil, os aterros sanitários são considerados viáveis tecnicamente devido à grande área territorial, além de ser viável economicamente, pelo baixo custo de operação (FELICORI, 2016).

A coleta e a queima controlada do biogás devem ser realizadas afim de minimizar o impacto ambiental causado pela liberação do biogás *in natura* na atmosfera. Estes procedimentos contribuem para a diminuição da emissão de gases poluentes, assim sendo, transformando o metano em dióxido de carbono, através da queima direta. O metano, tem um potencial de poluição atmosférica 21 vezes maior que o dióxido de carbono (PIÑAS, 2016).

A geração de energia elétrica por conversão energética de biogás tem viabilidade comprovada em diversos cases e se enquadra nos quesitos de desenvolvimento sustentável, visto que deixaria de ser lançado na atmosfera grande quantidade de metano (MARTENS, 1998, apud ANDREOS, 2013).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o aproveitamento energético do biogás produzido em um aterro sanitário selecionado, no estado de São Paulo.

Os objetivos específicos são:

- Estimar o potencial de biogás produzido no aterro selecionado;
- Estimar a produção de energia por meio de processos de transformação convencional;
- Avaliar a potencialidades de venda das energias produzidas utilizando as tecnologias consideradas;
- Analisar a viabilidade técnica-financeira para os aproveitamentos energéticos escolhidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Energias Renováveis

O conceito de energia permite referir-se à capacidade de realizar trabalho, ou ainda, como a capacidade de movimento. A energia é indispensável para o desenvolvimento humano e tecnológico. A transformação de energia, é imprescindível para o desenvolvimento socioeconômico e a sociedade depende cada dia mais de energia para sua subsistência (CALIJURI; CUNHA, 2013).

As fontes primárias de energia são oriundas de recursos naturais, em sua forma direta como combustíveis fósseis, os resíduos vegetais e animais, a energia solar e a eólica, os produtos da cana-de-açúcar, etc. As fontes secundárias de energia são transformadas a partir das fontes de energia primárias, por exemplo, energia elétrica, gasolina, vapor, entre outros (COUTINHO, 2015).

A energia é um recurso natural que se pode aproveitar industrialmente a partir da aplicação da tecnologia e de diversos recursos associados. O termo renovável está associado a transformar ou reestabelecer algo que tinha sido interrompido. A energia renovável faz menção ao tipo de energia que se pode obter de fontes naturais inesgotáveis ou de fontes com capacidade de se restaurar naturalmente (BIASI *et al.*, 2018).

De acordo com Jenne *et al.* (1983), devido à crise do petróleo na década de 1970, que gerou aumento nos custos de combustíveis fósseis, novas tecnologias de otimização dos recursos energéticos ascenderam em relevância no cenário internacional, estimulando assim a busca por fontes alternativas e uso otimizado dos recursos.

Essas tecnologias se mantiveram em evidência devido às crescentes preocupações com o aquecimento global e mudanças climáticas, amplamente associadas ao consumo de combustíveis fósseis. A redução e substituição desses combustíveis é uma prioridade em âmbito internacional como evidenciado em acordos como o Acordo de Paris (VERKUIJL, 2018).

3.2. Matriz Energética Brasileira

Matriz energética é uma representação quantitativa da oferta de energia que um determinado país dispõe para sustentar o desenvolvimento de suas atividades econômicas. Em 2017, a participação de renováveis na matriz energética brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo (BEN, 2018). A Figura 3.1 demonstra a contribuição energética na matriz, por tipo de fonte, em percentual.



Figura 3.1- Contribuição energética por fonte (em porcentagem)

Fonte: EPE – BEN 2018

Devido à riqueza de cursos hídricos no Brasil, uma das fontes em destaque nas renováveis é a hidráulica, exclusivamente destinada à produção de eletricidade. Mas o maior percentual de fonte limpa encontrado na matriz energética brasileira, são os derivados da cana-de-açúcar, que produzem o etanol, combustível utilizado no setor de transportes. Ainda para esse setor, verifica-se uma grande representatividade na fonte não renovável, o óleo diesel e a gasolina, que são combustíveis fósseis (GOMES, 2011).

A descarbonização da matriz energética é necessária para diminuir as emissões de gases de efeito estufa. A ampliação da participação das energias renováveis, desde que, com fornecimento a tarifas acessíveis, é fundamental e um grande desafio. Coelho *et al.* (2018), comenta que: “O enfrentamento a estes desafios é fortemente dependente de políticas públicas e regulações que auxiliem na introdução de fontes de energia renovável nas matrizes energéticas dos países”.

Diante desta necessidade ambiental, nos últimos anos, a geração de energia a partir de fontes renováveis vem crescendo, devido às pesquisas em desenvolvimento tecnológico, seja de fontes como solar, eólica, biomassa de cana de açúcar, biogás, entre outras. O melhor aproveitamento da fonte, minimizando perdas energéticas caracterizam a cogeração (ALTOÉ *et al.*, 2017).

3.3. Produção de Biogás a partir de Aterros Sanitários

Resíduo sólido pode ser definido como todas as sobras ou rejeitos, que se apresentem no estado sólido e semissólido, resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, comercial, agrícola, de serviços de limpeza e varrição. A norma NBR 10004/04 “Resíduos Sólidos – Classificação” da ABNT divide os resíduos em duas categorias, Classe I (perigosos) e Classe II (não-perigosos), sendo a Classe II subdividida em não-inertes (Classe IIA) e inertes (Classe IIB) (ABNT, 2004).

Os resíduos Classe I são aqueles que apresentam periculosidade em função às suas propriedades físicas, químicas ou infecto contagiosas, podendo apresentar riscos à saúde pública ou ao meio ambiente. Os resíduos Classe IIB (não-perigosos e inertes) são aqueles que não possuem concentrações de compostos orgânicos ou substâncias que conferem toxicidade ao meio ambiente. Os resíduos Classe IIA (não-perigosos e não-inertes) são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos Classe I (perigosos) ou de resíduos Classe IIB (não-perigosos e inertes), nos termos da norma em questão (ABNT, 2004).

Os resíduos sólidos provenientes dos serviços de coleta regular dos municípios (domiciliares e comerciais), dos serviços de conservação de logradouros públicos, de limpeza e varrição, incluindo podas, são classificados como Classe IIA, principalmente pela presença de matéria orgânica biodegradável (ABRELPE, 2012). A Tabela 3.1 demonstra a participação de matéria orgânica na composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil.

Tabela 3.1 - Composição gravimétrica média dos RSU no Brasil

Materiais	Participação %	Quantidade	
		2000 t/dia	2008 t/dia
Materiais recicláveis	24,2%	47.558,50	58.527,40
Metais	2,2%	4.301,50	5.293,50
Papel, papelão e tetrapak	9,9%	19.499,90	23.997,40
Plástico	10,3%	20.191,10	24.847,90
Vidro	1,8%	3.556,10	4.388,60
Matéria Orgânica	39,0%	76.634,50	94.309,50
Outros	12,7%	24.880,50	30.618,90
Total coletado	100%	196.622,10	241.983,20

Fonte: IPEA 2012.

A Lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece a obrigatoriedade da coleta seletiva e prevê que somente depois dos resíduos sólidos passarem por processos para esgotar todas as possibilidades de tratamento e recuperação economicamente viáveis, sendo assim chamados de rejeitos, deverão ter disposição final ambientalmente adequada, ou seja, em aterros sanitários. Porém no Brasil ainda temos três tipos de disposições finais: lixões, aterros controlados e aterros sanitários (BRASIL, 2010). Na Figura 3.2 pode-se observar como foi a disposição dos RSU nos anos de 2016 e 2017 no Brasil.

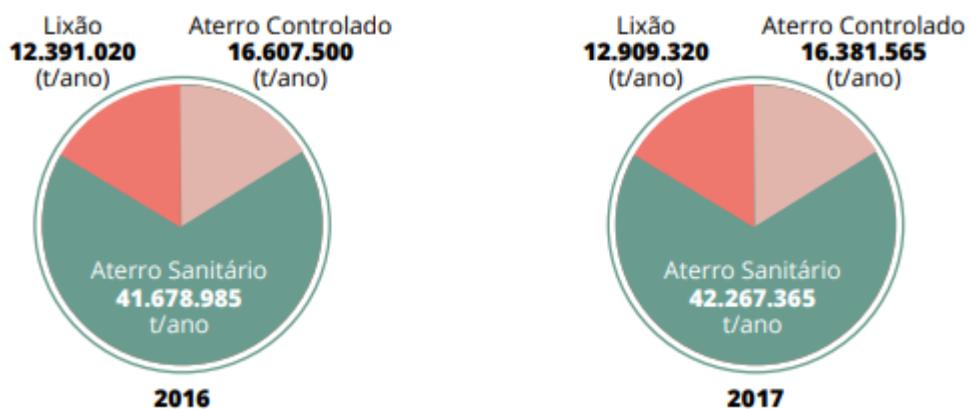


Figura 3.2 - Disposição final dos RSU (t/ano) no Brasil

Fonte: ABRELPE, 2017 p.19

De acordo com a definição do Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2018), o lixão é uma forma inadequada de disposição final dos resíduos,

pois não há proteção contra danos ao meio ambiente e à saúde pública. O resíduo fica exposto a céu aberto, contribuindo para proliferação de vetores de doenças (insetos, baratas, ratos etc.), gera mal odor e, principalmente, polui o solo e as águas subterrâneas e superficiais, por não contar com sistema de impermeabilização da base e drenagem, ocorre infiltração de chorume, líquido de cor preta gerado a partir da decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos. Não há controle dos tipos de resíduos recebidos, verificando até disposição de dejetos de serviço de saúde e industriais.

O aterro controlado, é uma técnica de disposição de resíduos que minimiza os impactos ambientais comparados ao lixão. Utiliza conceitos de engenharia para confinar os resíduos e aplica uma camada de material inerte no fim da jornada de trabalho, evitando que o resíduo fique exposto. Geralmente não conta com impermeabilização de base, nem com tratamento de chorume e de biogás gerados pela decomposição de matéria orgânica. Ainda assim, é um método preferível ao lixão, mas devido aos danos ambientais e o custo operacional, tem qualidade muito inferior aos aterros sanitários (CEMPRE, 2018).

A PNRS determina prazo para eliminar destinação final de resíduos em lixões, os quais não apresentam controle ambiental para a disposição dos RSU no solo. O prazo foi definido inicialmente para 2014 e o projeto de lei – PL 2289/2015 estuda a intenção de prorrogar o prazo para erradicação dos lixões para 2018 até 2021, dependendo da característica do município. Porém até junho de 2018 a PL não demonstrou andamento (BRASIL, 2015).

À medida que o recebimento em aterros sanitários passe a ser apenas de rejeito, a tendência seria que não ocorresse mais a produção de biogás de aterro sanitário, uma vez que a quantidade de matéria orgânica existente no rejeito é praticamente nula (COELHO, 2017 *apud* MOREIRA, 2017).

Aterro sanitário, segundo a NBR 8.419/92, é a técnica de disposição final de resíduo sólido urbano, sem causar danos à saúde pública, visando minimizar os impactos ambientais. Aterros sanitários devidamente construídos com bases nas normas brasileiras vigentes, além do armazenamento dos resíduos, tem como premissa a drenagem e tratamentos do efluente, assim como a drenagem e coleta dos gases, produzidos por ação biológica. Esses gases são denominados biogás (ABNT, 1992).

A captação do biogás por meio de uma rede de drenagem de gases executada entre as camadas de um aterro sanitário, possibilita maior eficiência na captação e produção de metano (COELHO, 2008). A Figura 3.3 a seguir, demonstra esquematicamente um aterro sanitário em operação, contendo drenagem de líquidos e gases, coleta e tratamento deles.



Figura 3.3 – Maquete de aterro sanitário

Fonte: Instituto Estre, 2018.

O aterro sanitário é uma das principais formas de disposição final de resíduos do mundo. Os resíduos depositados nestes locais entram em decomposição gerando gases, denominado biogás, que podem afetar diretamente o meio ambiente. A emissão descontrolada do biogás é um grave problema de poluição atmosférica local e mundial que precisa ser mitigado (FERNANDES *et al.*, 2009).

Como discutido em Coelho *et al.* (2018), digestão anaeróbia é o processo de decomposição bioquímica da matéria orgânica, na ausência de oxigênio, e ocorre em quatro fases. A primeira fase é a hidrólise, onde as bactérias liberam enzimas que, decompõem compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios), em compostos dissolvidos (aminoácidos, açúcares e ácidos graxos) por meio de reações bioquímicas. Acidogênese é a próxima fase, onde as bactérias fermentativas

decompõem os compostos formados a partir da hidrólise em ácidos graxos voláteis (ácidos acético, propiônico e butírico) e outros compostos como ácido láctico e álcoois.

A acetogênese, terceira fase, é responsável pela oxidação dos produtos gerados na fase anterior, resultando em substratos apropriados para os microrganismos metanogênicos, precursores do biogás. A fase metanogênica refere-se à última fase do processo de degradação anaeróbia, onde as bactérias atuantes são estritamente anaeróbias e possuem a capacidade de converter os compostos orgânicos formados na fase anterior (ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono) em metano, principal constituinte do biogás (COELHO *et al.*, 2018). A figura 3.4 demonstra o processo acima descrito.

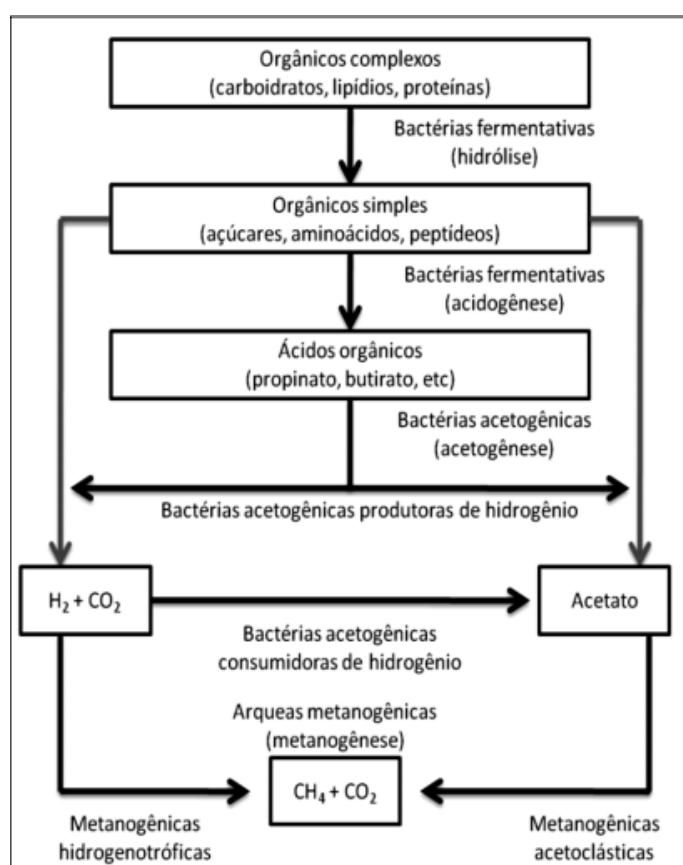


Figura 3.4 - Processo de digestão anaeróbia

Fonte: PAES, 2013.

A geração de metano baseia-se normalmente em modelos cinéticos de primeira ordem exponencial, estes modelos dividem os resíduos sólidos urbanos (RSU) em várias categorias, cada uma com seu respectivo potencial de geração de

metano (L) a partir da biodegradação de RSU e constante de biodegradação (k) por unidade de tempo (CANDIANI; MOREIRA, 2018).

Os gases produzidos pela ação biológica são, essencialmente, metano e dióxido de carbono, em concentrações variáveis no decurso da vida do aterro e dependentes da idade e da natureza dos resíduos depositados. O dióxido de carbono tem densidade superior à do ar e elevada solubilidade na água, estando a sua drenagem natural associada à circulação dos lixiviados (chorume). O metano, sendo mais leve que o ar, tende a escapar-se em fluxo de ascensão por difusão através dos resíduos (LIPOR, 2008 *apud* CABRAL, 2009).

Como dito na introdução, a fim de diminuir os impactos causados pelo metano lançado diretamente na atmosfera, a queima controlada do biogás, convertendo o metano em dióxido de carbono, é expressamente importante, visto que o potencial poluidor do metano em relação ao aquecimento global é 21 vezes maior que do dióxido de carbono. Mesmo que não haja o aproveitamento energético do biogás em moto-geradores ou turbinas, deve haver a queima do biogás em *flares* para que não ocorra a emissão do metano na atmosfera (PECORA, 2006)

3.4. Aproveitamento Energético do Biogás

No Brasil, por conta de a matriz energética elétrica estar fundamentada na energia hídrica, não houve até então maiores incentivos de geração de energia elétrica de outras formas, de diferentes fontes. O próprio setor privado manifestou interesse limitado em tais investimentos oriundos de fontes diversas das tradicionais por conta de uma série de particularidades como: o elevado custo do capital nacional; limitada capacidade para o desenvolvimento de projetos de financiamento externo; limitadas fontes de pesquisas tecnológicas; e restrições de barreiras regulatórias, principalmente porque as fontes renováveis (como no caso do biogás) geralmente transitam por diversos âmbitos da administração pública (BRASIL, 2005 *apud* PAES, 2013).

Devido ao grande volume de resíduos orgânicos produzidos, o potencial brasileiro na geração de biogás é destaque no mundo. São, aproximadamente, 50 bilhões m³ anuais de resíduos provenientes de saneamento, proteína animal e resíduos sucroenergéticos (KROPSCH, 2018). A figura 3.5 demonstra o potencial de m³ de biogás pelo tipo de fonte.

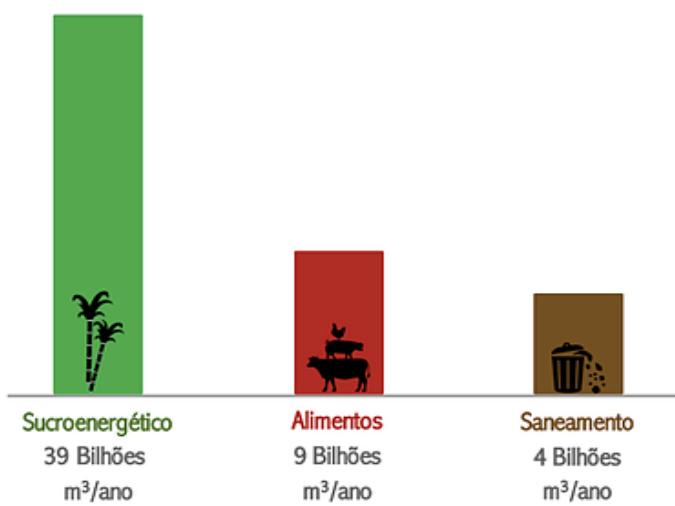


Figura 3.5- Potencial brasileiro de Biogás

Fonte: ABIOGAS, 2015.

O aproveitamento energético da biomassa pode ser feito por meio de diversas tecnologias, por exemplo, gaseificação, incineração, digestão anaeróbica, combustão direta, cogeração, fermentação, hidrólise, liquefação, pirólise, dependendo do tipo de biomassa e do uso final. No caso do biogás, as turbinas a gás ou microturbinas (em menor escala) e os motores de combustão interna do tipo "Ciclo-Otto" (com maior frequência) são as tecnologias mais utilizadas para a conversão energética. Porém, para que o aproveitamento energético possa ocorrer é necessário identificar a vazão, composição química e poder calorífico do biogás gerado, sendo estes os parâmetros que determinam o real potencial de geração de energia tanto na forma de energia elétrica quanto na forma de calor e trabalho (COELHO, 2006).

A produção de energia a partir de biogás em aterro sanitário é geralmente lucrativa e se torna ainda mais rentável quando se aproveita o biogás em cogeração em motores de Ciclo Otto, ou seja, com o aproveitamento das perdas térmicas, recuperando o calor de exaustão do motor (CARESANA *et al.*, 2011).

As vantagens do uso de motores para conversão de energia são (PAES, 2012):

- tecnologia de uso comum;
- rápida instalação;
- diversidade de fornecedores de equipamentos;
- eficiência em carga total e;

- parcial modularidade do sistema.

A desvantagem de maior relevância é ambiental, devido aos altos valores de emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) na atmosfera, gás de grande impacto ambiental por ser precursor do ozônio. Dependendo do motor, a emissão pode variar entre 250 a 3000ppm (ICLEI, 2009).

Já as microturbinas têm a emissão de NOx como uma vantagem na sua empregabilidade, visto tal emissão atmosférica ser baixa, na ordem de 9ppm. As microturbinas são pequenas turbinas de combustão que operam com elevada velocidade de rotação e diversos tipos de combustível, entre eles o biogás. Evoluíram das aplicações da turbina nas indústrias aeroespaciais e automotiva, para as aplicações em sistemas elétricos de potência apresentando diversas inovações tecnológicas. Outra vantagem do uso de microturbinas é a capacidade para operar um gás contendo baixo teor de metano: CH₄ > 35%, sem afetar sua eficiência. Em contrapartida, são equipamentos de alto custo de operação e manutenção, e também de investimento, por serem importadas (ICLEI, 2009).

Coelho et al., 2018, comenta que:

Quando operada com biogás, a microturbina necessita de um rígido sistema de limpeza do gás para remoção de umidade e H₂S, além de sua remodelação, uma vez que o biogás possui baixo poder calorífico, quando comparado ao gás natural. No caso do biogás de aterro ou ETE, há ainda a necessidade de retirada dos siloxanos (compostos derivados de produtos cosméticos e detergentes) presentes. (COELHO et al., 2018)

O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a quantidade de metano (CH₄) existente na mistura gasosa. O biogás proveniente de aterro sanitário é praticamente constituído por metano e dióxido de carbono, nas porcentagens de 55% e 40%, respectivamente. Por conter grande parte de metano, o biogás possui elevado potencial energético, podendo apresentar poder calorífico na ordem de 22 MJ/m³ (SANTOS, 2015).

O aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário é feito em diversos países. Nos Estados Unidos e nos países da Europa, o potencial instalado de geração de energia com biogás é estimado em cerca de 1.200 MW e 500 MW, respectivamente, segundo a Agência Ambiental Norte Americana – USEPA (VANZIN, 2006 *apud* COSTA, 2015).

No Brasil, apesar do enorme potencial, ainda são poucas as Usinas Termelétricas (UTE) movidas a biogás em operação. Mesmo assim, estudos demonstram viabilidade técnica e financeira para a instalação de uma UTE em aterros sanitários (ABREU *et al.*, 2014).

Segundo a Associação Brasileira do Biogás e do Biometano (ABiogás) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existem 15 usinas de recuperação energética de biogás de aterro sanitário, atualmente no Brasil, com uma potência instalada de 118 MW, aproximadamente. Deste potencial, 60% representam a energia gerada a partir desta fonte no estado de São Paulo, onde encontram-se 7 usinas termelétricas a biogás (LIMA, 2017).

A energia elétrica gerada a partir do biogás pode ser consumida pelo próprio aterro ou, em caso de excedente de energia, pode ser comercializada proporcionando uma receita adicional ao empreendimento (PECORA, 2010).

Devido ao baixo consumo de energia elétrica nos aterros sanitários, a geração de eletricidade a partir do biogás permite a venda do excedente de eletricidade. Porém, para estações de tratamento de esgoto, a geração de energia elétrica permite apenas o consumo de eletricidade, em média, 20%, devido à grande demanda energética para a digestão anaeróbia dos efluentes (COELHO, 2006).

A ANEEL regulamentou em 2009 a geração de energia elétrica a partir do biogás e sua comercialização. A Resolução Normativa no 390/2009, prevê que qualquer distribuidora de energia elétrica pode fazer chamadas públicas para comprar eletricidade produzida por fontes alternativas de energia. Seguindo as exigências da ANEEL em relação à qualidade da energia, os produtores poderão enviar a eletricidade para a linha de distribuição, em vez de somente consumir (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE, 2018).

Alguns aterros que realizam o aproveitamento energético do biogás têm grande sucesso há muitos anos. Podemos citar como exemplo, o pioneiro, Aterro Bandeirantes, encerrado em 2007. A potência inicial da usina a biogás do Aterro Bandeirantes era de 22 MW e foi inaugurada em 2004. Outro exemplo, este mais recente, a usina de geração de energia no aterro sanitário da Essencis, em Caieiras/SP, denominada Termoverde, que foi inaugurada em setembro de 2016, e é a maior termelétrica movida a biogás de resíduos sólidos urbanos do Brasil, com 29,5 MW de potência instalada. (COELHO *et al.*, 2018).

No Nordeste, a primeira termelétrica movida a biogás, denominada Termoverde Salvador, está instalada no Aterro Sanitário Metropolitano de Salvador e iniciou suas operações em março de 2011. A Termoverde Salvador possui capacidade de geração de 20 MW de energia a partir do biogás de aterro (SOLVI, 2010 *apud* COELHO *et al.*, 2018).

Outro exemplo de grande geração elétrica é a usina Biotérmica Energia, no aterro sanitário de Minas do Leão da Companhia Riograndense de Valorização, primeira usina de geração de energia a partir do gás de aterro sanitário do Rio Grande do Sul. A Usina tem potência instalada de 8,55 MW e, a pleno funcionamento, chegará a 15 MW (OSEPEENSE, 2015 *apud* COELHO *et al.*, 2018).

Do ponto de vista econômico, a decisão de investimento está diretamente relacionada à rentabilidade da opção escolhida para o aproveitamento energético. No aspecto da comercialização, as possibilidades de monetização podem ser via venda para o mercado elétrico, seguindo as regras definidas nas regulamentações da ANEEL, ou via biometano, em substituição ao gás natural, para os mercados de gás canalizado, residencial, industrial e veicular. A figura 3.6 mostra as principais formas de comercialização dos energéticos de resíduos. (EPE, 2018).



Figura 3.6 - Possibilidades de comercialização dos energéticos de resíduos

Fonte: DEA 19/2018 – EPE 2018.

A Lei nº 13.576 de 26 de dezembro de 2017 instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis (Renovabio), que foi regulamentada pelo Decreto Federal nº 9.308 de 15 de março de 2018, tem por objetivo definir a estratégia para o aumento da produção de biocombustíveis. Como resultado dessas estratégias definidas, pretende-

se a descarbonização da matriz energética brasileira e, assim, atender os compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris (COELHO *et al.*, 2018).

Desde 2017, com o lançamento da Renovabio, que pretende expandir a produção de biocombustíveis no Brasil, o setor vive momento promissor. No setor de saneamento há o potencial de produzir 7 milhões de m³ por dia desse biocombustível. No total, o potencial brasileiro de biogás equivale a 44% da demanda por diesel. De acordo com a EPE, o biogás vai representar o mesmo volume de energia exportada que a fotovoltaica e a perspectiva é que, até 2030, sejam produzidos 32 milhões m³/dia de biometano (ABILOGÁS, 2018).

O termo biometano é o nome dado ao gás metano resultante do processo de purificação do biogás, no qual são retirados, principalmente, umidade, CO₂, H₂S, siloxanos (no biogás de aterro sanitário e estação de tratamento de esgoto – ETE) e outros contaminantes. O biometano tem propriedades físicas e químicas similares às do gás natural, o que possibilita a substituição deste combustível em diversos usos. O poder calorífico do biometano é maior que o do biogás, fato que torna o seu transporte e armazenamento competitivo por apresentar maior densidade energética que o biogás (COELHO *et al.*, 2018).

A umidade tem influência direta no poder calorífico do biocombustível, afetando o processo de queima, a temperatura adiabática de chama e limites de inflamabilidade. Para remoção da água do biogás, quatro métodos são indicados; resfriamento, compressão, absorção e adsorção (WELLINGER *et al.*, 2013 *apud* COELHO *et al.*, 2018).

Já a remoção do gás sulfídrico (H₂S) se faz necessária nas fases iniciais do processo de limpeza e de purificação do biogás para proteger a integridade das instalações e garantir a segurança do processo. Os efeitos prejudiciais do H₂S fazem com que os limites de concentração sejam bastante restritivos e impostos a todos os tipos de aplicações de biogás e biometano. Além disso, a presença de compostos de enxofre no biogás reduz a eficiência de remoção de CO₂ (COELHO *et al.*, 2018).

Os siloxanos são compostos presentes no biogás proveniente de aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes doméstico. Eles são gerados a partir de compostos utilizados na indústria de cosméticos, de higiene pessoal e de detergentes que se volatilizam durante o processo de biodigestão e são incorporados

ao biogás. São compostos de sílica, oxigênio e radicais orgânicos e durante o processo de combustão se oxidam formando óxidos de silício, que são altamente abrasivos, aderindo às paredes de equipamentos como motores, caldeiras e turbinas, danificando-os, sendo imprescindível sua remoção para garantir a vida útil do motor à biogás (COELHO *et al.*, 2018).

Para a remoção de H₂S presente no biogás há um grande número de tecnologias comerciais. A seleção da melhor tecnologia depende do uso final do gás, da composição, da variabilidade do volume de gás a ser tratado e da concentração inicial e final de H₂S. Dependendo do uso final, dois ou mais processos podem ser combinados para obter a remoção de H₂S desejada (COELHO *et al.*, 2018).

A Figura 3.7 apresenta o diagrama dos processos utilizados pelas tecnologias para remoção de gases de enxofre do biogás.

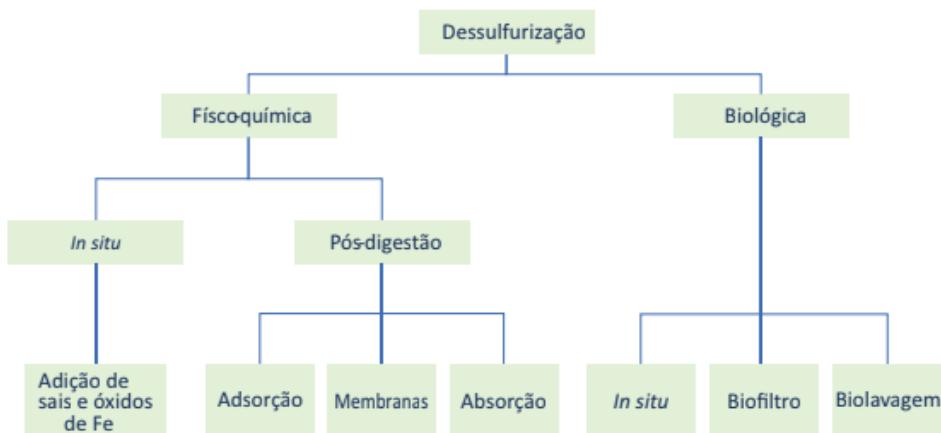


Figura 3.7 - Diagrama dos princípios utilizados para remoção de gases de enxofre do biogás.

Fonte: COELHO *et al.*, 2018

A desumidificação e a retirada de H₂S são considerados processos de limpeza de biogás ou *cleaning*. Porém, para que o Biometano tenha qualidade para uso final com gás natural renovável (GNR) é necessária a retirada da fração de CO₂ existente no biogás, ou seja o processo de purificação ou *upgrading* do biogás, conforme demonstrado na Figura 3.8 a seguir (COELHO *et al.*, 2018).

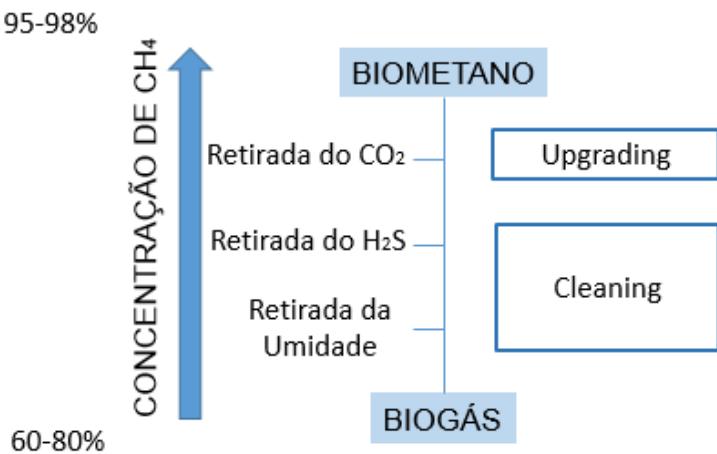


Figura 3.8 – Processos de tratamento do biogás.

Fonte: Adaptado de COELHO *et al.*, 2018

O uso do biometano como gás natural renovável necessita de pressurização para injeção na rede de distribuição de gás, liquefação para transporte a granel via modais rodoviário, ferroviário ou marítimo ou compressão para uso veicular (JOPPERT 2014; MOGHADDAM *et al.*, 2015 *apud* COELHO *et al.*, 2018).

Quando escolhido a injeção de biometano proveniente de aterros sanitários e de estações de tratamento de efluentes domésticos, devido a presença de siloxanos e outros compostos, o biometano deve atender aos parâmetros que a ANP exige conforme a Resolução nº 685 de 29 de junho de 2017, onde os siloxanos podem conter no máximo 0,3 mgSi/m³ (COELHO *et al.*, 2018).

Atualmente no Brasil, existem projetos relevantes em andamento referente a utilização do biometano. No Rio de Janeiro, por exemplo, a usina Dois Arcos, da Ecometano, localizada em São Pedro D’Aldeia, está em operação desde 2015 e tem capacidade instalada para produzir 15.000 Nm³/dia de biometano. E a maior planta de produção de biometano do país está instalada no aterro de Caucaia, no município de Fortaleza (GNR - Gás Natural Renovável), com a produção de 84.000 Nm³/dia de biometano, vendidos à Companhia de Gás do Ceará (ECOMETANO, 2018).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho visa analisar a viabilidade técnica e financeira de um caso real de aproveitamento energético de biogás produzido em aterro sanitário em operação, apresentando possíveis opções para geração de energia elétrica e produção de biometano, assim como a venda dessas energias, comparando os investimentos necessários e os retornos financeiros possíveis.

O aterro sanitário, objeto de estudo desta monografia, está em operação desde 2009 e está sob responsabilidade de uma empresa de saneamento consolidada do mercado, atuando com disposição final de resíduos há mais de 18 anos.

Neste trabalho foi estimado o potencial de geração de energia a partir do biogás produzido e captado no aterro sanitário. Para realizar o cálculo da produção de biogás foi utilizado o Programa de Computador Biogás da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB, 2018).

O modelo prevê a estimativa de geração dos gases ao longo do tempo da operação do aterro sanitário, desde o início, em função do volume depositado. A partir disto, foi analisado o potencial de produção dos diferentes tipos de energias e as quantidades, visando a venda e distribuição desta energia. A possibilidade de venda da energia gerada nos processos é fundamental para esta pesquisa, pois a rentabilização do investimento necessita de análise criteriosa nesse aspecto.

4.1. Aterro sanitário estudado

O *site* refere-se a um aterro sanitário para a disposição de resíduos sólidos urbanos. Sua concepção foi voltada à recepção e disposição final de resíduos sólidos recolhidos pelos serviços de coleta regular dos municípios da região, resíduos comerciais, incluindo ainda resíduos industriais não perigosos, ou seja, resíduos enquadrados na classe II – NBR 10.004 da ABNT.

O aterro sanitário foi implantado partindo-se da porção mais baixa do terreno. Concebeu-se um aterro em células sobrepostas circunscritas a um “dique” de solo compactado, dotado de todos os sistemas necessários à correta e adequada

disposição dos resíduos (sistema de drenagem de líquidos e de gases, sistema de drenagem superficial, sistema de captação e tratamento de gases e líquidos). A extensão da área de intervenção onde está efetivamente a deposição de resíduos é cerca de 43,0 ha.

Na sua base, o aterro dispõe de impermeabilização de fundo, obtida através da instalação de geomembrana de PEAD de 2,0 mm de espessura, recoberta com 0,5 m de solo compactado para proteção mecânica, conforme a legislação ambiental vigente. O volume útil total do maciço projetado é da ordem de 9.000.000 m³.

O aterro sanitário foi projetado com capacidade para o recebimento e adequada disposição de 1.500 toneladas de resíduos por dia, o que permite estimar a vida útil do empreendimento em 19 anos. O aterro está em funcionamento desde 2009 e seu encerramento está estimado para 2028.

4.2. Análise técnica: potencial gerador de biogás

Existem vários modelos para determinar a produção de biogás em aterros sanitários, que geralmente utilizam equações matemáticas, devendo-se tomar o cuidado de considerar certos critérios antes de utilizar estes modelos, para se chegar a resultados confiáveis. Tais resultados servem para avaliar tanto o potencial de emissões de GEE (gases de efeito estufa) como para analisar a viabilidade de projetos de aproveitamento do biogás (SILVA, 2012 apud PIÑAS, 2016).

Para fazer a mensuração do potencial teórico da geração de energia a partir do biogás de aterro sanitário, foi utilizado, o Modelo de geração Biogás (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB, 2018) “Programa de Computador Biogás – Geração e Uso Energético – Aterros – versão 1.0”. O procedimento do programa consiste no ingresso de dados de geração de RSU para o modelo matemático, que fazem projeções da quantidade de biogás gerada ao longo da vida do aterro sanitário.

4.2.1. Modelo de geração Biogás – CETESB

De acordo com esse modelo a estimativa de geração de metano é feita para cada porção de resíduo depositada no aterro. Primeiramente ocorre geração crescente, reduzindo-se com o passar dos anos após o encerramento do aterro, com

a sua intensidade variando em função da composição do resíduo e da umidade do local.

Para a estimativa da potência disponível, utilizam-se as seguintes Equações 1, 2 e 3:

$$\sum Q_x = k L_0 \sum (R_x e^{-k(x-T)}) \quad (1)$$

$$\int \frac{dQ}{dt} = k R_x L_0 \quad (2)$$

$$Q_x = k R_x L_0 e^{-k(x-T)} \quad (3)$$

Onde:

Q_x = vazão de metano ($m^3 CH_4/ano$);

k = constante de decaimento (1/ano);

L_0 = potencial de geração de biogás (m^3/kg);

R_x = fluxo de resíduos (t/ano);

x = ano atual;

T = ano de deposição do resíduo.

Os parâmetros k e L_0 foram definidos a partir de valores sugeridos pelo programa utilizado. A constante de decaimento k está relacionada a precipitação de ocorrência na região e varia entre 0,001 em climas mais secos e 0,15 ao ano em climas mais úmidos. O valor utilizado foi 0,08/ano, demonstrando a região de localização do aterro sanitário. O potencial de geração de biogás L_0 está relacionado a porcentagem de matéria orgânica contida no resíduo, este valor varia entre 0,001, para resíduos pouco orgânicos, e 0,312 $m^3 CH_4/kg$ para resíduos muito orgânicos. O valor de L_0 utilizado é de 0,12 $m^3 CH_4/kg$ que refere-se ao RSU com gravimetria de aproximadamente 35% de resíduos orgânicos.

Já a variável R_x , que refere-se ao fluxo de resíduos, foi determinada por meio de dados reais, ou seja, início e fim da operação do aterro, o fluxo diário de recebimento de resíduos e a taxa de crescimento anual. Como citado no item anterior,

o início da operação do aterro foi em 2009 e considerando a vida útil estimada, seu encerramento será em 2028. E o fluxo diário de recebimento foi considerado 1.500 t/dia, sem considerar taxa de crescimento, ou seja, constante em relação ao tempo. Diante destas premissas utilizadas, foi obtido o valor de R_x de 547.500 t de resíduos por ano.

A Figura 4.1, mostra a entrada dos dados de estimativa de geração de biogás no programa utilizado.

$$\sum Q_x = k \cdot L_0 \cdot \sum (R_x \cdot e^{-k(x-T)})$$

Dados para geração de metano	Confirmação de dados
Q = Vazão de metano (m³/ano)	
<input checked="" type="radio"/> k = Constante de decaimento (1/ano)	k (1/ano): 0,08
<input checked="" type="radio"/> Lo = Potencial de geração de biogás (m³/kg)	Lo (m³ CH4/kg): 0,12
<input checked="" type="radio"/> Rx = Fluxo de resíduo (t/ano)	Fluxo de resíduo (t/ano): 547.500
x = Ano atual (ano)	Ok
T = ano de deposição do resíduo (ano)	

Figura 4.1 – Campo de entrada de dados no programa CETESB.

Fonte: Programa de Computador Biogás – Geração e Uso Energético – Aterros – versão 1.0, 2018.

Após a inserção dos dados de entrada no programa, o próximo passo é a estimativa da geração de biogás, resultado do modelo utilizado. Todas as premissas para determinação da vazão do biogás foram definidas a partir do valor sugerido do programa, conforme demonstra a Figura 4.2.

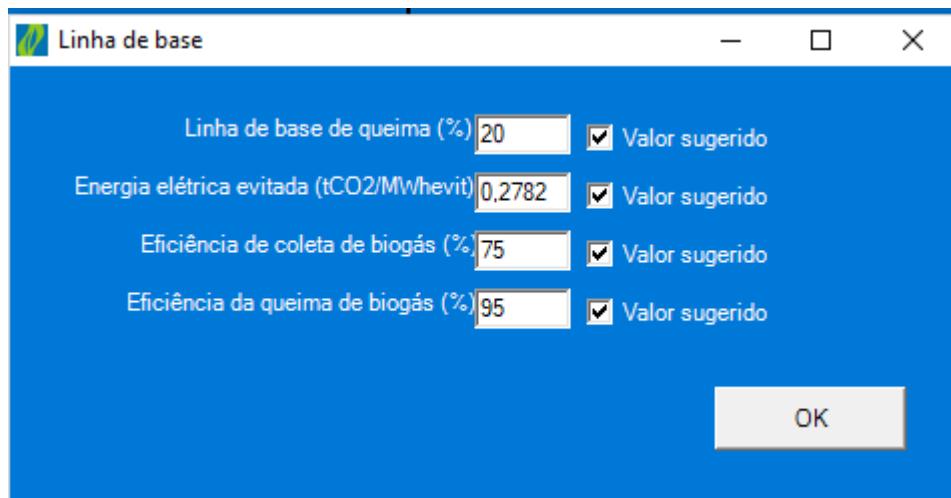


Figura 4.2 – Premissas de valor sugerido do programa CETESB para cálculo da vazão de biogás.

Fonte: Programa de Computador Biogás – Geração e Uso Energético – Aterros – versão 1.0, 2018.

A quantidade de biogás fugitivo de aterro pode variar entre 25 a 50% do total produzido. A fuga de biogás ocorre devido às diferenças locais de pressão, flutuação devido às diferenças das massas específicas do metano em relação ao ar ou do dióxido de carbono e, finalmente, a difusão devido à diferença de concentração (LINO, 2014). Deste modo, a eficiência de coleta do biogás neste modelo foi de 75%.

As incertezas na estimativa de geração de biogás são desafios para dimensionar o aproveitamento energético de biogás de um aterro (FILHO, 2013).

4.3. Condições de geração da energia elétrica

O dimensionamento da geração de energia necessita da especificação da tecnologia escolhida, a composição e a vazão em m³/h de biogás que será consumido, a eficiência esperada e o potencial energético disponível.

O grupo moto gerador escolhido para o estudo foi da marca *GE Jenbacher*, Modelo JGC 420 GS – B82, devido à alta eficiência e baixo custo de manutenção. Destaca-se que na sua condição de máxima eficiência em termos de aproveitamento energético do biogás e de geração de energia. A potência mecânica dessa ordem corresponde a uma potência elétrica de 1.426 kW.

Tabela 4.1 – Datasheet Moto gerador GE Jenbacher.

Jenbacher Type 4	J412	J416	J420
Saída Elétrica (kW)	850	1137	1426
Entrada de Energia (kW)	2217	2823	3529
Nox	500	500	500
Eficiência Térmica	45,2%	45,1%	45,2%
Eficiência Elétrica	40,2%	40,3%	40,4%
Eficiência Total	85,3%	85,4%	85,6%

Fonte: adaptado GE, 2018



Figura 4.3 – Moto gerador GE Jenbacher, modelo JGC 420 GS.

Fonte: GE, 2018

A potência instalada pode ser determinada calculando o potencial energético na vazão mais conversadora e traçar uma faixa de operação, de modo não superestimar a geração. Apresentar relação potência real e potência instalada garante que os geradores não trabalhem sobrecarregados, ou seja, em sua carga máxima. Sendo assim, o fator de carga (FC) utilizado no modelo é de 0,8, valor utilizado em contratos para licenças de UTE.

Os equipamentos utilizados para a geração de energia elétrica são:

- Sistema de tubulação de coleta e regularização de vazão;
- Bombas de sucção;
- Medidores de vazão;
- Unidade de arrefecimento e desumidificação;
- Sistema de filtragem;
- Compressores;
- Grupo motogeradores;
- *Flare* de queima e
- Transformadores elevadores de tensão.

A avaliação técnica, além de analisar o potencial de geração, analisou a possibilidade de distribuição da energia gerada, que pode ser limitada pela capacidade de distribuição de energia elétrica da concessionária local.

4.4. Condições de geração de biometano

Neste item é analisada a opção de produção de biometano, com o volume de biogás excedente da geração da energia elétrica.

A qualidade do biometano produzido e a eficiência no consumo do insumo é diretamente influenciado pela sequência das etapas necessárias para limpeza e purificação do biogás.

Considerando o processo de limpeza e purificação do biogás realizado em linha, é importante na definição das tecnologias considerar a concorrência dos diferentes compostos para garantir que o composto de interesse seja removido na etapa projetada para tal.

A Figura 4.4 ilustra sequência de processos para utilização das principais tecnologias de *upgrading*.

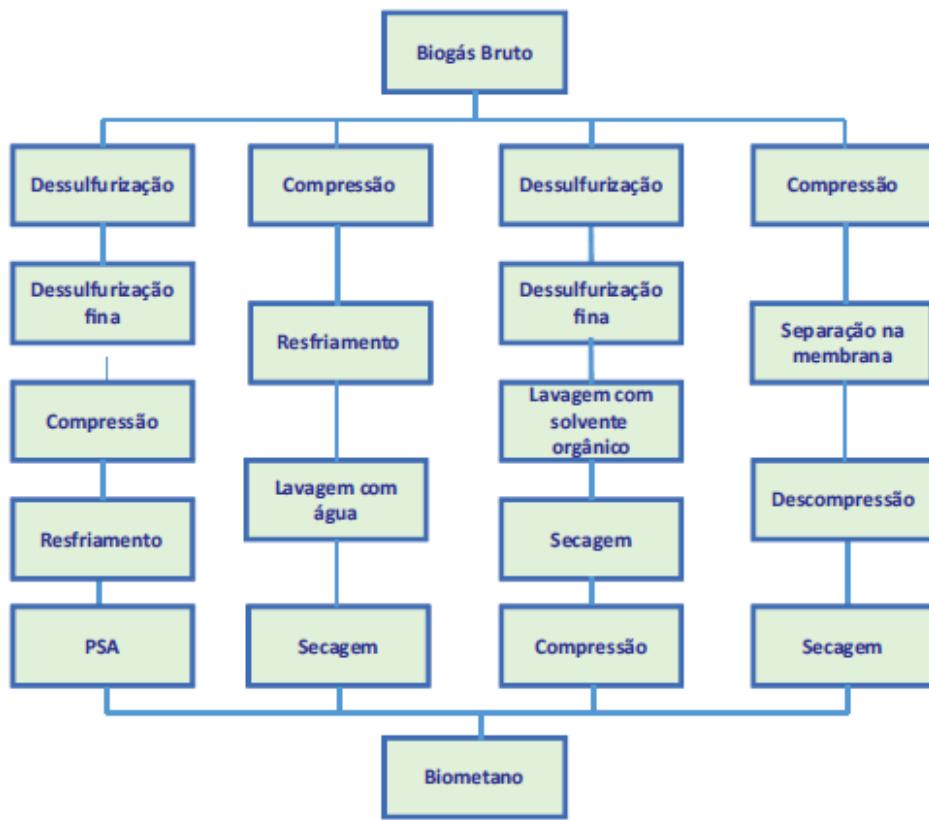


Figura 4.4 – Possíveis sequências de *upgrading*.

Fonte: COELHO *et al.*, 2018

Diante das tecnologias disponíveis para limpeza e purificação de biogás, é possível dimensionar a configuração do processo. A definição do projeto específico tem como premissa a eficiência energética, eficiência de remoção e os custos de investimento (CAPEX) e de operação (OPEX) envolvidos (COELHO *et al.*, 2018).

O investimento de uma planta de *upgrading* de biogás está diretamente relacionado aos volumes que serão purificados e à composição de entrada e de saída do biogás. O consumo de energia do processo definido afeta os custos operacionais, em média, o consumo de eletricidade para *upgrading* é por volta de 0,25 KWh por Nm³ tratado (COELHO *et al.*, 2018).

Neste estudo foi considerado purificação por meio da sequência dos seguintes processos:

- Sistema de Filtragem por Carvão Ativado (CA) – remoção de Siloxanos e VOC's
- Dessulfurização por CA + Oxigênio (O₂)

- Lavagem (*Scrubber*) com solvente orgânico
- Secagem
- Compressão

Para realização da purificação do biogás por lavagem com solvente, a pressão de operação deve estar entre 4 e 30 bar, conforme alguns autores. Devido ao CO₂ e ao H₂S serem mantidos na solução de lavagem, a regeneração desta se torna mais complexa. Para aproveitamento da solução de lavagem, além da redução de pressão, deve ocorrer elevação de temperatura entre 40 e 80° C. O consumo de energia está entre 0,23 e 0,33 kWh/Nm³ de biogás e a perda de metano varia entre 1 e 4% (COELHO *et al.*, 2018).

Após a purificação, o biometano precisa ser comprimido a 18 Bar para ser injetado na rede de gás, que está localizada a 9 km de distância da planta de purificação, conforme ilustrado na Figura 4.5, e para tanto considera-se a construção de um novo gasoduto até a ligação existente.

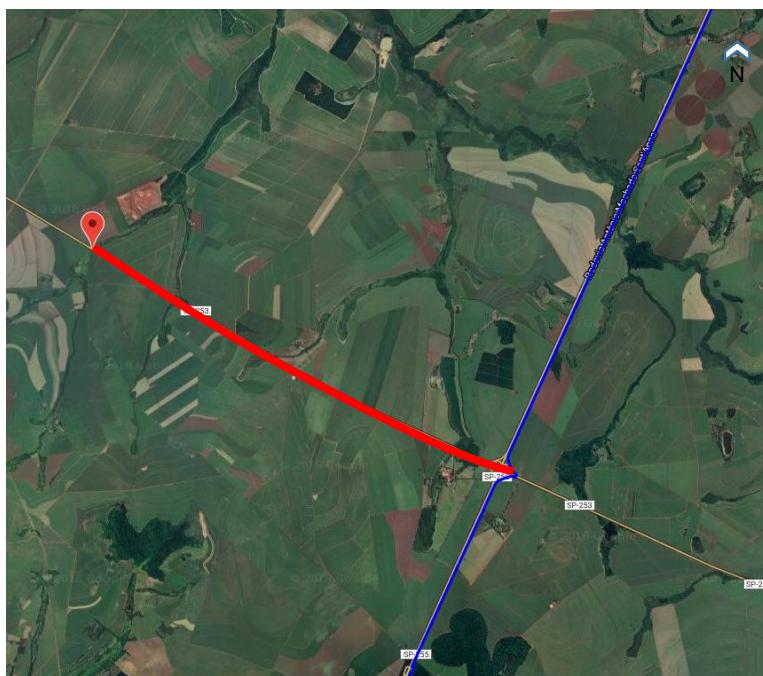


Figura 4.5 – Mapa ilustrativo da distância entre o aterro e o gasoduto existente.

Fonte: Nossa rede – Gás Brasiliano, 2018

A planta dimensionada neste projeto teve como premissa o menor custo de investimento e de operação, além de considerar a construção do novo gasoduto para o escoamento do biometano no gasoduto existente. A qualidade do biometano para injeção na rede é regulamentada por meio da Resolução ANP nº 685/2017 que define especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto.

4.5. Condições de venda da energia elétrica

Neste item será apresentado o estudo de viabilidade para a implantação de uma planta de geração de energia elétrica.

O volume de biogás gerado a partir de um aterro sanitário pode permitir, além da autossuficiência energética, a comercialização de excedentes gerados, proporcionando receita adicional. Para tanto é necessário que haja estrutura adequada para a venda da energia elétrica gerada, assim permitindo atrativas taxas de retorno frente aos investimentos (PECORA, 2004).

A comercialização da energia elétrica gerada se dará no mercado livre. Mercado livre ou Ambiente de Contratação Livre (ACL) é o mercado onde o produtor, caracterizado como produtor independente de energia, negocia o preço diretamente com o consumidor final. O consumidor final por ser caracterizado como consumidor livre ou consumidor livre especial.

As fontes de geração de biogás e biomassa devem ser registradas nos contratos de compra de energia incentivada junto a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), porém a negociação não é regulada por nenhum órgão. As taxas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição, neste ambiente, serão cobradas pelo ONS e pelo agente distribuidor local.

Para o presente trabalho, a premissa adotada é que a comercialização da energia será do limite que pode ser distribuído na linha existente da concessionária, a fim de evitar os custos de construção de uma nova linha, assim inviabilizando o projeto financeiramente.

A partir do pedido de licença de instalação da UTE é realizada a verificação do limite de corrente que pode trafegar na linha existente onde deseja-se fazer a injeção da energia elétrica produzida. No caso da concessionária local do *site*, o limite de escoamento de eletricidade na rede existente é de 5,0 MW. Apesar dos motores

totalizarem uma capacidade potencial de 5,7 MW, apenas 5,0MW serão considerados no cálculo da energia vendida, os 700KW serão utilizados no processo de purificação, gerando economia e sustentabilidade no processo.

Para elaboração do estudo de viabilidade técnica e econômica do projeto é necessária a contabilização de tributos incidentes nos ganhos obtidos com a venda da energia elétrica produzida, federais PIS/COFINS e o estadual ICMS, que é aplicado ao comprador de energia por meio da distribuidora local. Ambos tributos são aplicados sobre a receita da geração. Para venda de energia as porcentagens incidentes são 1,65% PIS e 7,6 COFINS. A incidência do ICMS apurado no consumo de energia elétrica é ônus financeiro do consumidor e tem forma de recolhimento variável, a depender do ambiente de contratação de energia elétrica (CCEE, 2018)

4.6. Condições de venda do biometano

Quando é destinado ao uso veicular, o biogás deve passar por um processo de remoção de substâncias como CO₂, H₂S, umidade, siloxanos e outras partículas. A purificação do biogás se dá pela remoção de determinada quantidade de CO₂, até se conseguir uma porcentagem de metano semelhante ao do gás natural, podendo, então, ser utilizado para o abastecimento de veículos (COELHO *et al.*, 2018).

A planta de purificação de biogás, para atendimento as premissas adotadas no presente trabalho, terá capacidade de transformar em biometano, todo o biogás que não terá combustão nos moto geradores. Porém, a capacidade da planta foi limitada visando otimizar o investimento, tendo maior tempo de utilização com menor potencial, e a segurança energética do processo.

4.7. Análise econômica (TIR, VPL e Payback)

As análises econômicas foram realizadas por meio dos parâmetros tradicionais VPL (Valor presente líquido, que indica a viabilidade do empreendimento quando se torna positivo) e TIR (Taxa interna de retorno, que indica a atratividade financeira do empreendimento).

A metodologia aplicada na avaliação econômica são baseadas nos fluxos de caixa dos projetos. O objetivo é verificar viabilidade econômica e qualificar o projeto

para comparação de tecnologias, de forma a ajudar a decisão de escolhas aos investidores e empreendedores.

Os fluxos de caixa podem ser representados por diagrama conforme a Figura 4.6, onde as setas para cima representam entradas, ou seja, receitas obtidas com a comercialização da energia, e as setas para baixo, representam saídas, sendo investimentos, pagamento de passivos e custos operacionais. E o período de análise econômica do projeto foi equivalente ao período de potencial de geração de biogás.

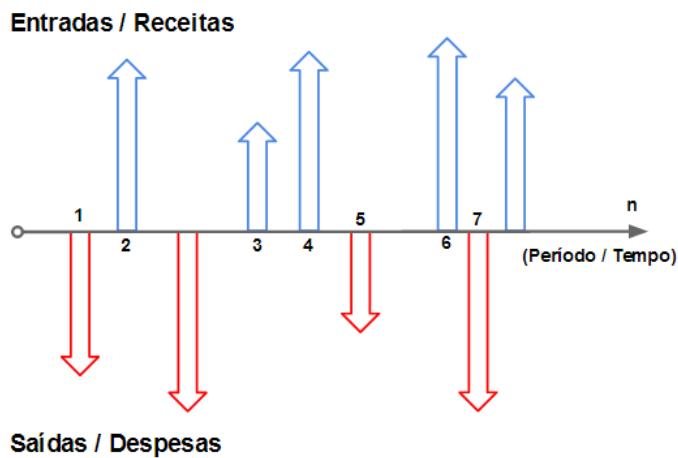


Figura 4.6 – Esquema de fluxo de caixa.

Fonte: Autora

As incertezas nos modelos econômicos são inevitáveis, visto oscilação dos índices comerciais previstos no período do projeto. E também por que as estimativas são modeladas, e a operação das plantas são expostas a inúmeras variáveis impossíveis de quantificar.

4.7.1. Valor presente Líquido – VPL

O valor presente líquido equaciona as entradas e saídas do fluxo de caixa desde o momento inicial do projeto, onde os valores futuros são corrigidos por uma taxa de atratividade mínima considerada pelo investidor. Basicamente o VPL é a soma de todas as entradas e saídas com valores ajustados para o presente, sendo possível assim, prever lucros e prejuízos associados ao projeto, durante a operação. A Equação 4 demonstra o VPL matematicamente.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - I \quad (4)$$

O VPL é um indicador que possui eficácia na estimativa orçamentaria e na determinação da taxa mínima de atratividade. VPL superior a 0, o retorno é superior à taxa mínima de atratividade, ou seja, lucros superiores ao juros do risco que o empreendedor está disposto a assumir. VPL igual a 0, o investidor deve escolher entre investir ou não, a taxa é a própria taxa mínima. E VPL inferior a 0, não ocorre o retorno financeiro desejado, sendo inviável o investimento. A Equação 5 demonstra o VPL nulo.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - I = 0 \quad (5)$$

4.7.2. Taxa interna de retorno –TIR

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma taxa de desconto hipotética que, quando aplicada a um fluxo de caixa, faz com que os valores das despesas, trazidos ao valor presente, sejam iguais aos valores dos investimento, também trazidos ao valor presente. Outra definição possível para TIR é a taxa de retorno que anula o VPL, associada a taxa de juros de cada projeto, calculada conforme a equação 6.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+TIR)^j} - I = 0 \quad (6)$$

4.7.3. Payback

O termo *payback* significa retorno e refere-se ao tempo de retorno financeiro do investimento realizado. *Payback Descontado* é o período de tempo necessário para recuperar o investimento, avaliando-se os fluxos de caixa descontados, ou seja, considerando-se o valor do dinheiro no tempo.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Fluxo de Caixa Anual}} \quad (7)$$

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes aos cálculos realizados para estimativa da vazão do biogás, geração de energia elétrica, volume de biogás purificado, custos de investimento das tecnologias utilizadas e os retornos financeiros possíveis da venda das energias produzidas.

5.1. Análise quantitativa de biogás

A análise da estimativa de quantidade metano foi conduzida por meio do modelo Biogás da CETESB, conforme detalhado anteriormente no item 4.2. O resultado gráfico, extraído do programa, está expresso na Figura 5.1, abaixo.

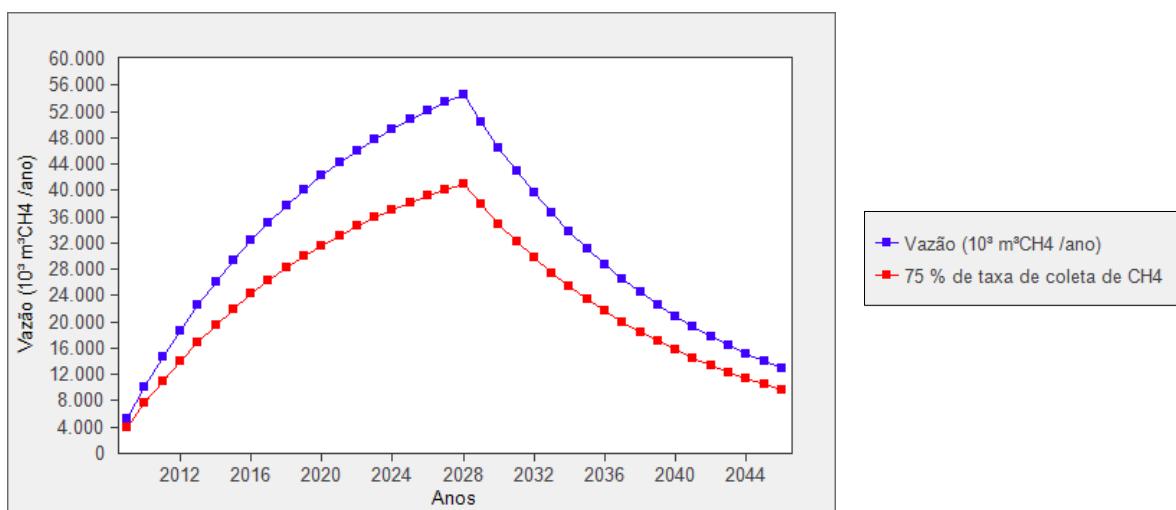


Figura 5.1 – Estimativa de vazão anual de metano – Modelo Biogás da CETESB.

Fonte: Autora

O gráfico acima demonstra a estimativa de geração de metano, que alcançam seu valor máximo no ano do encerramento, ou seja, 2019. O decaimento da curva após o encerramento é da mesma ordem de crescimento no período de operação e deposição de resíduos. Traçando uma linha média na vazão de CH₄ a partir do ano

atual, o mesmo potencial energético pode ser considerado por 15 anos. A Figura 5.2, demonstra o gráfico do potencial anual de biogás por hora (biogás = 55% de CH₄).

Considerando o início de operação da UTE em 2019 e a vida útil do grupo moto gerador 15 anos, o projeto será avaliado até 2034.

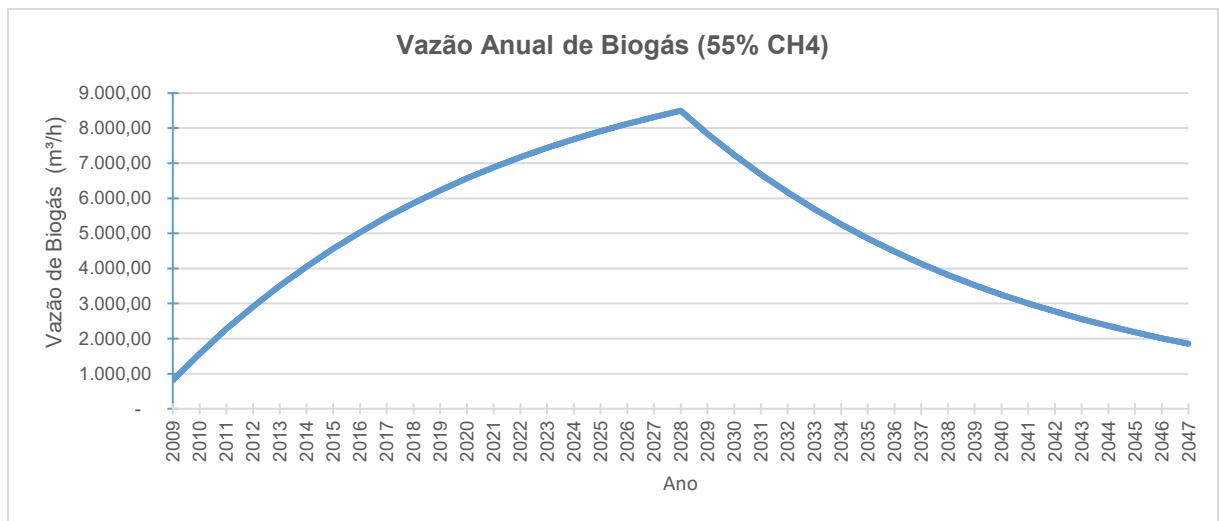


Figura 5.2 – Potencial de geração de biogás – Modelo CETESB.

Fonte: Autora

O potencial de energia elétrica instalado é diretamente proporcional a vazão do biogás, ao poder calorífico do biogás e à eficiência do motor de combustão. E a equação é expressa abaixo:

$$PE = \frac{Q \times PCI \times \eta}{860} \quad (8)$$

Onde:

P = potência disponível (kW)

Q = vazão de biogás (m³ /h)

PCI(biogás) = Poder Calorífico Inferior do biogás = 5.500 kcal/Nm³ (CRIBARI, 2004).

η = Eficiência de motores ciclo Otto operando a biogás = 34% = 0,34*

* Embora a eficiência no *datasheet* do equipamento ser superior a 40%, foi utilizado no cálculo 34% de eficiência pois é essa a eficiência encontrada nos grupos moto geradores em operação, que é dependente da carga, altitude e temperatura ambiente.

860 = fator de conversão de kcal/h para kW

A tabela abaixo demonstra o potencial energético em relação a vazão de biogás estimada.

Tabela 5.1 – Tabela de potência de capacidade de instalação.

Ano	Vazão CH4 (m ³ /ano)	Vazão CH4 (m ³ /dia)	Vazão CH4 (m ³ /h)	Vazão Biogás (55% CH4) (m ³ /h)	PE (KW)
2019	30.005.415,00	82.206,62	3.425,28	6.227,77	13.541,79
2020	31.640.490,00	86.686,27	3.611,93	6.567,14	14.279,72
2021	33.149.850,00	90.821,51	3.784,23	6.880,42	14.960,91
2022	34.543.170,00	94.638,82	3.943,28	7.169,61	15.589,73
2023	35.829.367,50	98.162,65	4.090,11	7.436,56	16.170,20
2024	37.016.670,00	101.415,53	4.225,65	7.683,00	16.706,05
2025	38.112.697,50	104.418,35	4.350,76	7.910,48	17.200,70
2026	39.124.455,00	107.190,29	4.466,26	8.120,48	17.657,31
2027	40.058.422,50	109.749,10	4.572,88	8.314,33	18.078,83
2028	40.920.585,00	112.111,19	4.671,30	8.493,27	18.467,93
2029	37.774.462,50	103.491,68	4.312,15	7.840,28	17.048,05
2030	34.870.222,50	95.534,86	3.980,62	7.237,49	15.737,33
2031	32.189.272,50	88.189,79	3.674,57	6.681,04	14.527,39
2032	29.714.445,00	81.409,44	3.392,06	6.167,38	13.410,47
2033	27.429.885,00	75.150,37	3.131,27	5.693,21	12.379,42
2034	25.320.975,00	69.372,53	2.890,52	5.255,50	11.427,65

Fonte: Autora

Depois de conhecido o potencial de geração, foi definido um modelo combinado de gerenciamento do biogás produzido, a fim de ter o melhor aproveitamento da fonte. O modelo sugere gerar e vender a energia elétrica por maior período de tempo, e o excedente da produção do biogás, realizar a purificação do biogás, obtendo assim o biometano.

5.2. Produção de energia elétrica

Independente do potencial de geração de energia elétrica da planta, no período de interesse, ser maior que 13MW (Tabela 1), o potencial instalado foi definido pelo limite de escoamento na rede elétrica existente, que é 5 MW. Deste modo, foi definido uma Usina Termoelétrica (UTE) de 4 grupos moto geradores de 1,426MW, totalizando 5,7MW de potência instalada. A Figura 5.3 expressa de forma gráfica o potencial de capacidade instalada em energia elétrica.

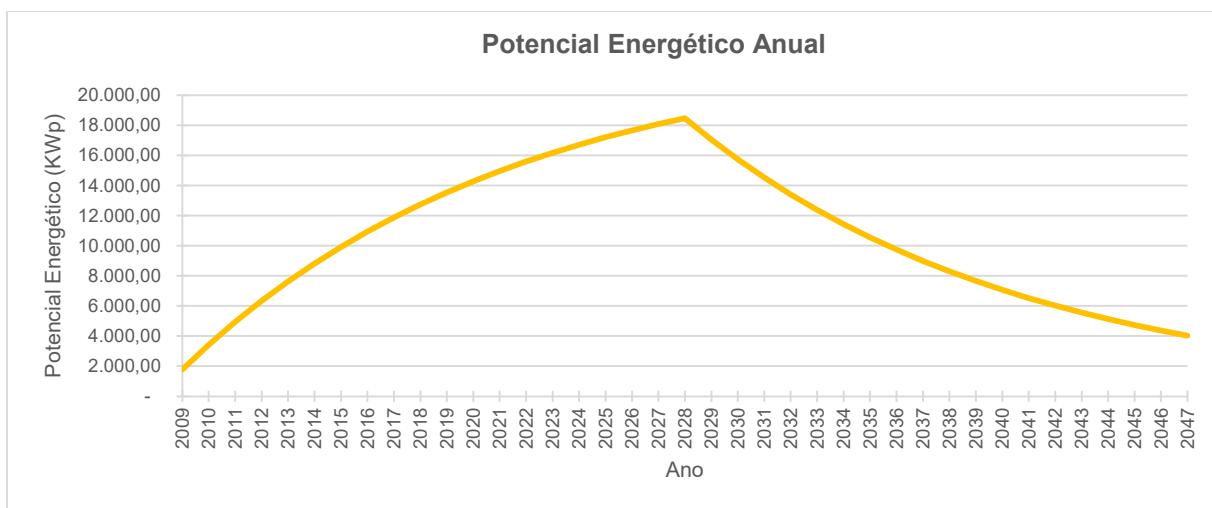


Figura 5.3 – Potencial de capacidade instalada de energia elétrica – Modelo CETESB.

Fonte: Autora

A geração de energia é definida pela equação abaixo:

$$E = PE \times FC \times \text{tempo} \times \text{Disponibilidade} \quad (9)$$

Onde:

E = energia disponível (kWh/ano)

P = potência disponível (kW)

FC = fator de carga = 0,80

Tempo de operação do motor = h/ano = 8.760 h

Disponibilidade considerada = % de utilização do motor ao longo do ano = 92,5%

A partir da fórmula acima, com a capacidade instalada de 5,7 MW, a geração anual de energia elétrica é na ordem de 37.000 MWh, considerando operação 24 horas por dia, 365 dias por ano e disponibilidade de 92,5%. Porém, a venda está limitada a 5,0MW de potência instalada, que resulta em geração de 32.412 MWh por ano. Os 4.538 MWh por ano, gerado e não vendido, serão utilizados na operação da planta de purificação, que tem como consumo médio anual no período aproximadamente 17.750 MWh.

A tabela 5.2 apresenta a vazão excedente de biogás, considerando o consumo de combustível para atender da potência instalada, ou seja, para os 4 motores.

Tabela 5.2 – Tabela de vazão excedente de biogás, após queima direta

Ano	PE (KW)	Potência Instalada (KW)	Vazão Excedente Biogás (m³/h)
2019	13.541,79	5.704,00	3.604,54
2020	14.279,72	5.704,00	3.943,91
2021	14.960,91	5.704,00	4.257,19
2022	15.589,73	5.704,00	4.546,38
2023	16.170,20	5.704,00	4.813,33
2024	16.706,05	5.704,00	5.059,77
2025	17.200,70	5.704,00	5.287,25
2026	17.657,31	5.704,00	5.497,25
2027	18.078,83	5.704,00	5.691,10
2028	18.467,93	5.704,00	5.870,04
2029	17.048,05	5.704,00	5.217,05
2030	15.737,33	5.704,00	4.614,26
2031	14.527,39	5.704,00	4.057,81
2032	13.410,47	5.704,00	3.544,15
2033	12.379,42	5.704,00	3.069,98
2034	11.427,65	5.704,00	2.632,27

Fonte: Autora

Considerando o período de análise, a vazão excedente mínima de biogás foi 2.632,27 m³/h, e é este excedente que será premissa para dimensionamento da planta de purificação de biometano.

5.3. Produção de biometano

A produção de biometano foi calculada a partir do excedente de biogás que não foi aproveitado em queima direta nos motores. Adotando 55% de CH₄ presente no fluido e considerando as perdas do processo escolhido na ordem de 4%, o volume de biometano gerado mensalmente variou entre 800.545 a 1.785.244,18 Nm³.

Os volumes citados acima serão justificados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Potencial de geração de biometano, a partir do biogás excedente. – Modelo CETESB.

Ano	Vazão Exc. Biogás 55%(m ³ /h)	Vazão Metano (m ³ /h)	Vazão Metano (m ³ /mês)	Vazão Biometano (Nm ³ /mês)	Biometano para venda (Nm ³ /mês)	Queima Flare (m ³ biogás/h)
2019	3.604,54	1.982,50	1.427.399,43	1.370.303,46	1.096.242,77	692,07
2020	3.943,91	2.169,15	1.561.789,16	1.499.317,59	1.199.454,08	757,23
2021	4.257,19	2.341,45	1.685.846,15	1.618.412,30	1.294.729,84	817,38
2022	4.546,38	2.500,51	1.800.365,60	1.728.350,97	1.382.680,78	872,90
2023	4.813,33	2.647,33	1.906.080,46	1.829.837,24	1.463.869,79	924,16
2024	5.059,77	2.782,87	2.003.666,97	1.923.520,29	1.538.816,23	971,47
2025	5.287,25	2.907,99	2.093.751,42	2.010.001,36	1.608.001,09	1.015,15
2026	5.497,25	3.023,49	2.176.909,57	2.089.833,19	1.671.866,55	1.055,47
2027	5.691,10	3.130,10	2.253.674,02	2.163.527,06	1.730.821,65	1.092,69
2028	5.870,04	3.228,52	2.324.536,69	2.231.555,23	1.785.244,18	1.127,05
2029	5.217,05	2.869,38	2.065.951,28	1.983.313,23	1.586.650,59	1.001,67
2030	4.614,26	2.537,84	1.827.246,63	1.754.156,76	1.403.325,41	885,94
2031	4.057,81	2.231,80	1.606.894,57	1.542.618,79	1.234.095,03	779,10
2032	3.544,15	1.949,28	1.403.484,09	1.347.344,73	1.077.875,78	680,48
2033	3.069,98	1.688,49	1.215.712,04	1.167.083,56	933.666,84	589,44
2034	2.632,27	1.447,75	1.042.376,97	1.000.681,89	800.545,51	505,39

Fonte: Autora

O volume descremido na coluna “queima flare” deve ser considerado em unidade de queima controlada em *flare*. O *flare* é um equipamento que tem a função de queimar o biogás quando os moto geradores não estiverem em funcionamento, a fim de minimizar os impactos ao meio ambiente, transformando metano em dióxido de carbono, minimizando o potencial de GEE. Este tipo de equipamento é importante, pois como o aterro sanitário produz o biogás de forma contínua, e a quantidade excedente deve ser queimada de forma a evitar maus odores e a propagação do gás na atmosfera. Este equipamento possui sensores que, quando detectam a necessidade, automaticamente acionam o sistema de chamas onde o biogás excedente é queimado.

5.4. Análise de viabilidade financeira do projeto proposto

Como já citado, os resultados da avaliação dos aspectos econômicos do presente estudo de caso, serão utilizados os seguintes indicadores de viabilidade econômica, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), tempo de retorno do investimento (*payback*).

5.4.1. Energia elétrica:

A fim de analisar o projeto a viabilidade financeiro do projeto da UTE proposta, algumas premissas foram adotadas. Estas premissas foram definidas com base nos dados e valores de mercado. Premissas volumétricas e de capacidade foram definidas e descritas nos itens anteriores.

O projeto foi analisado referente à receita obtida com a venda de energia no mercado livre de energia. Devido às altas e baixas do mercado de energia, o mercado livre de energia é interessante ao empreendedor, pois, este pode obter receitas superiores ao mercado regulado. Porém, o mercado livre apresenta seus riscos, os quais não foram mensurados na análise financeira. Para tanto será calculado o ponto de equilíbrio para o preço de R\$250,00/MWh para que o projeto seja analisado. Não considerando riscos e variações sazonais de preços.

Para o fluxo de caixa apresentado foi considerada uma vida útil de 15 anos para o projeto, com *make over* do grupo moto gerador com 60.000 h, no ano 7 de operação, a 80% do valor inicial do CAPEX, que foi estimando considerando o valor de R\$3,5 MM/MWp. Foi considerado também um custo de operação e manutenção de R\$70,00/MWh gerado e uma taxa de desconto igual à 12%. Os tributos utilizados foram apenas PIS/COFINS, na alíquota de 9,25% para o somatório dos dois. Não ocorre a Isenção do ICMS, porém para que ele não seja cobrado duplamente, a venda de energia não tem o desconto desse tributo neste trâmite de gerador e comercializadora, esse tributo é debitado apenas entre a comercializadora e o comprado de energia.

A tabela 5.4 demonstra os cálculos de faturamento bruto e líquido.

Tabela 5.4 – Tabela de Faturamento bruto e líquido

Ano	Produção (KWh)	Tarifa (R\$/ kWh)	Faturamento (R\$)	O & M (R\$)	PIS/COFINS (R\$)	Economia Anual R\$
						-R\$ 19.964.000,00
2019	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2020	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2021	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2022	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2023	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2024	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2025	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2026	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 18.240.040,00	R\$ 749.527,50	-R\$ 10.886.567,50
2027	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2028	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2029	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2030	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2031	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2032	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2033	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50
2034	32.412.000	R\$ 0,25	R\$ 8.103.000,00	R\$ 2.268.840,00	R\$ 749.527,50	R\$ 5.084.632,50

Fonte: Autora

Com base nestes resultados, o Gráfico a seguir apresenta o fluxo de caixa do projeto, discriminando o investimento do mesmo, o valor computado para execução do projeto e aspectos econômicos, *payback*, VPL e TIR.

A Figura 5.4 demonstra o fluxo de caixa da venda de energia elétrica.

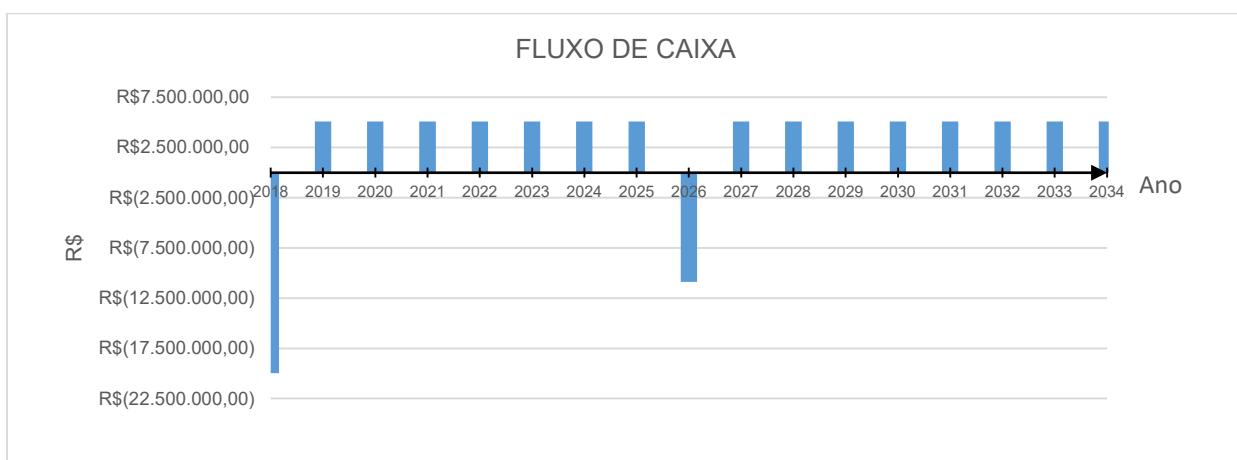


Figura 5.4 – Fluxo de caixa do projeto da UTE.

Fonte: Autora

O tempo estimado de recuperação do investimento do projeto da UTE é de aproximadamente 4 anos após o *start*, com uma taxa interna de retorno de 20%. O VPL resulta em R\$9.045.656,83, após 15 anos, que é a vida útil dos grupo moto geradores. Foi considerado apenas um *make over* no sétimo ano, de 80% do valor de investimento. *Make over* significa a troca de todas as peças do grupo moto gerador.

A figura abaixo demonstra o *payback* para venda de energia elétrica.

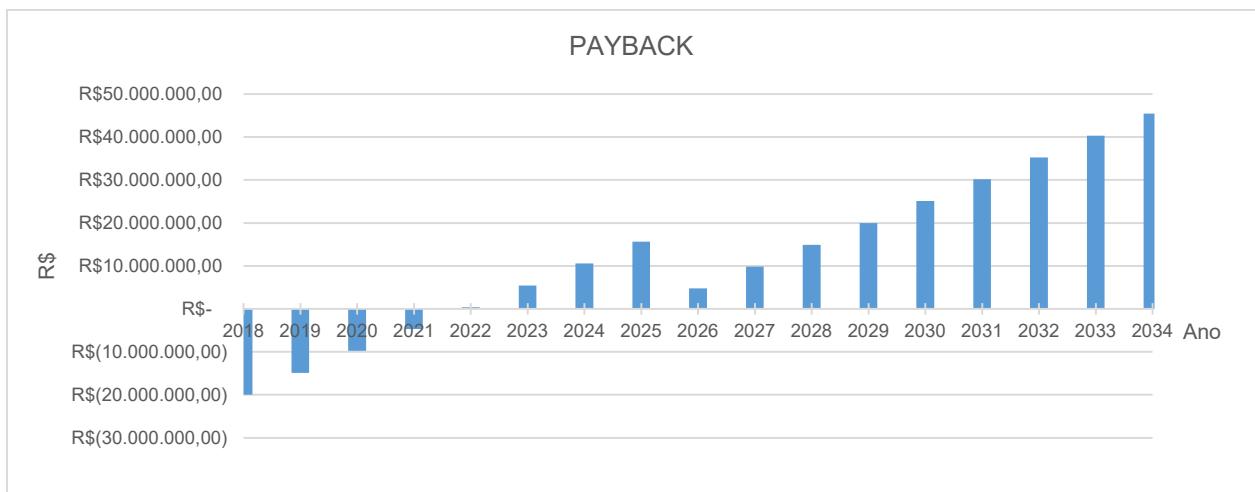


Figura 5.5 – Tempo de retorno do investimento do projeto da UTE – *Payback*.

Fonte: Autora

5.4.2. Biometano:

Para a análise de investimento da planta de purificação, houve dificuldade em encontrar preços reais para quaisquer tecnologia utilizada para *upgrading* do biogás. Foram utilizados então, premissas de investimento indicadas por um especialista em plantas de purificação no Canadá, porém aplicou valores atualizados para o Brasil.

Conforme o especialista a planta de purificação média de 2.500 Nm³ de biometano por hora é de U\$3.500.000,00, deste modo, precisamos dimensionar para 2 vezes essa vazão, conforme podemos observar na tabela 5.3, onde a vazão é de até 4.900 Nm³/ h, (vazão excedente descontada da vazão que será para *flare*); Considerando o dólar a R\$4,20, e o investimento do gasoduto de 9 km a R\$ 2.250.000,00, o CAPEX será de R\$ 31.650.000. E o custo de operação é variável, de acordo com o volume de biogás purificado. Dentro desse custo temos: Tratamento do biometano (remoção de Siloxanos, H₂S e CO₂), considerando R\$ 0,05/ Nm³ tratado

(CESTEB, 2001); Monitoramento e Odorização, considerando R\$ 0,05/Nm³ (Greenlane, 2018) e Operação e Manutenção considerando 0,33 kWh/Nm³ (COELHO et al, 2018).

De acordo com Gasparovic (2018), o valor de venda mínimo para que a TIR se iguale a taxa de desconto de 10%, é R\$0,93/Nm³ de biometano. Porém, na Deliberação ARSESP nº 716/2017, as tarifas determinadas para concessão pela COMGAS-SP, na modalidade GNV são de R\$1,194971/Nm³ para postos de combustível e R\$1,107135 para transporte público e frotas. Neste trabalho o valor de venda considerado foi R\$ 1,10/Nm³.

A taxa de desconto, ou de atratividade mínima utilizada também foi de 12%. Os tributos incidentes nesta análise de venda de biometano para injeção na rede de gás natural são 10,25 de PIS/COFINS e 18% de ICMS. A seguir são apresentados a tabela de cálculo e o gráfico do fluxo de caixa, assim como o gráfico do tempo de retorno financeiro esperado no projeto.

Tabela 5.5 – Tabela de fluxo de caixa

Ano	Faturamento (R\$)	Tratamento (R\$)	Monitor. e Odorização (R\$)	O & M (R\$)	PIS/COFINS (R\$)	ICMS (R\$)	Economia Anual R\$
							31.650.000,00
2019	14.470.404,51	657.745,66	657.745,66	2.076.009,74	1.483.216,46	2.604.672,81	6.991.014,18
2020	15.832.793,79	719.672,45	719.672,45	2.271.466,15	1.622.861,36	2.849.902,88	7.649.218,50
2021	17.090.433,90	776.837,90	776.837,90	2.451.894,64	1.751.769,47	3.076.278,10	8.256.815,88
2022	18.251.386,29	829.608,47	829.608,47	2.618.451,73	1.870.767,10	3.285.249,53	8.817.701,00
2023	19.323.081,29	878.321,88	878.321,88	2.772.203,42	1.980.615,83	3.478.154,63	9.335.463,65
2024	20.312.374,26	923.289,74	923.289,74	2.914.133,24	2.082.018,36	3.656.227,37	9.813.415,81
2025	21.225.614,40	964.800,65	964.800,65	3.045.152,07	2.175.625,48	3.820.610,59	10.254.624,9
2026	22.068.638,47	1.003.119,93	1.003.119,93	3.166.097,28	2.262.035,44	3.972.354,92	10.661.910,96
2027	22.846.845,78	1.038.492,99	1.038.492,99	3.277.743,50	2.341.801,69	4.112.432,24	11.037.882,37
2028	23.565.223,20	1.071.146,51	1.071.146,51	3.380.806,17	2.415.435,38	4.241.740,18	11.384.948,46
2029	20.943.787,73	951.990,35	951.990,35	3.004.719,55	2.146.738,24	3.769.881,79	10.118.467,45
2030	18.523.895,40	841.995,25	841.995,25	2.657.547,49	1.898.699,28	3.334.301,17	8.949.356,96
2031	16.290.054,41	740.457,02	740.457,02	2.337.067,46	1.669.730,58	2.932.209,79	7.870.132,53
2032	14.227.960,33	646.725,47	646.725,47	2.041.227,26	1.458.365,93	2.561.032,86	6.873.883,33
2033	12.324.402,35	560.200,11	560.200,11	1.768.131,59	1.263.251,24	2.218.392,42	5.954.226,88
2034	10.567.200,76	480.327,31	480.327,31	1.516.033,06	1.083.138,08	1.902.096,14	5.105.278,87

Fonte: Autora

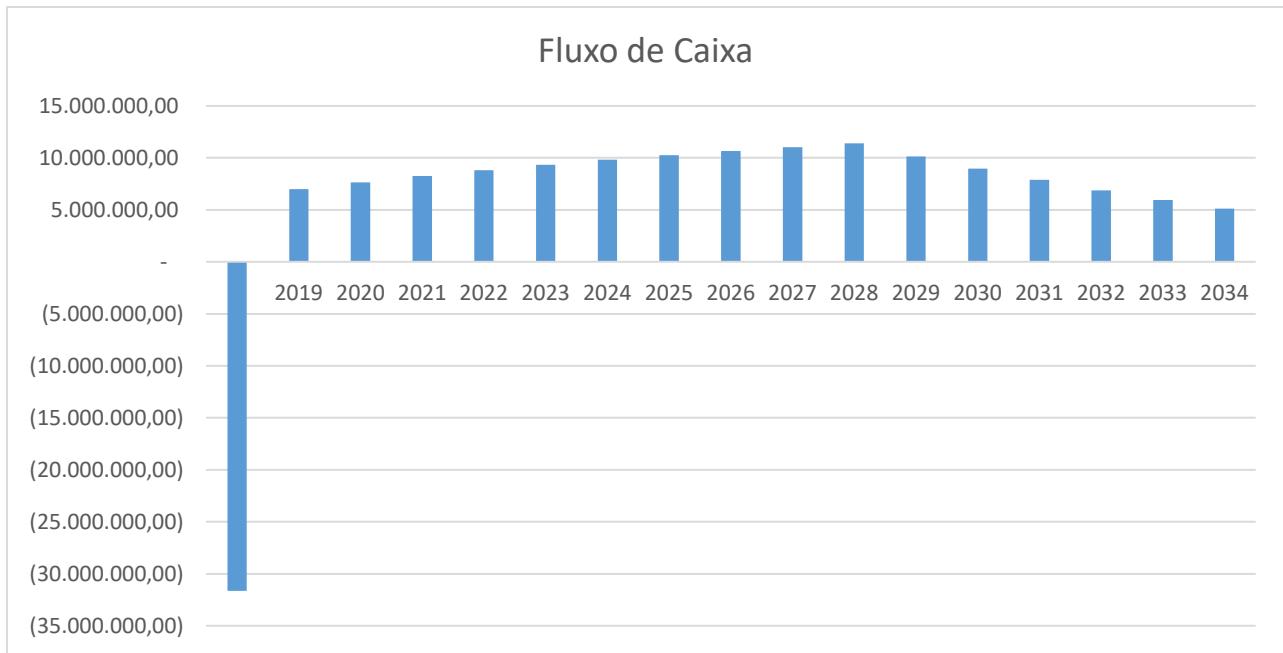


Figura 5.6 – Fluxo de caixa – Planta de purificação de biogás.

Fonte: Autora

O tempo estimado de recuperação do investimento do projeto da planta de purificação é de aproximadamente 4 anos após o *start*, com uma taxa interna de retorno de 30%. O VPL resulta em R\$ R\$38.014.258,71, após 15 anos, que é o tempo de estudo do projeto.

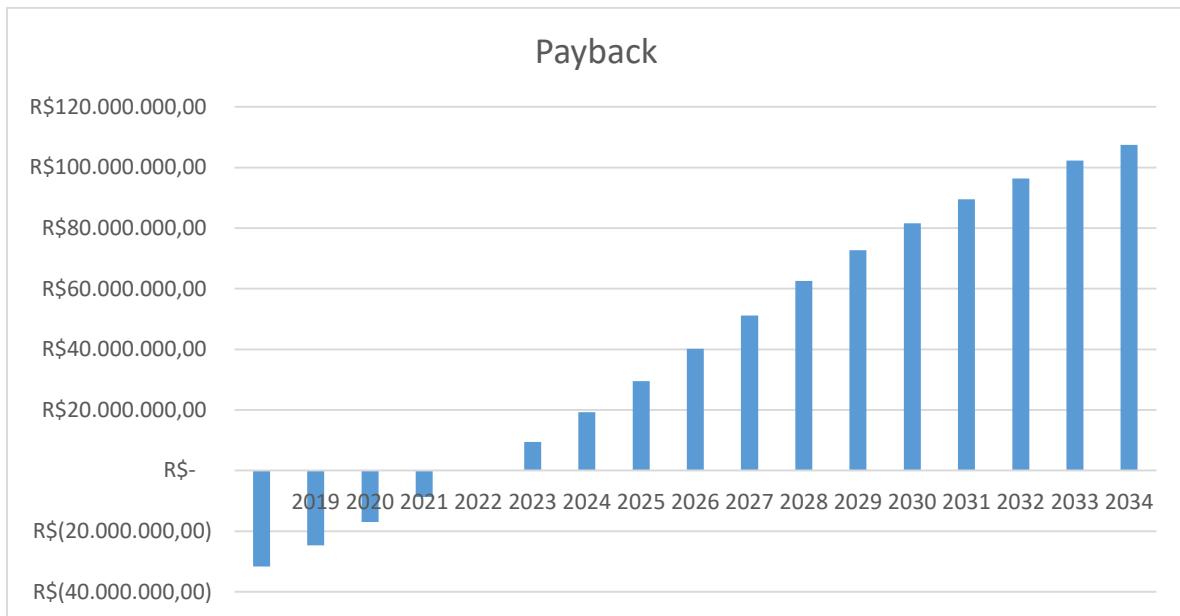


Figura 5.7 – Tempo de retorno de investimento – Planta de purificação de biogás.

Fonte: Autora.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O propósito desta monografia foi avaliar o potencial energético do biogás gerado em um aterro sanitário, procedimento adotado para dimensionamento de uma usina termoelétrica e de uma usina de purificação de biogás. A energia obtida em cada caso foi estimada, considerando a opção de vendas, sendo calculado o faturamento líquido.

As tecnologias de aproveitamento do biogás de aterro têm demonstrado eficácia na valorização energética de resíduos e no controle ambiental de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Com baixos custos operacionais na produção de biogás, a geração de energia elétrica e de biometano são viáveis, caracterizadas como energias renováveis, evitando assim, o uso de fontes convencionais e de combustíveis fósseis.

O aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, é importante passo para modernizar a matriz energética dos sistemas brasileiros e estimular a destinação adequada dos resíduos, porém depende de suas prioridades em relação a este combustível e das políticas públicas de fomento vigentes.

As atuais políticas do governo brasileiro que afetam o biogás e as políticas públicas bem sucedidas em outros países, são referências para alavancar toda a cadeia de valorização do biogás. São exemplos de políticas públicas existentes no Brasil, o PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas, o PNMC – Plano Nacional de Mudanças Climáticas, o PNE 2030 – Plano Nacional de Energia e o Renovabio.

Mais recentemente, em 1º de novembro de 2018, o governo do estado de São Paulo definiu percentual mínimo obrigatório de inserção de biometano na rede de gás canalizado, por meio de um projeto de lei complementar à Política Paulista do Biogás (Decreto 58.659/2012) e fundamentado pela Resolução 744 da Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo (ARSESP). Este projeto de lei irá para Assembleia Legislativa ainda esse ano e segue para sanção do governo no próximo ano.

Como mecanismo de incentivo a energias renováveis praticados internacionalmente, um dos mais utilizados é a tarifa feed-in (Feed-in Tariff), em que o governo garante em contrato por tempo determinado o pagamento de uma tarifa

mais vantajosa para geradores que utilizarem fontes renováveis de energia, como o biogás. Esse mecanismo é eficaz por viabilizar os empreendimentos pelo menos até que o setor se consolide e a competitividade com outras fontes de energia seja alcançada.

Neste sentido, o estudo e o desenvolvimento de projetos de aproveitamento energético de biogás adotados juntamente com estratégias de eficiência energética provam-se oportunas e importantes ações para reduzir custo, mitigar impactos ambientais e diversificar a matriz energética.

Para trabalhos futuros seria interessante essa mesma análise em escala real e mais detalhada, nos aspectos financeiros. A verificação e monitoramento de curva de geração real, evitaria superestimar os sistemas além da eficiência do dimensionamento. Para investimentos reais, o desenvolvimento detalhado de um plano de negócio é imprescindível e minimiza riscos financeiros que possam ocorrer, visto que em um plano de negócio os riscos são avaliados e quantificados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABILOGÁS – Associação de Biogás e de Biometano. **Seminário-técnico-nova-geração.** Disponível em: <<https://www.abiogas.org.br/seminario-tecnico-nova-geracao>>. Acesso em agosto de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.419:** Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. 7 p

_____. **NBR 10.004:** Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2012.** São Paulo: Abrelpe, 2012. Disponível em: <<http://a3p.ibpj.gov.br/pdf/ABRELPE%20%20Panorama2012.pdf>>. Acesso em: 01 jul. 2018.

ABREU, F. V., Filho, M. A.; SOUZA, M. C. **Biogás de aterros sanitários para geração de energia renovável e limpa** - um estudo de viabilidade técnica e econômica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

ALTOÉ, L., COSTA, J. M., OLIVEIRA FILHO, D., MARTINEZ, F. J. R., FERRAREZ, A. H. e VIANA, L. A. **Políticas públicas de incentiva à eficiência energética.** São Paulo: Scielo, 2017 - Disponível em <<http://www.scielo.br/scielo>> Acesso em agosto de 2018.

ANDREAZI, M. A. et at. Energy management: a synthesis of scientific publications on biodigestion for waste management. **Revista Ambiente & Água** vol.12 nº.6 Taubaté, 2017

ANDREOS, Ronaldo. **Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do estado de São Paulo..** 168f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia – IEE da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional 2017:** Ano base 2016. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em: julho 2018.

BIASI, C. A. F., MARIANI, L. F., PICINATTO, A. G. E ZANK, J. C. C. **Energias renováveis na área rural da região sul do Brasil** – Foz do Iguaçu, 2018.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos** nº 12.305, de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

CABRAL, R. C. **Aproveitamento do biogás em aterros sanitários:** especificações construtivas beneficiando aspectos ambientais e energéticos. São Paulo, 2009.138p.

CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro: Campus, 2013.

CANDIANI, Giovano; MOREIRA, João Manoel Losada. Avaliação dos parâmetros cinéticos da geração de metano em uma célula experimental de resíduos sólidos. **Revista Engenharia Sanitária**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p.459-470, jul. 2018. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v23n3/1809-4457-esa-23-03-459.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2018.

CARESANA, F., COMODI, G. P., PIERPAOLI, P. Energy production from landfill biogas: An italian case. **Biomass And Bioenergy**, Italy, v. 35, n. 10, p.4331-4339, out. 2011. Disponível em: <http://www.academia.edu/10139382/Energy_production_from_landfill_biogas_An_italian_case>. Acesso em: 01 ago. 2018

CÂMERA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE. **Fontes**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos>. Acesso em: 01 ago. 2018.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Softwares**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/softwares/>>. Acesso em: 01 ago. 2018.

COELHO, S. T., VELÁSQUEZ, S. M. S. G, MARTINS, O. S. e ABREU, F. C. A conversão da fonte renovável biogás em energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 5., 2006, Brasília. **Congresso Brasileiro**. Brasília: Cbpe, 2006. p. 1 - 5. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228452829_A_conversao_da_fonte_renovavel_biotecnologia_em_energia>. Acesso em: 01 jul. 2018.

COELHO, Suan Teixeira. **Biogás de aterro para geração de eletricidade e iluminação**. São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia / Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Suan_Coelho.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2018.

COELHO, S. T., GARCILASSO, V. P., FERRAZ JUNIOR, A. D. N., SANTOS, M. M. e JOPPERT, C. L. **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo, IEE-USP, 2018.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Lixo municipal**: Manual do Gerenciamento Integrado. 4. ed. São Paulo: CEMPRE, 2018. Disponível em: <http://cempre.org.br/upload/Lixo_Municipal_2018.pdf>. Acesso em: 17 set. 2018.

COSTA, S. **A utilização energética do biogás produzido em aterros sanitários**. SIPE. V.3. Araguaia, 2015.

COUTINHO, M. O. **Perspectivas Energéticas Brasileiras de 2005 a 2030**. UFSC. Florianópolis, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **NT-019/2018-r0**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>> Acesso em agosto de 2018.

FELICORI, T.C. Identificação de áreas para aterros sanitários na Zona da Mata, MG. **Revista Eng. Sanitária e ambiental** v.21 n.3 p. 547-560. Viçosa, 2016.

FERNANDES, J. G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário**. UFMG. Belo Horizonte, 2009.

FILHO, F. E. S. Estimativa do aproveitamento energético do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos no Brasil. IEE-USP. São Paulo 2013.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias Renováveis: Um futuro Renovável. **Revista USP**, n.72, p. 6-15, São Paulo, 2007.

GOMES, C. F. S. **Ordenação de alternativas de biomassa utilizando o apoio multicritério à decisão**. Niterói – RJ, 2011.

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe. **Manual para aproveitamento do biogás**. Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, v. 1 - aterros sanitários, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**: Relatório de Pesquisa. Brasília: Ipea, 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 01 set. 2018.

JACOBI, P. R. e BESEN, G. R. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo**: desafios da sustentabilidade. Estudos avançados vol.25 no.71. São Paulo, 2011.

JENNE, C.A. e CATTEL, R.K. **Structural change and energy efficiency in industry**. Energy Economics. Elsevier, Vol. 5.2, pp. 114-123. Reino Unido, 1983.

KROPSCH, G. **Seminário da ABIogás discute a Nova Geração do Biogás**. 2018. Disponível em: < <https://www.abiogas.org.br/seminario-da-abbiogas-discute-a-nova>>. Acesso em setembro de 2018.

LOUREANO, G. **Eficiência Energética no uso de vapor**: um estudo de caso no aterro sanitário de Canhanduba. Itajaí, 2014

LIMA, A. **Análise da recuperação energética do biogás de aterros sanitários**. São Paulo. 2017

LINO, F. A. M. **Proposta de aproveitamento do potencial energético de resíduo sólido urbano e do esgoto doméstico com minimização de impactos ambientais**. UEC. Campinas, 2014.

OSEPEENSE Okazaki, H. **Vantagens e aplicações da cogeração a gás natural versus biomassa bagaço de cana**. São Paulo, 2015. 84 p.

PAES, V. A. P. Avaliação do aproveitamento energético do biogás produzido em um sistema piloto de digestão anaeróbia de lodo. Florianópolis, 2013. 79 p.

PECORA, V. Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do biogás de Tratamento de Esgotos Residenciais da USP: estudo de caso. IEE-USP. São Paulo, 2006.

PECORA, V. Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: Estudo de caso em São Paulo. USP. São Paulo, 2010.

PIÑAS, J. A. V. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil. **Revista brasileira Est. Pop.**, v.33, p.175-188, Rio de Janeiro, 2016.

RIBEIRO, Rafaela. Política de Resíduos Sólidos apresenta resultados em 4 anos. 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/10272-pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADuos-s%C3%B3lidos-apresenta-resultados-em-4-anos>>. Acesso em: 01 jul. 2018.

ROMO, B. Estudo de viabilidade técnico-econômica de cogeração e eficiência energética aplicada ao processo de fabricação de mangueiras multiusos. São Paulo, 2015.

SANTOS, I. Uma avaliação energética, econômica e ambiental das opções de aproveitamento energético do biogás de um aterro sanitário no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Rio de Janeiro, 2015

SILVA, T. N.; CAMPOS, L. M. S. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro sanitário. **Revista Eng. Sanitária e ambiental**. Vol.13 - Nº 1, São Paulo, 2008.

SIMÕES MOREIRA, José Roberto. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética.** Rio de Janeiro: Ltc, 2017.

VERKUIJL, Cleo. **Aligning fossil fuel production with the Paris Agreement.** Seattle: Stockholm Environment Institute, 2018.