

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA – EEL/USP

CAIO LIMA DE MORAIS

**Comparação da viabilidade econômica da disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários e tratamento por biodigestores anaeróbios**

LORENA – SP

2020

CAIO LIMA DE MORAIS

**Comparaçāo da viabilidade econômica da disposiçāo de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários e tratamento por biodigestores anaeróbios**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
na Escola de Engenharia de Lorena EEL-USP  
como requisito obrigatório para a conclusão do  
curso de Engenharia de Química

Orientador: Prof. Dr. Herlandí de Souza  
Andrade

Lorena - SP

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

de Moraes, Caio Lima  
Comparação da viabilidade econômica da disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários e tratamento por biodigestores anaeróbios / Caio Lima de Moraes; orientador Herlandí de Souza Andrade. - Lorena, 2020.  
67 p.

Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia Química - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2020

1. Biodigestores anaeróbios. 2. biogás. 3. Recuperação energética. 4. Tratamento de resíduos. 5. Viabilidade econômica. I. Título. II. Andrade, Herlandí de Souza, orient.

” Um homem não pode fazer o certo numa área da vida, enquanto está ocupado em fazer o errado em outra. A vida é um todo indivisível.”

Mahatma Gandhi

## AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos devem se iniciar com Deus. Esse do qual me aproximei ainda mais durante o período em que escrevia este trabalho e ao qual devo agradecer a minha vida e pelas minhas habilidades mentais que me permitiram realizar este trabalho. Também agradeço aos guias, que a serviço de Deus operam suas vontades em minha vida.

Outro agradecimento que eu devo fazer é a minha família, principalmente pai e mãe, o senhor Diderot e a dona Lourdes. Esses que além de terem me criado e dado condições para que eu estivesse preparado para ingressar e cursar uma faculdade. E que, além disso, são inspiração de ser humano e excelentes profissionais, em seus respectivos serviços.

Pai e mãe foram fundamentais, mas também possuo uma grande família que me apoiou, cuidou, ajudou e esteve sempre ao meu lado em todos os momentos. Vale destacar minha irmã Naia, meu irmão Fabrício, minha madrinha Lúcia, meu falecido padrinho Cleone, minha avó Iolanda e todos os tios que sempre estiveram próximos e dispostos a ajudar em qualquer momento.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos de república, a família Mansão Babilônia. Que me acolheram e me proporcionaram anos incríveis durante o período em que morei em Lorena. Me ajudaram a crescer, amadurecer e a me divertir. Que mesmo em momentos ruins me apresentavam os pontos positivos e como aproveitá-los.

Também agradeço a todos os colegas de faculdade, o time de futcampo e futsal, de 2014 a 2018. A equipe do Diretório Acadêmico, de 2015 a 2017. E a todos os meus colegas de faculdade.

Por fim, agradeço a todos os professores e funcionários da EEL, que sempre me trataram com muita educação e profissionalismo. Professores estes que ficarão marcados em minha vida pelos ensinamentos técnicos e de vida, principalmente no modo que tratavam os alunos, com foco no aprendizado.

## RESUMO

O seguinte trabalho consiste em uma análise econômica entre diferentes tecnologias para o tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) com biodigestão anaeróbia comparados com a disposição sobre o solo que ocorre em aterros em São Paulo. O aterro em questão recolhe e deposita sobre o solo cerca de 7000 toneladas diárias de RSU. Considerando a média brasileira, 51,4% destes resíduos são matérias orgânicas que podem ser tratadas por biogestores anaeróbios, o qual possibilita a recuperação energética e diminuição de seu volume final. O Brasil, a partir de 2010, com a Política Nacional do Resíduos Sólidos, definiu que o manejo do RSU deve ter como prioridade, nessa ordem, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e, apenas depois, a disposição final. Por tanto o estudo visa esclarecer se é viável economicamente o investimento em tecnologias mais maduras de biodigestão anaeróbia ao invés de aterros sanitários. O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade econômica do uso de biogestores como alternativa ao tratamento de resíduo doméstico. A pesquisa se baseará num estudo de caso em um aterro sanitário localizado na cidade de São Paulo e em dados sobre as tecnologias Valorga, Bekon e Kompogás obtidos a partir da literatura. São apresentados os custos para implantação, manutenção e operação de cada uma das técnicas, bem como a possibilidade de recuperação energética a partir do biogás. Foi calculado qual a taxa a ser paga para o recebimento dos resíduos que torne o valor presente líquido (VPL) de cada investimento zero, ou seja, tornando-o viável. Para o sistema composto de aterro sanitário com recuperação energética do biogás foi obtido uma taxa de R\$47,85 enquanto para o sistema aterro sanitário e biodigestor a taxa que torna o projeto viável é R\$78,28. Esse valor em números absolutos é R\$ 94.540,53 por dia. Também foi avaliado diferentes valores de fração de metano no biogás, representando uma otimização do processo. O valor de recebimento de resíduo encontrado para a fração de metano igual 75% foi R\$ 73,56, sendo ainda um valor elevado. Por tanto é importante para o desenvolvimento de tecnologias de biogestores no Brasil que estas diminuam seus custos de implantação e operação ou que sejam oferecidos benefícios em redução de impostos e financiamentos.

**Palavras-Chave:** Biogestores Anaeróbios, Resíduos Sólidos Urbanos, Viabilidade Econômica, Aterro Sanitário, Recuperação energética, Biogás, Tratamento de resíduos;

## **ABSTRACT**

The present work will be an economic analysis between different patents for the treatment of Municipal Waste (MW) with anaerobic digestion compared to the disposed of in landfills in São Paulo. The landfill in question collected and deposited about 7000 tonnes of Municipal Waste daily on the ground. If we consider the Brazilian average, 51.4% of this waste is organic matter that can be treated by anaerobic digestion, which can recovery energy and decrease in its final volume. From 2010, Brazil, with the National Solid Waste Policy, defined that the management of MW should have as a priority, in that order, the reduction, reuse, recycling, treatment and only after the final disposal. Therefore, the study aims to clarify whether it is economically viable to invest in more mature technologies of anaerobic digestion instead of landfills. The research will be based on a case study of a landfill located in the city of São Paulo and on data on the technologies Valorga, Bekon and Kompogás obtained from the literature. The costs for the implementation, maintenance and operation of each of the techniques will be presented, as well as the possibility of energy recovery from biogas. It was calculated the fee to be paid for the receipt of waste that turned the NPV of each investment equal to zero, accordingly making it viable. For the landfill system composed with biogas energy recovery, we obtained a fee of R\$ 47.85 while for the landfill and biodigester system the fee that makes the project viable is R\$ 78.28. This represent, in absolute numbers, R\$ 94.540,53 per day. Different values of methane fraction in the biogas were also evaluated, representing an optimization of the process. The waste receipt value found for the methane fraction equal to 75% was R\$ 73.56, which still a large value. Therefore, it is important for biodigester technologies market in Brazil the devolopement of tecnologies that reduce costs of implementation and operation or governamental benefits in reducing taxes and financing are offered.

**Key words:** Anaerobic Digestor, Municipal Waste, Economic feasibility, landfill, energy recovery, biogas, waste treatment;

## **Lista de figuras**

Figura 1 - Exemplo Diagrama Valor Presente Líquido .....	18
Figura 2 – Perfis dos valores presentes líquidos para os projetos S e L para diferentes níveis de custo capital.....	20
Figura 3 - Exemplo esquematizado do lixão .....	25
Figura 4 - Exemplo esquematizado de um aterro controlado .....	27
Figura 5 - Exemplo esquematizado de aterro sanitário.....	28
Figura 6 - Modelo esquemático reator Valorga .....	35
Figura 7 - Modelo esquemático do reator Kompogás.....	36
Figura 8 - Foto de plano de tuneis de metanização.....	37
Figura 9 - Modelo esquemático reator de túneis de metanização.....	37
Figura 10 - Comparando os dados de resíduos produzidos com a projeção populacional na região metropolitana de São Paulo .....	47
Figura 11 - Potencial de produção de biogás, metano e gás carbônico .....	52
Figura 12 - Fluxo de caixa aterro sanitário com recuperação energética .....	55
Figura 13 - Fluxo de caixa de um sistema aterro sanitário e biodigestor anaeróbio.....	57

## **Lista de Quadros**

Quadro 1 - Comparaçao entre técnicas de disposi�o final e tratamento de RSU.....	30
Quadro 2 - Compara�o entre pontos fortes e fracos das tecnologias Valorga, Kompogás e Túneis de metaniza�o .....	38
Quadro 3 - Taxa de recebimento de resíduo para igualar VPL dos projetos a zero .....	58

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição do resíduo sólido urbano no Brasil .....	23
Tabela 2 - Destinação final dos RSU no Brasil .....	24
Tabela 3 - Fração de carbono orgânico degradável por tipo de resíduo .....	44
Tabela 4 - Resíduos coletados no agrupamento de subprefeituras sudeste em São Paulo ..	46
Tabela 5 -Estimativa de composição gravimétrica dos resíduos do agrupamento sudeste .	47
Tabela 6 - Quantidade e proporção total de resíduos a serem destinados por dia ao aterro sanitário desconsiderando os orgânicos enviados a compostagem.....	48
Tabela 7 - Custos das etapas de viabilização de um aterro de grande porte (2000t/dia) ....	49
Tabela 8 - Distribuição percentual dos custos das etapas de viabilização de um aterro sanitário.....	51
Tabela 9 - Compilado de estudos de caso sobre custos da implantação da captação de biogás e geração de energia.....	53
Tabela 10 - Estimativa de custos de implantação e manutenção de um sistema de captação de biogás e geração de energia num aterro sanitário .....	53
Tabela 11 - Custos para implantação de dois aterros sanitários com capacidade total de 4000t/dia .....	54
Tabela 12 - Índices de avaliação de viabilidade econômica aterro sanitário com recuperação energética .....	55
Tabela 13 - Resíduos destinados no aterro sanitário para sistema combinado com biodigestor anaeróbio.....	56
Tabela 14 - Custos de implantação e operação e receita estimada para biodigestores com base na tecnologia DRANCO e KOMPOGAS.....	56
Tabela 15 - Custos de implantação e operação e receita estimada de um biodigestor anaeróbio para o agrupamento sudeste de São Paulo .....	57
Tabela 16 - Índices de avaliação de viabilidade econômica aterro sanitário com biodigestor .....	58
Tabela 17 - Valores de VPL do projeto de aterro com biodigestor com variação da proporção de metano no biogás .....	59

# Sumário

1.	Introdução.....	10
1.1	Justificativa .....	13
1.2	Objetivos .....	14
2.	Revisão Bibliográfica .....	15
2.1	Viabilidade econômica.....	15
2.1.1	Payback simples e descontado .....	16
2.1.2	Valor Presente Líquido (VPL) .....	18
2.1.3	Taxa interna de retorno (TIR) .....	19
2.1.4	Relação entre VPL, TIR e payback descontado .....	20
2.2	Resíduos Sólidos Urbanos.....	21
2.3	Manejo do RSU.....	24
2.4	Biodigestores.....	31
2.4.1	Valorga.....	34
2.4.2	Kompogás .....	35
2.4.3	Tuneis de Metanização .....	36
3.	Método.....	39
3.1	Definição do objeto de estudo.....	39
3.2	Coleta de dados .....	41
3.3	Seleção e análise de dados .....	42
3.3.1	Métodos de cálculo .....	43
3.4	Captação de biogás e geração de energia .....	45
4.	Resultados e Discussão.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.1	Caracterização dos RSU.....	46
4.2	Viabilidade econômica para aterro sanitário.....	48
4.2.1	Aterro Sanitário.....	49
4.2.2	Potencial energético do aterro.....	51

4.2.3	Projeto de captura de biogás e geração de energia .....	52
4.3	Análise econômica aterro com geração de energia .....	54
4.4	Combinação biodigestores e aterro sanitário .....	55
4.5	Comparação de cenários .....	58
4.5.1	Cenários com variação do valor de recebimento de RSU .....	58
4.5.2	Cenário variando a proporção de metano no biogás do biodigestor.....	59
5.	Conclusão .....	59
6.	Referências .....	60

## 1. Introdução

É de conhecimento comum que o despejo do lixo que produzimos geram problemas ao cotidiano. Em nossas casas, quando demoramos para retirar o lixo começam mal odores e surgem larvas e insetos, causando desconforto aos moradores. Esse lixo que é retirado de nossas casas precisa de uma gestão adequada, para que os problemas vistos nas casas não sejam amplificados, quando se aumenta a escala para o montante de lixo gerado por um bairro ou uma cidade.

Conhecido popularmente como lixo, os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), por tanto, precisam ser manejados de forma adequada. O governo brasileiro classifica como adequado o descarte de lixo em aterros sanitários e inadequado o despejo de lixo em aterros controlados e lixão (ABRELPE, 2018).

É responsabilidade da gestão municipal realizar o manejo dos RSUs, norma instituída pela Política Nacional De Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010). Porém quanto maior o volume de RSU produzido mais complicada é a gestão pois é necessário encontrar locais adequados com capacidade para suportar a demanda de resíduos. E a gestão dos resíduos se tornou um grande problema urbano devido as movimentações demográficas, como o êxodo rural no século XX, que aumentou o volume de pessoas e, consequentemente, o volume de RSU nas cidades. Em 1940 o Brasil tinha 31,2% da população vivendo em áreas urbanas e nas décadas seguintes, devido a migração para a cidade, cresceu sistematicamente a urbanização no Brasil (BRITO; HORTA; AMARAL, 2016). Um levantamento mostrou que no ano 2000 a porcentagem de brasileiros vivendo em áreas urbanas já era de 80,1% (BRITO; HORTA; AMARAL, 2016)

A infraestrutura das cidades não acompanhou o crescimento populacional. Os locais adequados para despejo de RSU, segundo a ABRELPE (2018), suportam apenas 60% dos resíduos coletados. Além do que quase 10% dos RSU não são nem ao menos coletados.

A manejo adequado de resíduos é de suma importância para os cidadãos e meio ambiente pois as áreas que recebem grandes quantidades de RSU e não possuem infraestrutura suficiente e adequada para tal atividade, tem como consequência a poluição do ar, das águas e do solo, além da proliferação de vetores (SISINNO; MOREIRA, 1996). Além disso muitas pessoas, principalmente de baixo poder econômico, aglomeram-se nos entornos dos lixões

se expondo a riscos de saúde. A destinação final mais adequada são os aterros sanitários em comparação com os aterros controlados e lixões que possuem menos controle ambiental sobre o resíduo que recebem (MMA, 2012). A disposição em aterro sanitário é a técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo que não acarretam danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando impactos ambientais (MMA, 2012). Evitando assim a exposição de humanos e animais à contaminação, que pode estar dispersa pelo solo por lixiviação e infiltração do chorume e também pelo ar (GOUVEIA, 2012). A contaminação em aterros e lixões pode ocorrer durante o período de despejo do lixo como também após o encerramento das atividades pois a atividade metabólica dos microrganismos não cessa, continuando a geração de chorume (GOUVEIA, 2012).

A população que vive no entorno dessas regiões contaminadas com resíduos sofre com possibilidade de contato com altos níveis metais pesados e compostos orgânico. Essa exposição aumenta o risco de diversos tipos de câncer, anomalias congênitas, baixo peso ao nascer, abortos e mortes neonatais (GOUVEIA, 2012).

Os problemas referentes ao manejo de resíduos, e especialmente os resíduos domésticos, fez com que pesquisas sobre o tema fossem desenvolvidas e outros modelos de manejo também são utilizados hoje em dia. Esses outros modelos focam não apenas no despejo, mas no tratamento dos resíduos como fonte para energia ou como fonte de compostagem (PROBIOGÁS, 2015).

O resíduo doméstico pode ser uma ótima fonte para esses tratamentos pois sua composição é majoritariamente de matéria orgânica. Apesar da composição dos RSU variar de acordo com as características regionais da população produtora, os níveis de matéria orgânica costumam ser elevados e compõem, em média, 51,4% dos RSU gerados no Brasil (MMA, 2012). A matéria orgânica presente nos resíduos se decompõe naturalmente e esse processo resulta em alguns produtos gasosos, os quais podemos chamar de biogás (HENRIQUES, 2004).

O biogás proveniente da decomposição de resíduos orgânicos possui alta capacidade energética devido a esse gás ser rico em metano. A concentração de metano na composição do biogás depende de quais foram os substratos decompostos, em média a composição do biogás produzido a partir da biodegradação de resíduos domésticos é 55% metano e 45% gás carbônico (HENRIQUES, 2004).

O metano é altamente inflamável e por isso a coleta desse gás, que naturalmente é liberado pela decomposição de matéria orgânica, pode ser uma ótima alternativa para utilizá-lo como fonte de energia. Além disso a liberação do gás metano na atmosfera é prejudicial ao meio ambiente por possuir alto potencial de aquecimento global, sendo 21 vezes mais potente que o CO<sub>2</sub> para o efeito estufa (ALVES, 2008).

No Brasil tenta-se incentivar a utilização de tratamentos de resíduos antes da disposição em locais adequados. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010) impõe ordem de prioridade em relação aos manejos dos resíduos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Entre os tratamentos possíveis incluem-se os que geram energia, como incineração e biodigestão anaeróbio, mas a compostagem também é considerada tratamento de RSU (BRASIL, 2010).

A geração de energia elétrica no Brasil está condicionada principalmente às hidroelétricas e, consequentemente, depende do regime pluvial. Isso implica no risco no fornecimento devido a mudanças climáticas. Em 2014 e 2015 o estado de São Paulo passou por momentos de seca que afetaram o potencial energético das hidroelétricas e ter uma matriz diversificada amenizaria os riscos provindos de crises hídricas que afetam as hidroelétricas. Reservatórios hidrelétricos do estado estavam quase secos ao término do ano de 2014, e em 2015 a situação não melhorou. Devido a essa situação climática, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica do Brasil elevou as tarifas de energia elétrica em até 25% em 2015 (MARENKO et al., 2015).

Assim como as hidroelétricas, o gás de cozinha também está sujeito às condições externas, como a disponibilidade de reservas de gás. O preço do gás de cozinha (GLP), variou de R\$38,41 em jan/2010 para R\$69,11 em nov/2019 (SINDIGÁS, 2020). Como alternativa energética o Brasil utiliza a tecnologia de termo elétricas, as quais apresentam altos valores de operação e utilizam da queima de combustíveis fosseis. Nesse contexto é possível utilizar o tratamento de resíduos com recuperação energética para suportar comunidades com maiores dificuldades econômicas fornecendo energia elétrica ou energia térmica, como complemento as hidroelétricas e ao GLP.

Uma técnica de tratamento de resíduos que vem sendo difundida pelo mundo é o tratamento da parte orgânica de resíduos sólidos com biodigestores. Essa técnica tem a função de

acelerar a decomposição da matéria orgânica e realizar a recuperação do biogás e de compostos orgânicos (HENRIQUES, 2004). As tecnologias dos biodigestores envolvem o controle da composição do ar, da temperatura e agitação do substrato afim de otimizar a ação das bactérias que realizam a oxidação dos compostos orgânicos na decomposição destes.

Biodigestores já são utilizados, se diferenciando dependendo do substrato e das condições climáticas do seu local de instalação. Hoje em dia temos biodigestores totalmente automatizados, porém essa tecnologia já utilizada desde o século passado. Sendo o primeiro biodigestor datado de 1908, instalado na Índia (HENRIQUES, 2004). Entretanto, no Brasil, mesmo sendo um país com alto índice de compostos orgânicos nos resíduos essa técnica ainda é pouco desenvolvida. Temos apenas alguns casos de utilização de biodigestores. Principalmente na área rural para tratar resíduos da criação de animais (HENRIQUES, 2004).

O desenvolvimento dessas tecnologias para a aplicação no tratamento também de resíduos urbanos seria de extrema vantagem social, econômica e ambiental para comunidades e cidades. O objetivo da pesquisa a seguir é justamente identificar quais são os ganhos desse modelo em relação ao modelo atual de gestão de resíduos sólidos urbanos.

### 1.1 Justificativa

A crescente urbanização e a dificuldade na gestão de resíduos sólidos urbanos são um grande problema para a sustentabilidade ambiental, desenvolvimento econômico e da qualidade de vida nas cidades brasileiras.

Já existem leis como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010) que visa fomentar a substituição de lixões e aterros controlados por outros meios de tratamento de resíduos sólidos. Fica como responsabilidade de municípios e estados montarem planos de gestão para a redução do impacto ambiental na gestão de resíduos. Além disso, quando iniciativas com foco ambiental aliadas ao desenvolvimento social demonstrarem-se bem-sucedidas temos um excelente modelo para o pleno desenvolvimento econômico e sustentável das cidades do futuro.

Comunidades periféricas ou carentes são afetadas pela dificuldade na coleta de lixo e pela variabilidade de preços de gás, da energia elétrica e de empregos formais e informais.

Cidades sofrem com problemas econômicos na administração pública e com isso, dificuldade em atender ao PNRS.

Dessa maneira o trabalho buscará comparar o retorno econômico do modelo atual de destinação (aterros sanitários) de RSU com o modelo de tratamento, o qual é mais sustentável ambientalmente. Assim, órgãos públicos e empresas/empresários terão maior visibilidade das oportunidades ao ingressar nesse mercado e, com compreensão qualitativa dos impactos na sociedade ter uma decisão mais adequada sobre qual investimento realizar.

Com isso, as cidades poderão implantar sistemas que realizem o manejo de maneira adequada e com responsabilidade econômica. Isso leva à mais qualidade de vida e ao uso responsável do dinheiro dos pagadores de imposto.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade econômica do uso de biodigestores como alternativa ao tratamento de resíduo sólido urbano.

Os objetivos específicos são definidos como:

- Identificar o custo da implantação e manutenção de biodigestores em grande escala;
- Levantar o custo operacional do sistema tradicional de tratamento de resíduos domésticos; e,
- Comparar os custos e despesas entre o tratamento tradicional e tratamento com biodigestor.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Viabilidade econômica

Investigar a viabilidade econômico-financeira é o mesmo que prever e analisar as possibilidades de evolução econômica de um produto ou serviços agregados a um projeto (RODRIGUES; ROZENFELD, 2015). Esses projetos podem ter como objetivo uma melhoria num processo interno ou então o desenvolvimento de um novo empreendimento. Quando esses projetos requerem investimentos, podemos chamá-lo de Projeto de Investimento (PI), segundo Hazer (2005 apud MARQUES, 2019).

Ao realizar um projeto de investimento espera-se que o valor seja retornado com benefícios econômicos num período futuro determinado pela empresa, conforme explica Rebellato (2004, apud RODRIGUES; ROZENFELD, 2015)

Com o intuito de auxiliar na previsão do desempenho financeiro de cada investimento e, consequentemente, melhorar a tomada de decisão de se investir ou não em determinado projeto, é necessário compreender técnicas de avaliação de investimento que estimam o desempenho financeiro do projeto, a fim de evitar que um empreendimento seja desativado ou utilizado abaixo de sua capacidade máxima (MARQUES, 2019).

Existem diversos métodos e técnicas de análise financeira e modelos de tomadas de decisão. Para PI é considerado de mais valia a utilização de métodos baseados em fluxo de caixa, ou seja, as entradas e saídas de recursos financeiros no período planejado (MARQUES, 2019).

Para casos em que existam duas ou mais possibilidades de investimentos que sejam mutuamente excludentes a técnica de análise econômica mais utilizada pelas grandes empresas é o método convencional, por ser mais simples. Porém também existem os métodos de opções reais e métodos não convencionais (SHINODA, 2008).

Entretanto apesar de considerado simples esse método consegue calcular o valor financeiro gerado pelo empreendimento num determinado período. Mas em casos com grandes incertezas ele não é o mais aconselhado pois esse método não emprega técnicas para prever aspectos qualitativos do investimento e nem os riscos atrelados (SHINODA, 2008).

O método convencional, segundo MARQUES (2019), mapeia o risco a partir da taxa mínima de atratividade (TMA), porém essa é uma métrica que estima possíveis mudanças no

decorrer do projeto como expansões, retrações ou abandonos do projeto. Já o método de opções reais considera essas possíveis alterações através de um Valor Presente Líquido (VPL) flexível que, segundo Damoradan (2002 apud SHINODA, 2008), pode alterar conforme alteram os fluxos de caixa e as taxas de juros. Já os adeptos do método não convencional criticam ambos os métodos, o convencional e opções reais, pois estes desconsideram os ganhos qualitativos e estratégicos atrelados num determinado projeto (SHINODA, 2008).

A base de cálculo da análise através do método convencional consiste em encontrar os indicadores de *payback* simples/descontado, VPL, taxa interna de retorno simples (TIR) e TMA (MARQUES, 2019; RODRIGUES; ROZENFELD, 2015; SHINODA, 2008).

No caso do estudo a seguir, procuraremos fazer apenas a análise financeira, desconsiderando os aspectos estratégicos e possíveis mudanças já que a indústria de tratamento de resíduos é fortemente regulada por leis. Por tanto o método convencional já satisfaz. Abaixo iremos explorar mais os indicadores de análise financeira utilizados neste método.

### 2.1.1 *Payback* simples e descontado

O *Payback*, segundo Rebelatto (2004, apud RODRIGUES; ROZENFELD, 2015) é o indicador de tempo no qual as despesas com os projetos se igualam aos reembolsos recebidos, mostrando o prazo despendido para que haja restituição do investimento.

Para decisão de qual o melhor projeto para realizar o investimento o gestor deve comparar o *payback* com o período máximo aceitável de recuperação do capital despendido.

Segundo Chawell Hatfield et al (1997 apud SHINODA, 2008), 65% das empresas consideram *payback* curto como um fator fundamental para a decisão de aceitar um projeto.

Apesar de muito utilizado o *payback* é criticado pelos estudiosos por não levar em conta o dinheiro no tempo e não considerar os fluxos de caixa pós o tempo de retorno do investimento (SHINODA, 2008).

Por isso é defendido o uso do *payback* descontado em comparação ao *payback* simples. O *payback* descontado considera o dinheiro no tempo. Mas esse indicador ainda não considera os fluxos de caixa após o tempo de retorno, por isso é aconselhável utilizá-lo como um indicador complementar ao uso do VPL e da TIR, taxa de retorno do investimento ao longo do tempo (SHINODA, 2008).

Segundo Samanez (2007 apud CALLEFI et al., 2018)) para cálculo do *payback* realiza-se as seguintes equações:

*Payback simples* é o tempo decorrido para que o investimento se iguale as entradas de fluxos de caixa, como demonstrado na equação 1.

$$I = \sum_{j=0}^T FC_j \quad (1)$$

Na qual  $FC$  = fluxo de caixa,  $T$  = tempo de retorno,  $I$  = Investimento inicial e  $j$  = período de tempo

*Payback descontado* é o tempo decorrido para que o investimento se iguale a entrada de fluxos de caixa, porém descontado o custo capital no tempo, demonstrado na equação 2.

$$I = \sum_{j=0}^T \frac{FC_j}{(1-k)^j} \quad (2)$$

Na qual  $FC$  = fluxo de caixa,  $T$  = tempo de retorno,  $I$  = Investimento inicial e  $k$  = custo capital.

O *payback* representa as chances do investimento não se recuperar, logo ele precisa ser menor que a vida útil do projeto. Ainda assim, quanto menor o valor obtido, melhores as condições para o investimento. Logo, ao comparar dois ou mais projetos de investimento, através do indicador de *payback* simples ou descontado, o projeto que apresentar menor valor deve ser escolhido preferencialmente (LIMA apud MARQUES, 2019).

### 2.1.2 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A TMA é composta pela taxa de desconto com pouco ou quase livre de risco (MARQUES, 2019). É o parâmetro utilizado como o mínimo a ser alcançado para que o projeto seja viável financeiramente. (RODRIGUES; ROZENFELD, 2015). A taxa é definida de forma arbitrária porém deve considerar o custo oportunidade, a liquidez do investimento e a expectativa de risco do projeto (RODRIGUES, 2018)

A TMA varia de acordo com os investidores e projetos que estão sendo avaliados, ou então estimada a partir das taxas de juros aplicadas, para o cálculo do custo oportunidade. No caso do Brasil podemos usar a Taxa Básica Financeira (TBF), a Taxa Referencial (TF), a Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP) e o Sistema Especial de Liquidação e Custódia (Selic) (VISENTIN, 2019).

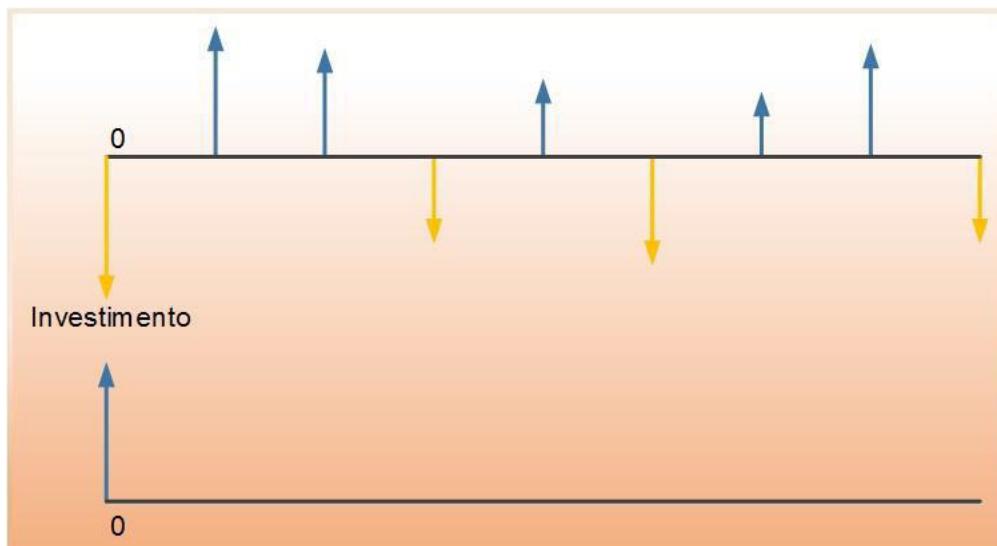
Não há uma fórmula específica para realizar os cálculos da TMA, por tanto o cálculo deve ser fundamentado em indicadores econômicos, ambientais, sociais, entre outros (VISENTIN, 2019).

### 2.1.3 Valor Presente Líquido (VPL)

A técnica de cálculo de VPL baseia-se no em trazer para valores atuais as entradas e saídas de capitais futuros descontados de juros. Por tanto ele refletirá as riquezas financeiras do investimento calculada a partir da soma das entradas de caixa descontadas das saídas de caixa, trazidas para valor presente a uma determinada taxa, a qual podemos chamar de taxa de desconto(RODRIGUES; ROZENFELD, 2015).

Exemplo de modelo de VPL está representado na Figura 1, no primeiro diagrama estão representadas as entradas e saídas e no segundo diagrama está representado o VPL, no caso como positivo.

**Figura 1 - Exemplo Diagrama Valor Presente Líquido**



Fonte: (RODRIGUÊS, 2015)

A partir desse cálculo é possível determinar a viabilidade do investimento e analisar, entre uma gama de projetos, qual deve ser priorizado para execução (RODRIGUES; ROZENFELD, 2015). Quanto maior o valor de VPL maior a rentabilidade econômica estimada num determinado período.

Para calcular VPL utiliza-se a Equação 3.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - FC_0 \quad (3)$$

Na qual  $FC_0$  representa o fluxo de caixa no momento inicial (investimento, empréstimo ou financiamento),  $FC_j$  são fluxos de caixas previstos em intervalos de tempo no decorrer do projeto,  $i$  = taxa de desconto e  $n$  = período de tempo.

Entretanto existe um estímulo dos estudiosos de finanças para preferir projetos pelo VPL pois esse demonstra com consistência os investimentos que produzam maior riqueza aos investidores, segundo Chadwell-Hatfield et al.(1997 apud SHINODA, 2008). Porém o indicador VPL em projetos com investimento inicial diferentes não é comparável, e esse é um ponto negativo em sua utilização. Para isso é aconselhável usar índice de lucratividade (SHINODA, 2008).

Alguns autores classificam que para realizar o cálculo VPL de um projeto considera-se taxa de desconto ( $i$ ) como a TMA. Assim para considerar um investimento viável a VPL, com a taxa de desconto sendo a TMA, deve apresentar valores acima de 0. Caso apresente valor igual ou abaixo de 0 não é considerado um investimento aconselhável do ponto de vista financeiro (MARQUES, 2019).

#### *2.1.4 Taxa interna de retorno (TIR)*

A TIR é definida como a taxa de desconto calculada quando igualamos a VPL a zero. Ou seja, os valores de investimento no projeto se igualam as entradas de capital. A partir da TIR entendemos o retorno anual se as estimativas de entradas financeiras estiverem corretas após concluir o projeto, segundo Gitman (apud RODRIGUES; ROZENFELD, 2015)

Calcula-se a TIR da seguinte maneira, como expresso na equação 4.

$$FC_0 = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+TIR)^j} \quad (4)$$

Na qual,  $FC_0$  = Fluxo de caixa inicial (investimento, empréstimo ou financiamento),  $FC_j$  = fluxo de caixa previstos em cada período e  $n$  = período de tempo.

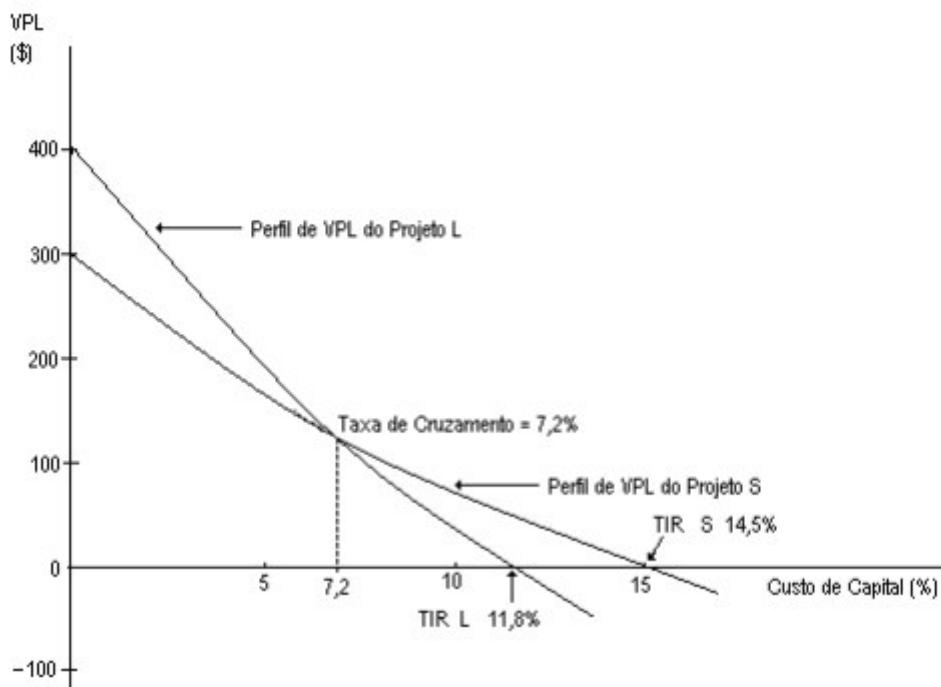
Ao avaliar um projeto a partir da TIR devem-se adotar os seguintes critérios: se TIR maior que TMA o projeto deve ser aceito; caso contrário, se TIR menor que TMA o projeto deve ser rejeitado. (RODRIGUES; ROZENFELD, 2015)

### 2.1.5 Relação entre VPL, TIR e *payback* descontado

A relação entre VPL, *payback* e TIR pode ser expressa pela equação 1. Quando o VPL for igual a zero, o número de fluxos de caixa é correspondente ao número de anos necessários para o pagamento do investimento, ou seja, o *payback*, e a taxa de juros se iguala a TIR (SHINODA, 2008).

Teóricos sugerem a preferência pelo uso do VPL em relação aos demais índices pois o VPL representa o real valor gerado para o investimento. No caso a seguir Brigham, Gapenski e Daves (1999 apud SHINODA, 2008) demonstram como o perfil de dois projetos se alteram e que a TIR pode ser um indicador que prejudique a decisão, conforme exposto na Figura 2.

**Figura 2 – Perfis dos valores presentes líquidos para os projetos S e L para diferentes níveis de custo capital**



Fonte: BRIGHAM, GAPENSKI e DAVES (1999 apud SHINODA, 2008)

Primeiramente observemos o ponto no qual as curvas se cruzam. Ele é chamado de taxa de cruzamento. A primeiro a conceituá-lo foi Fisher (1930 apud SHINODA, 2008), que definiu esse cruzamento como o ponto no qual as VPL do projeto são idênticas.

Observando a Figura 2, quando o custo capital é maior que 7,2% a VPL do projeto S é maior que VPL do projeto L. Enquanto se o custo capital for menor que 7,2% temos VPL do projeto L maior que a do projeto S. Nessa análise o custo capital está representando a TMA.

A TIR do projeto S é maior que a TIR do projeto L, então caso observássemos apenas este indicador poderíamos escolher o projeto com menor retorno financeiro.

## 2.2 Resíduos Sólidos Urbanos

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são caracterizados pela NBR 10004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004) como

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviável em face a melhor tecnologia disponível.

O conceito dos RSU é proposto de forma semelhante pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010): resíduos sólidos são os materiais ou substâncias, objetos ou bens descartados resultantes de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia.

Os RSU podem ser classificados em relação a sua origem. A PNRS caracteriza estes da seguinte maneira:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;

- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Ainda segundo a PNRs (BRASIL, 2010), os resíduos humanos oriundos de atividade domiciliares em residências urbanas e oriundos de serviços de limpeza urbana, como varrição e limpeza de vias públicas e logradouros e também resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços que não sejam perigosos, ou seja, não possuam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica.

A matéria que depois encerradas as alternativas tecnológicas para tratamento e recuperação por processos disponíveis e viáveis financeiramente e não possuam outro destino adequado ambientalmente a não ser a disposição final são chamadas de rejeito. Entretanto no Brasil os

RSU são despejados juntamente com os rejeitos em aterro sanitários, aterros controlados e lixões (DE ABREU, 2015)

Para compreender a demanda, temos dados que apontam que a quantidade média da produção de RSU brasileira é 216.629 toneladas por dia (ABRELPE, 2019). Porém em cada região ocorre uma variação da quantidades de resíduos produzidos e também de sua composição, decorrente sazonalidade, estilo de vida, parâmetros sociais e econômicos, hábitos nutricionais, além de regulamentações vinculadas ao tipo de resíduo e às possibilidades de recuperação dele (OZCAN et al., 2016).

Essa grande variação de composição dos RSU acarreta dificuldades em se caracterizar os resíduos e seu volume. Este varia entre regiões e ao longo do tempo devido a diferenças de estágios econômicos, sanitários, práticas culturais e políticas públicas que influenciem no reuso, reciclagem e pré tratamento dos resíduos (DE ABREU, 2015).

Em levantamento realizado pelo IBGE em 2010 e outros estudos (MMA, 2012). apontam que a composição do RSU no Brasil média, conforme mostra a Tabela 1.

**Tabela 1 - Composição do resíduo sólido urbano no Brasil**

Resíduo	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
Material reciclável	31,9	58.527,40
Matéria Orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>183.481,50</b>

Fonte: (ABRELPE, 2019)

A larga produção de resíduos sólidos no mundo demanda melhores tecnologias para a destinação final e tratamento dos resíduos, dessa forma poderemos evitar, segundo Giusti (2009 apud GOUVEIA, 2012), contaminações da água, dos solos e da atmosfera devido a presença de metais pesados, compostos orgânicos voláteis e pesticidas nos resíduos. Também pode ocorrer contaminação por degradação da matéria orgânica, a qual libera o líquido nomeado como chorume, que possui alta carga orgânica e pode contaminar solos e lençóis freáticos. Além disso ocorre a liberação de gases tóxicos (GOUVEIA, 2012).

Para se evitar as contaminações deve se tratar de forma adequada o RSU. No Brasil ainda temos muito a melhorar pois são tratados e destinados nos seguintes processos e proporções, apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Destinação final dos RSU no Brasil**

<b>Destino</b>	<b>Quantidade (t/d)</b>	<b>Proporção (%)</b>
Aterro sanitário	118.631	58,3
Aterro Controlado	45.830	19,4
Lixão	34.850	19,8
Unidade de reciclagem	2.592,00	1,4
Outras unidades	2.144,5	1,2
<b>Total</b>	<b>188.814,90</b>	<b>100</b>

Fonte: (ABRELPE, 2018)

### 2.3 Manejo do RSU

O despejo de RSU é amplamente realizado sobre o solo, em escala global. Está disposição pode ocorrer de forma adequada ou desordenada, como é visto em muitos lixões. Porém técnicas de manejo de RSU foram desenvolvidas para aproveitamento do espaço físico e minimizar os impactos ambientais causados pela disposição final de RSU (DE ABREU, 2015).

As principais formas de disposição são os lixões, aterros controlados e aterros sanitários, porém são em sua maioria construídas com falta de padronização e controle tonando-se propensas a contaminação ambiental como produto destas atividades (SCHETTINI, 2016).

Porém com a PNRS (2010), a primeira lei que estabeleceu a como deve ser realizado a disposição e o tratamento de RSU (SCHETTINI, 2016). As prioridades nas operações com os resíduos deve se atentar ao tratamento anteriormente da disposição final, esta fica prevista apenas para rejeitos inaproveitáveis (I&T; NRG, 2012). A PNRS (2010) deixa claro que as políticas públicas para a gestão dos resíduos devem seguir a seguinte ordem: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos

São consideradas técnicas de tratamento de resíduos os processos ou operações que transformem as características, composição ou propriedades deste, assim tornando-o menos nocivo à disposição final (GRIPP, 1998).

Como técnica de tratamentos as mais comuns são a incineração, a compostagem simples e acelerada e a biodigestão anaeróbia (I&T; NRG, 2012).

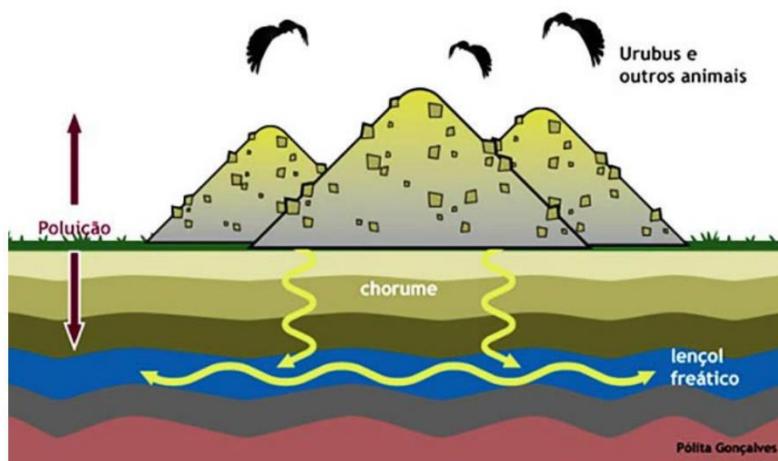
A seguir iremos abordas as técnicas de disposição e tratamento de RSU.

Lixão: Considerado o modo mais inadequado de disposição final de lixo. O RSU é depositado num ambiente sem nenhum cuidado ou tecnologia que vise poluição ambiental ou risco à saúde humana (MONTAGNA, 2013).

Também foi definida como a maneira mais simples e desordenada de descarga de resíduos sobre o solo, sem tomar os cuidados necessários com a saúde pública, controle da origem dos resíduos e contaminação do ambiente (DE ABREU, 2015).

Assim representa a maneira mais obsoleta de controle de resíduos, o amontoado de lixo a céu aberto é ótima fonte de contaminação ao de solos e águas subterrâneas, contribuindo para a disseminação de vetores nocivos à saúde humana e à poluição visual (SCHETTINI, 2016). A Figura 3 apresenta um esquema de lixão.

**Figura 3 - Exemplo esquematizado do lixão**



Fonte: ([HTTPS://WWW.INFOENEM.COM.BR/WP-CONTENT/UPLOADES/2015/10/LIXAO.PNG](https://www.infoenem.com.br/wp-content/uploads/2015/10/LIXAO.PNG), 2020)

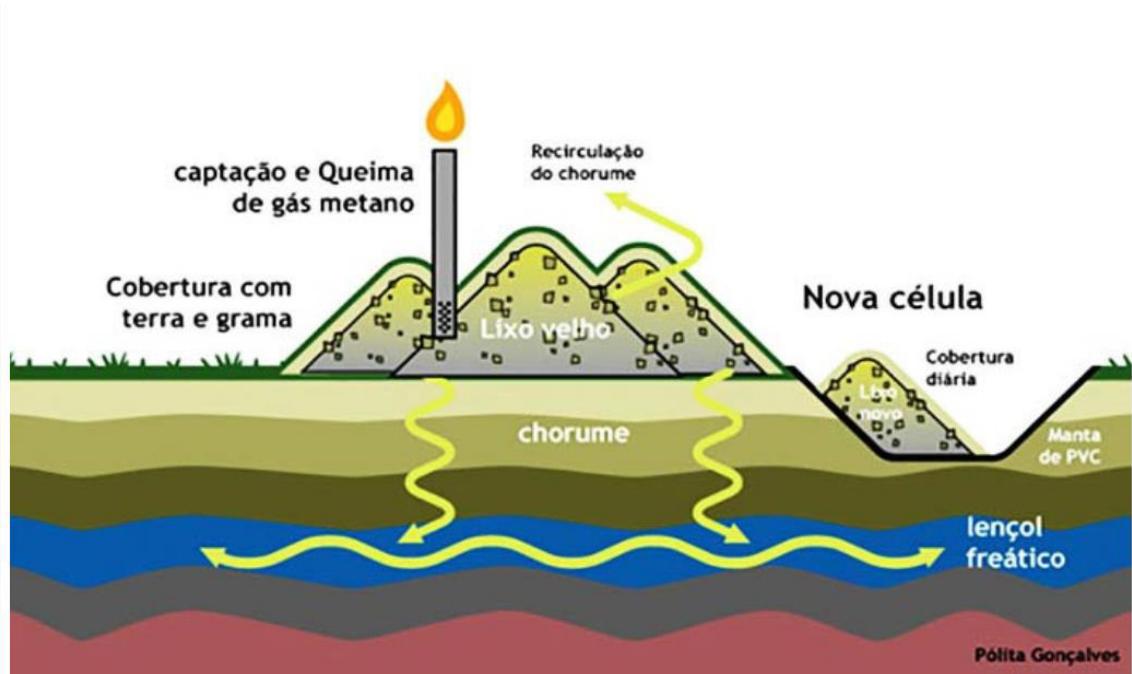
Os lixões que passaram a ter um controle sobre os resíduos nele despejados foram chamados de aterro controlado.

Aterro controlados são considerados o intermediário entre lixões e aterros sanitários, sendo considerada também forma inadequada de disposição de resíduos (SCHETTINI, 2016).

São locais de despejo de resíduos que recebem uma cobertura de inertes, como terra ou entulho, no fim de cada dia, porém esses locais não apresentam impermeabilização da base do solo e nem tecnologias de para tratar o chorume ou gases tóxicos (Reis., Fadigas., Carvalho apud MONTAGNA, 2013).

Isso faz com que os efeitos ao meio ambiente e à saúde da população sejam minimizados, porém DE ABREU (2015), reforça que a falta de impermeabilização e sistemas de dispersão de gases e chorume ainda são pontos a melhorar neste tipo de técnica. A Figura 4 apresenta um desenho esquematizado de como é a estrutura de um aterro controlado.

**Figura 4 - Exemplo esquematizado de um aterro controlado**



Fonte: (VIASOLO ENGENHARIA S.A., 2020)

A técnica de disposição que supri os problemas de impermeabilização e dispersão de fluidos contaminantes dos aterros controlados e lixões foi chamada de aterro sanitário

Aterros sanitários, segundo a normal ABNT NBR 8.419/1992 (ABNT, 1992), é a

“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permitível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.”

Este tipo de técnica de manejo possui estruturas de controle de origem do resíduo, cobertura dos resíduos com camadas de inertes, impermeabilização do fundo, sistema de drenagem e destinação adequada de efluentes líquidos e gasosos, entre outras medidas que visam minimizar os impactos a saúde humana e ao meio ambiente (DE ABREU, 2015).

Além disso para a construção de um aterro sanitário precisam ser atendidas diversas regras em relação a topografia, geomorfologia e tipos de solo, proximidade a recursos hídricos, facilidade de acesso, tipo de vegetação, espaço disponível e vida útil do projeto, distância de

núcleos populacionais e custos de construção (FERNANDES; SILVEIRA; OLIVEIRA, 2017).

Entretanto, mesmo com os cuidados tomados e sendo considerado a disposição final adequada para resíduos, é necessária a destinação adequada do lixiviado e dos gases efluentes. Algumas pesquisas apontam a recirculação como uma forma de utilizar o lixiviado, com intuito de otimizar os processos de redução do volume de resíduos nos aterros sanitários. Esta técnica transforma o aterro sanitário numa espécie de biorreator, aumentando a homogeneização da matéria, diminuição o volume e maior produção de biogás (FERREIRA; BRÁS; SILVA, 2017). A Figura 5 mostra um desenho esquematizado de um aterro sanitário.

**Figura 5 - Exemplo esquematizado de aterro sanitário**



Fonte: (GONÇALVES, 2015)

Essas são técnicas de disposição final do RSU. Porém os métodos que, segundo o PNRS, devem ser priorizados antes da disposição final são os tratamentos de RSU.

A incineração é um tipo de tratamento de RSU que conforme consta no IPT/CEMPRE (1995, apud (CAIXETA, 2005), consiste na queima por um tempo pré-determinado de materiais em alta temperatura misturado com cargas de ar. Ou seja, um processo químico de combustão. Este transforma o resíduo resultando em energia (GRIPP, 1998).

Essa queima possibilita a diminuição do volume dos resíduos para 4% do total e o calor gerado pode ser utilizado na geração de energia. As cinzas residuais, subproduto do processo, pode possuir utilidade em obras de construção civil (HENRIQUES, 2004).

Sua principal característica é o alto potencial de redução do volume de resíduo, porém em alguns países é utilizado como principal fonte de energia. Em países como Noruega,

Dinamarca e Suécia, incineradores são responsáveis por mais da metade de energia produzida (SONTAG et al., 2015).

Entretanto, pontos de atenção para essa tecnologia é ser um produto com necessidade de alto investimento na construção, manutenção e tratamento dos gases resultantes da queima (SONTAG et al., 2015).

Além disso, este tipo de tecnologia necessita de uma estrutura com operações de separação de resíduos, redução do tamanho das partículas, classificação dos gases e remoção de materiais ferroso (GRIPP, 1998).

No Brasil está tecnologia de tratamento de RSU possui dificuldades de ser viabilizada em comparação com a Europa. Isto se deve à falta de abonos em impostos e ao valor no qual é pago pela venda energia ser menor (I&T; NRG, 2012).

Outro tipo de tecnologia para o tratamento de RSU é a biodigestão anaeróbia. Esta consiste num processo no qual o substrato orgânico é transformado em uma mistura gasosa por meio da ação de microorganismos na ausência de oxigênio livre, segundo Chernicharo (2007 apud PROBIOGÁS, 2015)

Segundo PERROT e SUBIANTORO (2018), este processo é o mais barato e sustentável entre as tecnologias de reaproveitamento energético de resíduos. Entretanto apresenta algumas limitações em relação a capacidade e ao tipo de substrato que pode ser utilizado.

Gaspar (2007, p17 apud ARAUJO, 2017) descreve o processo de biodigestão anaeróbia como a degradação de compostos orgânicos complexos na ausência de oxigênio e obtendo como produto final gás metano.

Os gases produzidos nesse processo, o biogás, possuem grande potencial energético. O poder energético do chamado biogás é proporcional a concentração de gás metano em sua composição, pois este possui alto potencial calorífico, que segundo TCHOBANOGLOUS et al. (2002 apud PROBIOGÁS, 2015) é 38.800Kj/m<sup>3</sup>.

A utilização do biogás pode ser destinada a energia elétrica ou energia térmica para diversos setores da sociedade como indústrias, automóveis e uso doméstico (AEBION apud PROBIOGÁS, 2015)

Esse processo é considerado a forma mais adequada no tratamento de frações orgânicas de RSU pois apresentam baixa produção de biossólidos, baixo gasto energético e altos níveis de geração de biogás (SHAHRIARI, 2012 apud SCHULZ, 2015).

Os processos que utilizam biodigestores apresentam taxa de produção de biogás cerca de 50 a 100 vezes maiores que aterros sanitários (FARIAS, 2009).

Existem várias tecnologias de biodigestores e todas consistem, basicamente, de um local para depositar e permitir a digestão da biomassa e um gasômetro para alojar o gás resultante (BONFANTE, 2010).

Os reatores nos quais é realizado o processo da digestão da biomassa são chamados biodigestores e no capítulo 3 ocorre uma análise das tecnologias utilizadas atualmente neste processo.

O Quadro 1 apresenta um resumo das tecnologias de tratamento e de disposição final de resíduos.

**Quadro 1 - Comparação entre técnicas de disposição final e tratamento de RSU**

Técnica	Descrição
Lixão	Disposição do lixo sobre o solo sem controle ou organização. Gera contaminação de chorume e metais no solo, dispersão de gases tóxicos na atmosfera e acúmulo de animais vetores de doenças. Entretanto é muito utilizado no brasil devido ao baixo ou nenhum investimento necessário.
Aterro controlado	Técnica de disposição de RSU sobre o solo na qual o resíduo é coberto com camada de inertes ao fim do despejo. Assim evita aproximação de animais vetores e arrasto dos resíduos pelas chuvas ou ventos. Porém ainda não apresenta impermeabilização do solo ou de dispersão de gases, assim causando contaminação de solo e atmosfera.
Aterro Sanitário	Técnica considerada adequada de disposição final de RSU, apresenta controle sobre os resíduos que serão despejados, assim como impermeabilização e recolha do chorume, dispersão e tratamento de gases e cobertura dos resíduos com inertes. Ainda é pouco utilizado devido a necessidade de investimento inicial, manutenção e controle superiores aos lixões e aterros controlados.

Incineração	Tecnologia de tratamento de RSU que utiliza de altas temperaturas e cargas de ar para a combustão do resíduo. Apresenta alto impacto sobre o volume dos resíduos e alto potencial de recuperação energética. Os resíduos deste processo são cinzas, que podem ser utilizadas na construção civil, e gases resultantes da queima. Esses gases devem ser tratados pois possuem alto potencial poluidor. Esse tratamento dos gases é o processo que encarece o investimento nesta tecnologia, tornando-a menos atrativa.
Biodigestão anaeróbia	Tecnologia de tratamento de RSU que visa a recuperação energética, o gás metano, resultante da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos. Processo captura os gases resultantes, assim evitando a contaminação da atmosfera. Apresenta também redução do volume da fração orgânica dos resíduos. Não é tão eficiente na recuperação energética e na redução do volume dos RSUs porém apresenta menor impacto ambiental e menor investimento na implantação e manutenção.

Fonte: Autoria própria

## 2.4 Biodigestores

Biodigestor consiste de um sistema fechado de otimização da decomposição da matéria orgânica por via anaeróbica com presença de bactérias metanogênicas (SILVA; DE OLIVEIRA, 2014).

Biodigestor é uma câmara fechada que propicia as condições necessárias para fermentação, por meio de bactérias metanogênicas, da biomassa (SOUTO; RABBANI, 2015). Conforme conceituada por Glebber e Palhares (2007, apud SOUTO; RABBANI, 2015), biomassa é matéria orgânica existente em seres vivos ou mortos, de origem animal ou vegetal. Esta pode ser oriunda da recuperação de resíduos florestais, agropecuários e urbanos e que o produto desse processo pode ser utilizado para a produção de energia ou para produzir biofertilizantes para a agricultura (SOUTO; RABBANI, 2015).

O biodigestor pode trabalhar com qualquer material orgânico que se decomponha através da ação de bactérias anaeróbicas (TURDERA; YURA, [s.d.]).

Essas bactérias são os agentes, que na ausência de oxigênio, decompõem a matéria orgânica, por meio do processo alcalino de fermentação e produção de gás metano (SILVA; DE OLIVEIRA, 2014)

Após o final do processo também é produzido biofertilizante, como resíduo. Esse resíduo precisa ser removido periodicamente para que a operação não sofra com problemas de funcionamento e também possui valor de mercado como fertilizante e pesticida. (SILVA; DE OLIVEIRA, 2014)

Os biodigestores são projetados tal qual atinjam as condições ideais para que as bactérias atuem com o máximo potencial de degradação da matéria orgânica. Segundo TIAGO FILHO & SOLOMON (2007 apud SILVA; OLIVEIRA, 2014), a temperatura e pH do resíduo, composição, isolamento das bactérias à compostos tóxicos, concentração de água ideal, impermeabilidade em relação ao ar atmosférico e o volume de resíduos a serem tratados deve ser levado em conta ao dimensionar um biodigestor.

Para atingir o ponto de otimização existem diversas tecnologias que realizam a biodigestão. As principais divisões que se fazem entre as tecnologias de biodigestores são em batelada, um estágio ou múltiplos estágios (HENRIQUES, 2004; LUCIANA DIAS DE LUNA et al., 2008; PROBIOGÁS, 2015; REICHERT, 2005).

O biodigestor batelada consiste em ser carregado com a matéria putrescível no início e retirando os produtos e subprodutos após as taxas de biogás atingirem níveis mais baixos de produção. Possui vantagem por apresentar um processo simples tecnicamente, baixo investimento e são robustos (GARTNER, 2015; REICHERT, 2005). Entretanto podem-se acumular resíduos no fundo do reator ocasionando variações no processo de digestão e na qualidade do biogás (SCHULZ, 2015)

Em contrapartida no processo de um estágio o digestor carregado com o material a ser digerido é carregado e o produto retirado simultaneamente a sua produção (GARTNER, 2015; REICHERT, 2005). Esse modelo de biodigestor também é simples e apresenta menor custo em relação ao múltiplo estágios, porém pode apresentar problemas na operação como o curto-circuito, que consiste no material não permanecer dentro do reator por tempo suficiente para ser maximizada a biodigestão (SCHULZ, 2015)

O processo múltipla-estágios consiste num conjunto de reatores nos quais ocorrem etapas da biodigestão de forma separada. Desse modo é possível maximizar a produção de biogás em cada uma destas etapas (Ward et al, 2008 apud SCHULZ, 2015). Porém apresentam maior complexidade de operação e investimento (HENRIQUES, 2004).

Existem outras divisões em relação a características de um biodigestor anaeróbio como em relação a temperatura de operação termofílica (50°C a 60°C) e mesofílica (37°C a 42°C) e em relação a concentração de sólidos totais (ST) variando de 3% a 15%, de 15% a 35% e 25% a 50%, operando em via úmida, via seca e via extra seca respectivamente (PROBIOGÁS, 2015)

Em todas estas variações de tecnologias, as plantas de biodigestão possuem operações de pré-tratamento, digestão dos resíduos, recuperação do biogás, tratamento da fração residual do material digerido (GRS-UFPE, 2014). Que contam com etapas de separação de embalagens e contaminantes grosseiros, redução do tamanho dos compostos, armazenamento e tratamento do biogás e operações de segurança de queima de gás (LINHARES et al., 2017).

Para obter maior rendimento o biodigestor deve ser dimensionado com base na composição dos resíduos que serão tratados. No caso de RSU o modelo mais viável são os que possuem configuração em batelada, estes são como aterro por isso são chamados de aterro *in a box* (VANDEVIERE; BAERE; VERSTRAETE, s.d. apud FARIAS, 2009). Os RSU podem apresentar aproximadamente entre 50% a 80% de sólidos totais o que ocasiona em dificuldades no processo de escoamento (PROBIOGÁS, 2015), assim o modelo em batelada se apresenta como mais adequado.

Entretanto as tecnologias mais maduras são em sua maioria para baixa quantidade de sólidos e pouca quantidade materiais impróprios. Matéria imprópria é considerada a parte do RSU que não é matéria orgânica. Essa tendência se deve ao manejo de resíduos de efluentes serem os primeiros a receber tratamento com biodigestão. Estes processos, que possuem de 3% a 7% de sólidos totais. É necessária a adição de água ou efluente líquido para chegar na composição ideal quando a matéria a ser utilizada apresenta altas concentrações sólidos (PROBIOGÁS, 2015). Além disso essa operação apresenta problemas com deposição de materiais sólidos no fundo do reator e material flotante, os quais podem danificar os equipamentos e diminuem a capacidade volumétrica, junta-se a isso a utilização de menores quantidades de efluentes produzidos, reduzindo gastos com o tratamento deste (GOMES; DE AQUINO; COLTURATO, 2012; PROBIOGÁS, 2015).

As tecnologias mais modernas que são utilizadas na Europa para o tratamento de RSU baseiam-se majoritariamente em via seca e extra seca, está última sendo uma tecnologia mais

moderna, que surgiu a partir de 2007 enquanto a via seca possui implantação desde as décadas de 80 e 90 (LINHARES et al., 2017)

O modelo extraseco trouxe vantagens em relação a via seca por diminuir o volume de efluentes líquidos a serem tratados ao final da operação e por não necessitar da adição de água ou lodo na substrato de entrada (PROBIOGÁS, 2015; LINHARES et al., 2017)). Assim as condições de operação necessitam de menores instalações, porém devido à alta densidade do material requer maquinários mais robustos (VANDEVIVERE et al. apud PROBIOGÁS, 2015).

Alguns autores já avaliaram as tecnologias utilizadas na Europa para o tratamento de RSU, elas baseiam-se preferencialmente nas vias secas e extra secas. Serão descritas a seguir cada uma dessas tecnologias que, segundo (LINHARES et al., 2017), são as mais utilizadas para tratamento de RSU: Valorga, Kompogas e sistemas de túneis de metanização que englobam tecnologias como Bekon.

#### *2.4.1 Valorga*

Tecnologia desenvolvida na França a partir da década de 90 foi inicialmente projetada para o tratamento de matéria orgânica e, posteriormente, adaptada para o tratamento de FORSU (PROBIOGÁS, 2015)).

Esse modelo de operação é composto por 6 etapas complementares as quais iniciam no recebimento e processamento do RSU para pesagem, separação de impurezas maiores, Trituração das partículas e então é introduzido o material no biodigestor (REICHERT, 2005)

Nesse processo de tratamento o resíduo também é aquecido via injeção de vapor de água o qual também auxilia no ajuste da concentração de partículas secas (PROBIOGÁS, 2015). O processo opera em via seca e ocorre divergência na literatura que aponta uma operação com desde 20% até 35% de sólidos totais.

Está tecnologia utiliza apenas um único estágio que consiste num reator cilíndrico vertical com uma parede com comprimento de 2/3 do diâmetro que divide o reator. A entrada e saída do material é feita na parede do reator próxima a base, uma em cada lado da parede. Esse formato impede curto circuito dentro do reator e garante fluxo contínuo (REICHERT, 2005). Por apresentar formato vertical e entrada pela base, a potência dos motores que introduzem

o substrato no reator deve ser elevada. Este deve ser forte o suficiente para deslocar a coluna de resíduos existente no reator (FEAM, 2009)

A agitação no interior do reator é realizada pela injeção de biogás a alta pressão por orifícios situados na base do reator, o biogás é extraído pela parte superior do reator (PROBIOGÁS, 2015). O sistema de injeção de biogás exige de manutenção e limpeza diárias para desobstruir os bocais. Contudo se mostra um sistema prático e eficiente por não apresentar elementos mecânicos (FEAM, 2009). Um esquema do reator Valorga é apresentado na Figura 6.

**Figura 6 - Modelo esquemático reator Valorga**



Fonte: (REICHERT, 2005)

#### 2.4.2 *Kompogás*

Os biodigestores com tecnologia Kompogas consiste em um processo via seca, de um único estágio que opera em temperatura termofílico, em torno de 55°C (KOMPOGAS, 2020). Utiliza-se um reator horizontal com injeção contínua de resíduos orgânicos oriundos de jardinagem ou RSU separados na fonte (REICHERT, 2005)

O reator possui formato horizontal com fundo cilíndrico, ou inteiro cilíndrico, e é construído normalmente a base de concreto. O material é tratado na fonte de forma a reduzir o tamanho das partículas, adição de lodo para regular a concentração de sólidos totais entre 23% e 28% e ajustar a temperatura (PROBIOGÁS, 2015).

O mecanismo de agitação é composto por um eixo na mesma direção do fluxo de resíduo, ne eixo são acopladas pás que rotacionam paralelamente ao fluxo dos resíduos, conforme apresentado na Figura 7 (PROBIOGÁS, 2015).

Após a digestão é necessário separar a parte sólida que será estabilizada e os efluentes líquidos que necessitam tratamento.

Diferente das outras tecnologias, a Komogás não utiliza gasômetros para manutenção da pressão necessária nos motores de cogeração, assim, torna-se ausente a presença de problemas na operação. Apesar disso, por utilizar apenas a gravidade como sistema de extração, em casos de obstrução destes sistemas é necessária intervenção manual. Essa intervenção consiste na abertura do sistema e pode desestabilizar o processo biológico (FEAM, 2009)..

**Figura 7 - Modelo esquemático do reator Komogás**



Fonte: (KOMPOGAS, 2020)

#### *2.4.3 Tuneis de Metanização*

Essa tecnologia surgiu nos anos 2000 como uma forma de tratar resíduos com grandes cargas de impróprios e matéria seca.

Geralmente são tuneis retangulares e horizontais, como uma garagem, em sequência que operam em batelada. Trabalham em via extra seca e temperatura mesofílica (PROBIOGÁS, 2015).

A entrada e saída do material é feita de forma mecânica por pás, que introduzem o material nas garagens e o retiram após o tempo de digestão. Dessa forma é possível realizar a limpeza do reator, assim evita-se a sedimentação e o acúmulo de impróprios como pode ocorrer nos sistemas de operação continua (PROBIOGÁS, 2015). As entradas do reator estão apresentadas na Figura 8 e o esquema completo do reator está representado pela Figura 9.

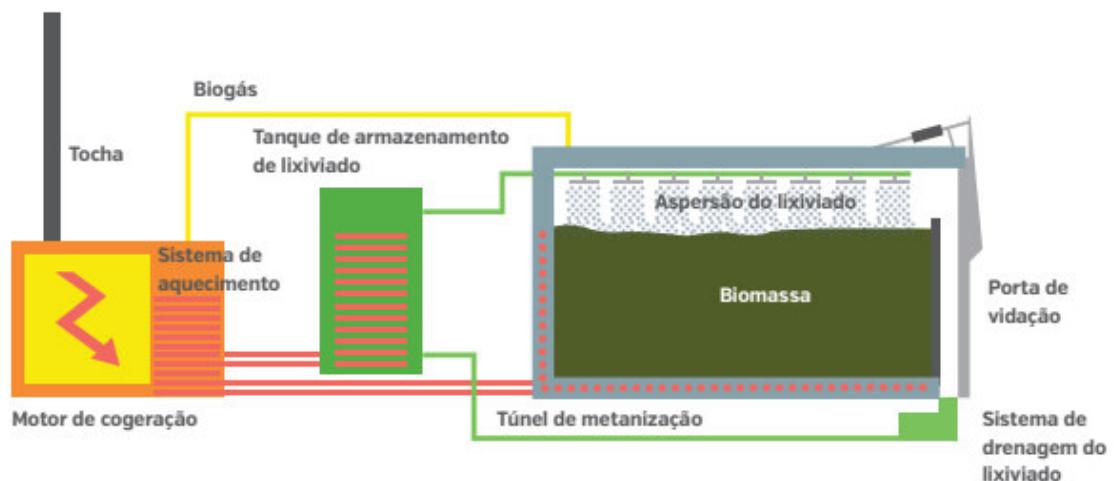
Dentro do reator não existe sistema de agitação e a otimização do processo é realizado por meio da recirculação do lixiviado (PROBIOGÁS, 2015).

**Figura 8 - Foto de plano de tuneis de metanização**



Fonte: (PROBIOGÁS, 2015)

**Figura 9 - Modelo esquemático reator de túneis de metanização**



Fonte: (PROBIOGÁS, 2015)

No Quadro 2 foram levantados os pontos positivos e negativos das principais tecnologias de biodigestores anaeróbios.

**Quadro 2 - Comparação entre pontos fortes e fracos das tecnologias Valorga, Kompogás e Túneis de metanização**

Tecnologia	Pontos fortes	Pontos fracos
Valorga	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processo contínua</li> <li>- Agitação não mecânica</li> <li>- Alto grau de maturidade</li> <li>- Elevada capacidade instalada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de limpeza constante</li> <li>- Não suporta grande quantidade de impróprios</li> <li>- Necessita diluição dos resíduos</li> <li>- Tecnologia mais complexa</li> </ul>
Kompogás	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de agitação eficiente, apesar de mecânico</li> <li>- Processo contínuo</li> <li>- Experiência com diferentes tipos de substrato</li> <li>- Alto grau de maturidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessita interrupções no processo para manutenção</li> <li>- Possibilidade de falhas no sistema de extração</li> <li>- Manutenções podem acarretar contaminação do substrato</li> <li>- Não suporta grandes quantidades de impróprios</li> <li>- Tecnologia com médio grau de complexidade</li> </ul>
Túneis de Metanização	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixa complexidade tecnológica</li> <li>- Suporta grandes quantidades de impróprios</li> <li>- Custos reduzidos de instalação</li> <li>- Recirculação do lixiviado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor grau de maturidade</li> <li>- Processos em bateladas, necessita maior quantidade de reatores</li> <li>- Dificuldade de aeração devido ausência de agitação</li> <li>- Emissões fugitivas de gás</li> </ul>

Fonte: Adaptado de PROBIOGÁS (2015) e LINHARES et al. (2017)

### 3. Método

Esse capítulo visa descrever o método de pesquisa, coleta e análise de dados a ser empregado nesse trabalho

A metodologia utilizada no trabalho será o estudo de caso. Segundo YIN (2001) esse método é ideal para entender fenômenos nos quais temos pouco controle sobre as variáveis e estão inseridos no cotidiano real da população. Yin (2001) ainda completa, apontando o estudo de caso como um método para esclarecer pelo qual decisões são tomadas, como foram implementadas e com quais resultados alcançados. Seu objetivo pode ser aprimorar os conhecimentos sobre um determinado problema não suficientemente definido, visando estimular a compreensão (MATTAR, 1996 apud MIGUEL, 2007). Pode ainda ser metodologia utilizada para comparações entre organizações ou eventos (MINADEO, 2017).

Essa metodologia pode ser dividida em segundo o caráter de seu conteúdo e objetivo (exploratório, explanatório e descritivo) ou sob a ótica do número de casos abordados (caso único ou múltiplo casos) (MIGUEL, 2007). Este estudo será realizado com intuito descritivo, o qual visa entender e descrever as características e a relevância de certos fenômenos (MIGUEL, 2007). Para a realização de uma pesquisa no formato de estudo de caso, não existe um padrão rígido de estruturação. Porém podemos dividir o estudo em quatro etapas: definir o local de estudo; coleta de dados; seleção, análise e interpretação dos dados coletados e elaborar o relatório, segundo VENTURA (2007) e DE OLIVEIRA et al. (2014)

A seguir foi apresentado a explicação sobre cada uma das etapas

#### 3.1 Definição do objeto de estudo

A unidade definida para ser realizado o estudo foi um aterro sanitário da cidade de São Paulo, o qual recebe em média 7000 toneladas de resíduos diariamente, referentes a zona sul e zona leste da cidade de São Paulo, também chamado de agrupamento sudeste. O aterro é administrado pela EcoUrbis. O empreendimento conta com área total de 1.827.696 m<sup>2</sup> que está dividido nas seguintes áreas: espaço para destinação final de resíduo, área de proteção ambiental, vegetação de áreas internas de remanescentes, coleta e queima de biogás e unidades de apoio (ECOURBIS, 2020).

Este serviço foi contratado em 2004 através do contrato de concessão 26/SSO/04 referente a licitação 19/SSO/03, a qual está sob gestão da empresa ECOURBIS AMBIENTAL S/A. No contrato está previsto a prestação dos serviços de:

- I. Coleta, transporte e destinação final de:
  - a) Resíduos sólidos e materiais de varredura domiciliares
  - b) Resíduos sólidos não perigosos (classe II) oriundos de estabelecimentos que produzam menos de 200L de resíduos por dia
  - c) Resíduos inertes (material de construção, entre outros) devidamente acondicionados e que não superem 50Kg por dia
  - d) Resíduos sólidos de serviços de saúde
  - e) Resto de móveis e resíduos de mudanças até 200L
  - f) Resíduos de feiras e mercados desde que corretamente acondicionados

O contrato foi firmado, em 2004, por R\$ 5.039.480.640,00 (cinco bilhões, trinta e nove milhões, quatrocentos e oitenta mil e seiscentos e quarenta reais e zero centavos), pela prestação dos serviços pelo período de 240 (duzentos e quarenta) meses a partir do dia 13 de outubro de 2004, ou seja, tem duração até 12 de outubro de 2024 (SSO, 2004).

A área geográfica da coleta compreende o agrupamento sudeste de subprefeituras de Aricanduva, Campo Limpo, Cidade Ademar, Cidade Tiradentes, Ermelino Matarazzo, Guaianases, Ipiranga, Itaim Paulista, Itaquera, Jabaquara, M'Boi Mirim, Parelheiros, Santo Amaro, São Matheus, São Miguel, Socorro, Vila Mariana e Vila Prudente/Sapobemba (SSO, 2004). Segundo o censo de 2000 essa região possuía 3.100.643 habitantes e pelo censo de 2010 a população desta região era de 3.326.668 habitantes. Utilizando o método de interpolação chega-se ao valor de 3.162.395 habitantes em 2003, ano da concessão (SÃO PAULO, 2010).

A concessão considerou a taxa de geração de resíduos neste agrupamento sendo 1.740.306 t/ano. Entretanto, nestes estão inclusos apenas os resíduos sólidos domiciliares, resíduos sólidos não-domiciliares, resíduos inertes (classe 3), resíduos sólidos de serviços de saúde, resto de móveis e similares e resíduos de feiras. A quantidade de resíduos com essas classificações que foram coletados no período entre 2013 e 2019 corresponde a uma média de 4.326.494,64 entre os quais apenas 86% correspondem a resíduos domiciliares conforme dados disponíveis no portal Dados Abertos do município de (AMLURB, 2020)

Apesar de o aterro comportar 7000t de resíduos por dia, a licitação vencida pelo EcoUrbis exigia apenas a construção de um aterro capaz de destinar os resíduos domiciliares gerados no agrupamento sudeste. Além do aterro consta a construção de uma usina de compostagem com capacidade de receber 1000t diárias de resíduos orgânicos (SSO, 2004) . Para o estudo serão consideradas apenas os valores estabelecidos na concessão pois não foi possível ter acesso aos dados referentes a toda operação da EcoUrbis no aterro.

Em relação às unidades de biodigestores anaeróbios que serão utilizados como comparação, o estudo será feito a partir das principais tecnologias apresentadas no trabalho: Valorga, Komporgas e Bekon.

### 3.2 Coleta de dados

Segundo YIN (2001), selecionar várias empresas para fazer comparativo é investigar vários aspectos do mesmo fenômeno. No caso desse estudo, foram avaliados diferentes processos com a mesma finalidade, destinar e tratar resíduos urbanos. Isso propiciou conclusões mais concretas já que absorve um conjunto de informações.

Neste trabalho foram coletados dados de fontes primárias, ou seja, aquelas que podem ser consideradas de caráter documental, como documentos públicos, contratos públicos, orçamentos, estatísticas, habilitando ser escritos ou não, e, também, informações referentes a entrevistas (BONAT, 2009 apud JACOBOWSKI, 2018).

No presente trabalho coletou-se informações estatísticas e contratos do portal de transparência do município de São Paulo com objetivo de entender qual a área geográfica, o tamanho da população desta área e a quantidade e características dos resíduos gerados na por essa população.

Os valores sobre a venda da energia proveniente do biogás foram coletados a partir de valores de compra de energia distribuída fornecido pela ANEEL.

Também foram coletados dados secundários que possibilitam avaliar diferentes abordagens científicas que possibilitem mais qualidade na compreensão e na análise dos fenômenos (GIL, 2002 apud JACOBOWSKI, 2018). Consolidou-se alguns estudos de caso sobre a viabilidade financeira da implantação e operação de aterros sanitários e sistemas de captação e geração de energia por meio do biogás.

Os custos sobre a construção, manutenção e vida útil de biodigestores de tecnologias Valorga, Kompogás e Bekon foram recolhidos através da literatura e dos valores disponibilizados pela empresa sobre a capacidade de receber RSU e de produção de biogás.

### 3.3 Seleção e análise de dados

Inicialmente foi estimado através dos dados estatísticos de coleta de resíduos no município de São Paulo a quantidade de resíduos gerados pelo agrupamento sudeste de subprefeituras. Através de dados primários foi possível estabelecer a quantidade de resíduos e, também, a sua caracterização separando os resíduos em quatro categorias: recicláveis, papeis e papelão, orgânico e outros.

Com as quantidades e a características dos resíduos do agrupamento, juntamente com as especificações de contrato foi estimado as quantidades de RSU a serem destinados ao aterro em questão. Esses valores associados ao estudo de estimativas de custos de aterro sanitário realizado pela parceria entre ABETRE e FGV (2007) possibilitaram dimensionar e avaliar os fluxos de caixa necessários para atender a demanda.

Para a análise econômica do projeto de captação e geração de energia através do biogás proveniente do aterro sanitário realizou-se cálculos para avaliar o potencial de geração de biogás através do software LandGem. Então comparou-se 4 estudos de caso sobre a implantação desse sistema e consolidou-se os valores médios de implantação e captação de biogás por tonelada diária de resíduos e por Mega Watt (MW) de potência dos geradores, no caso da geração de energia. Como os projetos podem possuir diferentes tempos de vida, foi realizada a média da vida útil dos estudos. Foi utilizado os valores médios para a estimativa de custos.

Para calcular as receitas do biogás, foi realizada a análise do potencial através do LandGem e em seguida foram realizados diversos cálculos para encontrar a receita gerada pela venda de energia convertida a partir do biogás.

Foi realizado o estudo da viabilidade econômica do aterro e do projeto de captação e geração de energia do biogás de maneira a analisar o VPL, a TIR e o payback utilizando-se uma TMA de 16%. Como o tempo de vida do aterro é muito superior aos tempos encontrados na literatura para o projeto de captação e geração de energia será realizado a implantação destes no período de maior potencial de geração de biogás.

### 3.3.1 Métodos de cálculo

Para cálculo do potencial energético será utilizado o software LandGEM®, que foi criado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) através dele é possível avaliar a produção de biogás e metano através da decomposição por um período especificado (BARRAK, 2019). Os cálculos são realizado a partir da equação cinética de primeira ordem, conforme a equação 5:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 K L_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (5)$$

No qual:

$Q_{CH_4}$  = produção de metano anual para o ano calculado ( $m^3/ano$ ); i: acréscimo de 1 por ano; n = ano do cálculo (ano inicial de abertura do aterro); j = acréscimo de 0,1 por ano; k = taxa de geração de metano ( $ano^{-1}$ );  $L_0$  = potencial de geração de metano ( $m^3/t.$ );  $M_i$  = massa de resíduos recebidos no ano (t);  $t_{ij}$  = ano, em cada seção, de recebimento da massa de resíduos (tempo, com precisão de decimais, por exemplo, 3,2 anos).

O potencial de geração de metano ( $L_0$ ) é calculado a partir da equação 6 (PNUD, 2010):

$$L_0 = FCM(x) \cdot COD(x) \cdot COD_f \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (6)$$

Em que:  $FCM(x)$  = fator de correção do metano no ano x;  $COD(x)$  = fração de carbono orgânico degradável no ano x ( $t C / t RSU$ );  $COD_f$  = fração do carbono orgânico degradável assimilado; F = fração de metano no gás do aterro, na ausência de dados 0,5;  $16/12$  = conversão de carbono a metano.

Porém, é necessário primeiro calcular qual a fração de carbono orgânico degradável (COD) presente nos resíduos e para isso utiliza-se a Equação 7:

$$COD = \sum (COD_i \cdot W_i) \quad (7)$$

Na qual  $COD$  = Fração de carbono orgânico degradável no resíduo;  $COD_i$  = Fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduo i;  $W_i$  = Fração do tipo de resíduo i por categoria do resíduo.

O COD é calculado a partir da composição gravimétrica dos resíduos e do auxílio da tabela 2.5 do Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 2: Geração de Resíduos, de 2006, apud COELHO; ALENCAR; OLIVEIRA (2011) conforme apresentado na Tabela 3. Cada tipo de material presente no resíduo possui uma quantidade de carbonos orgânicos degradáveis apresentado na Tabela 3 em conformidade com o guia do IPCC apud COELHO; ALENCAR; OLIVEIRA (2011). O  $W_i$  é a proporção gravimétrica dos materiais presentes nos resíduos separados entre matéria orgânica, papel/papelão, vidros, outros. O COD depende da proporção dos materiais depositados no aterro bem como sua porcentagem de COD.

**Tabela 3 - Fração de carbono orgânico degradável por tipo de resíduo**

Resíduo	Porcentagem em massa
A – Papel, papelão e Tecidos	40
B – Resíduos de parques e jardins	17
C – Restos alimentares	15
D – Madeira	30

Fonte: (IPCC, 2011 apud COELHO; ALENCAR; OLIVEIRA 2011)

A fração de COD dissociada ( $COD_f$ ), significa a parte de carbono que apresenta decomposição bioquímica, e pode ser obtida pela Equação 8 (BIRGEMER, 1987 apud COELHO; ALENCAR; OLIVEIRA, 2011)

$$COD_f = 0,014T + 0,28 \quad (8)$$

N qual T: temperatura (°C) nas regiões anaeróbia dos resíduos, estimada em 35°C.

Os demais carbonos são assimilados pelos microrganismos responsáveis pela degradação representada pela equação 8 (BIRGEMER, 1987 apud COELHO; ALENCAR; OLIVEIRA, 2011)

O F é a proporção de metano no gás, é utilizado o valor estimado de 0,5 caso o aterro sanitário não tenha esse valor real definido. E a fração  $\frac{12}{16}$  é a taxa de transformação de carbono em metano.

O Fator de Correção do Metano (FCM), que avalia a qualidade do aterramento do lixo e varia de 0,4 a 1 dependendo da qualidade do manejo dos resíduos no aterro (COELHO;

ALENCAR; OLIVEIRA, 2011). O IPCC (1996 apud SILVA, 2015) propõe valores do FCM (Fator de Correção do Metano) de acordo com o tipo de aterro onde se realiza a destinação dos resíduos. Ele relaciona o FCH com a localização, temperatura, tipos de resíduos e de aterro, controlado e não controlado. Aos aterros controlados é considerado o valor de 1 para o FCM.

### 3.4 Captação de biogás e geração de energia

Para verificar as saídas financeiras necessárias para a implantação e operação de um sistema de captação de biogás e geração de energia foi realizado a análise de estudos de viabilidade econômica encontrados na literatura. A partir desses estudos foi estimado valores financeiros médios para uma estrutura capaz de suportar a capacidade de biogás que o aterro é capaz, potencialmente, de produzir.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1 Caracterização dos RSU

A partir de dados fornecidos pela prefeitura de São Paulo foi feita a Tabela 4 e estabelecida a proporção de resíduos domiciliares entre o total de resíduos recolhidos no agrupamento sudeste.

**Tabela 4 - Resíduos coletados no agrupamento de subprefeituras sudeste em São Paulo**

Ano	Total de Resíduos Coletados*(t/ano)	Total Resíduos domiciliares (t/ano)	Proporção
2013	4.479.494,86	3.831.455,19	86%
2014	4.463.351,72	3.802.438,73	85%
2015	4.492.184,46	3.801.404,45	85%
2016	4.195.818,24	3.583.509,78	85%
2017	4.198.315,52	3.649.591,39	87%
2018	4.231.572,70	3.729.838,76	88%
2019	4.224.725,00	3.680.080,00	87%
<b>Média</b>	<b>4.326.494,64</b>	<b>3.725.474,04</b>	<b>86%</b>

\*Levando em conta as seguintes classificações fornecidas pela prefeitura: domiciliar, varrição, seletiva, feira livre, resíduos de boca de lobo, varrição mecanizada, saúde e diversos.

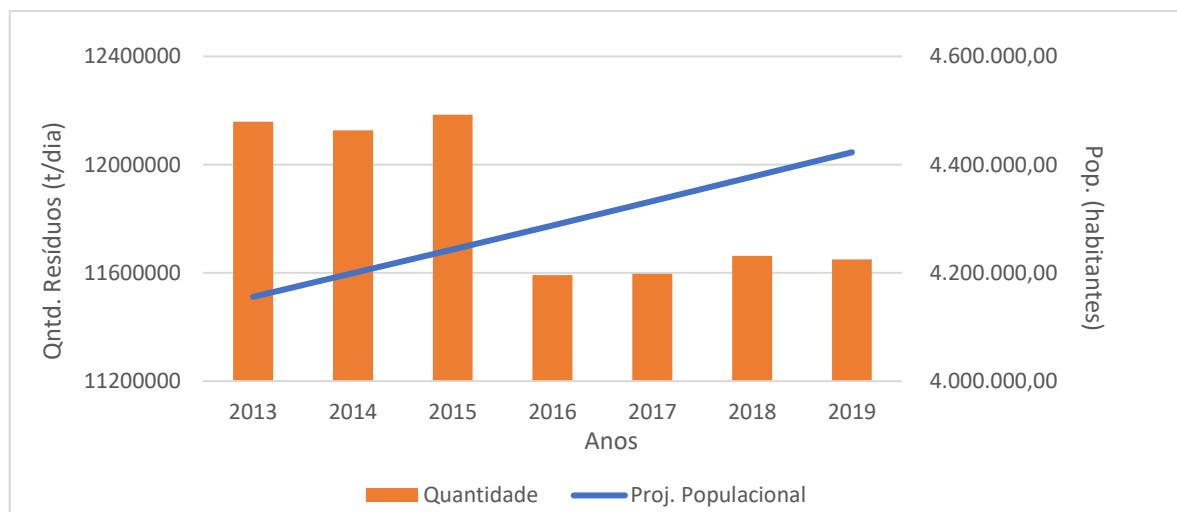
Fonte: Dados fornecidos pela prefeitura

A partir dos dados da Tabela 4 pode-se sugerir a quantidade de resíduos domiciliares sendo 86% da quantidade total de resíduos produzidos. A concessão aponta que o agrupamento sudeste produz 1.740.306 t/ano de resíduos sólidos, considerando que os resíduos domiciliares representam 86% desta quantia de resíduos produzidos no agrupamento concluímos que região produz 1.498.990,47 t/ano de resíduos sólidos domiciliares. Este valor é equivalente a 4106,82 t/dia. O contrato de concessão obrigou a Ecourbis a destinar os resíduos sólidos domiciliares à aterro sanitário.

Também foi realizado o cálculo de produção de RSU por habitante para avaliar a demanda. Em 2003 havia 3.162.395 habitantes no agrupamento sudeste e o valor de lixo produzido por habitante era de 1,29kg/dia/habitante.

Com o aumento da população era esperado que a quantidade de resíduos sólidos coletados também aumentasse, assim como a média de resíduos produzidos por cada habitante, entretanto analisando os dados de coleta entre 2013 e 2020, as quantidades de resíduos produzidos diminuiu na região metropolitana de São Paulo. Dessa forma foi considerado que a quantidade de lixo coletada em 2003 se mantará até o fim da concessão. Na Figura 10 temos um gráfico com a população projetada entre 2013 e 2020 com os dados de coleta de resíduos (apenas os resíduos considerados para a coleta). A população foi projetada com base no crescimento aritmético anual da década de 2000 a 2010 na região metropolitana de São Paulo, que foi de 0,76% ao ano.

**Figura 10 - Comparando os dados de resíduos produzidos com a projeção populacional na região metropolitana de São Paulo**



Segundo MMA (2012), a parte orgânica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil é de 51,4%, aplicando-se essa quantificação aos resíduos adquiridos no agrupamento sudeste teremos os valores conforme a Tabela 5.

**Tabela 5 -Estimativa de composição gravimétrica dos resíduos do agrupamento sudeste**

Tipo de Matéria	Participação (%)	Total Agrupamento Sudeste
		(t/ano)
Material reciclável	31,9	1310,08
Matéria Orgânica	51,4	2110,91
Outros	16,7	685,84
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>4106,82</b>

Fonte: Adaptado MMA (2012)

O tempo estimado de vida do aterro é de 20 anos, estando a Ecourbis também responsável pelo acompanhamento do aterro após o encerramento afim de evitar danos ambientais.

No plano de concessão também está previsto a construção e operação de uma usina de compostagem com capacidade para receber 1000 toneladas diárias. Também foi considerado que a porcentagem de papel, papelão e jornais correspondem a 13,4% conforme informado pela LIMPURB (2007). Assim a composição dos resíduos urbanos que devem ser encaminhados ao aterro será conforme exposto na Tabela 6.

**Tabela 6 - Quantidade e proporção total de resíduos a serem destinados por dia ao aterro sanitário desconsiderando os orgânicos enviados a compostagem**

Tipo de Matéria	Participação (%)	Total Agrupamento Sudeste
Material reciclável	28,8	868,84
Papel, papelão e jornal	13,4	416,31
Matéria Orgânica	35,8	1110,91
Outros	22,1	685,84
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>3106,82</b>

Fonte: Autoria própria

#### 4.2 Viabilidade econômica para aterro sanitário

Um estudo realizado pela FGV e ABETRE (2012) apresenta aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de um aterro sanitário, desconsiderando a produção de biogás por considerar incerta a estimativa de custos destas. O estudo realizou a engenharia econômica considerando três portes de aterros: pequenos, médios e grandes. Cada aterro com capacidade de recebimento diário de 100t, 800t e 2000t, respectivamente, de resíduos sólidos urbanos e resíduos não perigosos (classe IIA).

A análise econômico financeira foi realizada com base nas ferramentas de análise de viabilidade econômica de projetos como a TIR, VPL e *Payback*.

Com os dados obtidos no dimensionamento das quantidades de resíduos do agrupamento sudeste que devem ser encaminhados a aterro sanitário, 3106,82 t/dia, o projeto mais provável de construção para atender essa demanda seriam dois aterros de grande porte, somando-se 4000t/dia. Dessa forma ainda ficariam com 22% ociosos podendo receber resíduos de outros localidades e cobrar por estes.

A TMA escolhida para o cálculo da viabilidade econômico foi 16%. Este valor foi escolhido com base na média da taxa Selic entre dez/2010 e ago/2020 que apresentou o valor de 9,65% a.a. e adicionou-se um valor de 6,35%, de forma arbitrária, correspondente ao risco e a liquidez do projeto. Outros projetos similares variaram a TMA de 12% a 16,5% com o a taxa relacionada a risco e liquidez podendo chegar a 10%. Nesse caso resolvemos considerar uma taxa menor pois o valor a média da taxa Selic está muito acima da atual taxa Selic, que apresenta o valor de 2% em ago/2020.

#### *4.2.1 Aterro Sanitário*

O ciclo de vida de um aterro sanitário passa por 5 etapas principais, cada uma com sua própria duração e despesas. São elas: Pré implantação, implantação, operação, encerramento e pós processamento (ABETRE; FGV, 2007).

A custo de cada uma das etapas, no estudo apresentado pela ABETRE e pela FGV (2007), para um aterro com capacidade de receber 2000t diárias está descrito na Tabela 7.

**Tabela 7 - Custos das etapas de viabilização de um aterro de grande porte (2000t/dia)**

<b>Etapa</b>	<b>Participação sobre o total</b>	<b>Custo por etapa (R\$)</b>
Pré implantação	0,77%	4.065.461
Implantação	3,46%	18.169.781
Operação	87,77%	461.494.052
Encerramento	1,23%	6.488.889
Pós encerramento	6,77%	35.575.984
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>525.794.167</b>

Fonte (ABETRE; FGV, 2007)

Esses custos são distribuídos ao longo do tempo conforme a Tabela 8. A tabela foi realizada vislumbrando um horizonte de 42 anos de investimentos no aterro. Os investimentos iniciam-se com a pré implantação no primeiro no ano, a implantação no segundo ano. A etapa de operação será composta por todos os anos de recebimento dos resíduos, contando a partir do ano 3, quando o aterro inicia a operação, e para no ano 22, o último ano de operação, completando 20 anos de operação. Cada ano corresponde a 5% dos custos totais de operação. O encerramento ocorre no ano 23 e o pós encerramento dura 20 anos a partir do ano 23. A operação e o pós encerramento por serem as etapas com maior tempo de duração, correspondem também a maior parte dos investimentos realizados no aterro, 87,77% da

operação e 6,77% do pós encerramento, em relação ao total investido (ABETRE; FGV, 2007).

**Tabela 8 - Distribuição percentual dos custos das etapas de viabilização de um aterro sanitário**

<b>Etapa do aterro</b>	<b>Ano 1</b>	<b>Ano 2</b>	<b>Anos 3 a 22</b>	<b>Ano 23</b>	<b>Ano 24 a 42</b>
Pré implantação	100%				
Implantação		100%			
Operação			5%		
Encerramento				100%	
Pós encerramento				5%	5%

Fonte: (ABETRE; FGV, 2007)

#### *4.2.2 Potencial energético do aterro*

Os cálculos realizados para encontrar o potencial energético do aterro considerou que todos os resíduos orgânicos destinados ao aterro do agrupamento sudeste serão considerados restos alimentares possuem COD = 15%, conforme valores sugeridos pelo IPCC apud Silva (2015).

Logo o COD, conforme a equação 8:

$$\text{COD} = 0,4 \cdot 13,4 + 0,15 \cdot 35,8$$

$$\text{COD} = 10,73\%$$

O  $COD_f$  corresponde à fração do carbono orgânico degradável que realmente se degrada. O carbono orgânico degradável não se decompõe totalmente, parte dele permanece no aterro durante anos. Na ausência de dados o IPCC propõe um valor de 77% para o  $COD_f$  (Silva, 2015)

Assim, os valores encontrados no cálculo de Lo foram:

$$Lo = 1 \cdot 0,1073 \cdot 0,77 \cdot 0,5 \cdot 4 / 3$$

$$Lo = 0,055 \text{ kg CH}_4 / \text{kg res}$$

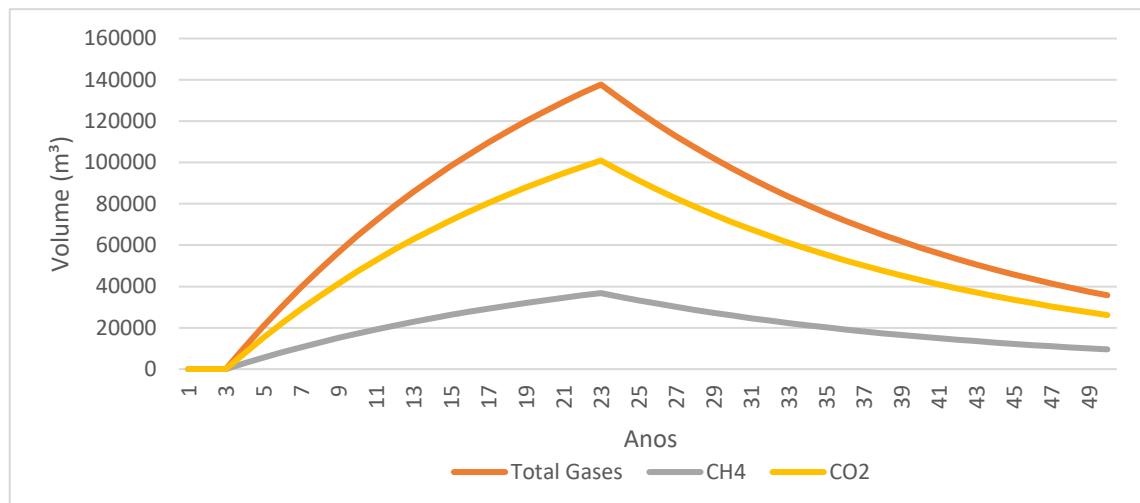
Dividiu-se pela densidade CH<sub>4</sub> (0°C e 1,013 bar) como 0,0007168 t/m<sup>3</sup>

$$Lo = 76,73 \text{ tCH}_4 / \text{t res}$$

O valor de K, segundo a Tabela 3.3 do Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 3: Disposição de Resíduos Sólidos (1996, apud COELHO; ALENCAR; OLIVEIRA, 2011) sugerido para clima tropicais é 0,17.

Utilizando esses valores no software landGEM obtivemos um valor total de 1.297.299.452t de CH<sub>4</sub>, ao final de 2024. Último ano de concessão. Os valores obtidos estão apresentados na Figura 11.

**Figura 11 - Potencial de produção de biogás, metano e gás carbônico**



Fonte: Autoria própria

Os valores são altos devido a elevada quantidade de resíduos depositados no aterro. Nota-se a queda de produção de biogás após o encerramento da disposição de resíduos no aterro (ano 23). Caso continuasse a disposição de resíduos ou então aumentasse a quantidade de matéria orgânica os valores poderiam ser ainda maiores. No primeiro ano de aterramento de resíduos, ano 3, a produção de metano é nula e partir do ano seguinte está previsto o início de produção de biogás, de aproximadamente 4.254.194 m<sup>3</sup> no ano 4, e no ano 23, último ano de destinação de resíduo ao aterro, a produção de metano chega 55.139.059 m<sup>3</sup>.

#### 4.2.3 Projeto de captura de biogás e geração de energia

Utilizamos como base os gastos referentes a cinco estudos de caso que mapearam os custos relacionados a implantação e operação de sistemas de captação de biogás em aterros sanitários e geração de energia a partir de geradores a biogás. Os valores foram compilados na Tabela 9. Um dos estudos apresentou valor muito destoante dos demais estudos com relação a implantação do sistema de captura e, por tanto, foi descartado o valor. O campo está destacado com a fonte em vermelho. Os valores foram corrigidos para jan/2020 através da calculadora do Banco Central do Brasil através do índice IPCA e convertidos para a média por tonelada de recebimento de resíduo e de geração de energia. Em seguida, na Tabela 10,

estão os valores referentes ao projeto em questão, com capacidade de geração de 15MW e recebimento de 4000t/dia de resíduos. Para a estimativa dos custos demonstrados na Tabela 10 foram utilizados os valores médios encontrados na Tabela 9.

**Tabela 9 - Compilado de estudos de caso sobre custos da implantação da captação de biogás e geração de energia.**

Estudo de caso	Implantação captação (R\$/t/dia)	O&M captação (R\$/t/dia)	Implantação Geração (R\$/MW)	O&M Geração (R\$/MW)	Tempo de vida (anos)
Santo Antonio - BA	<b>63156</b>	-	2386614	-	15
Gramacho -RJ	4099	205	5246247	721686	15
Toledo - PR	2955	-	3115661	255454	20
Varginha - MG	-	-	1530000	114750	20
Compilado de 26 Projetos –					
Sudeste*	4098	443	1725112	512474	15
<b>Média</b>	<b>3717</b>	<b>324</b>	<b>2800727</b>	<b>401091</b>	<b>17</b>

\* Os valores desse estudo não separam captação e geração de energia, para fazer essa relação foi utilizada a proporção de custos do aterro de Gramacho.

Fonte: (BARRAK, 2019; JACOBOWSKI, 2018; MARTINS; SILVA; CARNEIRO, 2016; PNUD, 2010; SILVA, 2015)

**Tabela 10 - Estimativa de custos de implantação e manutenção de um sistema de captação de biogás e geração de energia num aterro sanitário**

Capacidade de recebimento de resíduos (t/dia)	4000
Potencial de geração de energia (MW)	15
Implantação captação (R\$)	R\$ 14.868.655,88
Operação e manutenção da captação (R\$)	R\$ 1.296.791,47
Implantação geração(R\$)	R\$ 56.014.532,13
Operação e manutenção geração (R\$)	R\$ 42.010.899,10
Tempo de vida (anos)	R\$ 6.016.362,81
<b>Total investimento</b>	<b>R\$ 56.879.554,98</b>
<b>Total Operação e Manutenção (ano)</b>	<b>R\$ 7.313.154,28</b>

Fonte: Autoria própria

Foi utilizada a capacidade de 4000t/dia de resíduos devido as dimensões do aterro sanitário, porém a previsão é de receber uma quantidade de resíduos abaixo dessa, como já descrito anteriormente.

#### 4.3 Análise econômica aterro com geração de energia

Para a análise econômica desta opção de destinação de resíduos será considerado a destinação de 3106,82 t/dia e a construção de dois aterros de grande porte, com capacidade de receber 2000t/dia cada. Os custos dos dois aterros estão descritos na Tabela 11

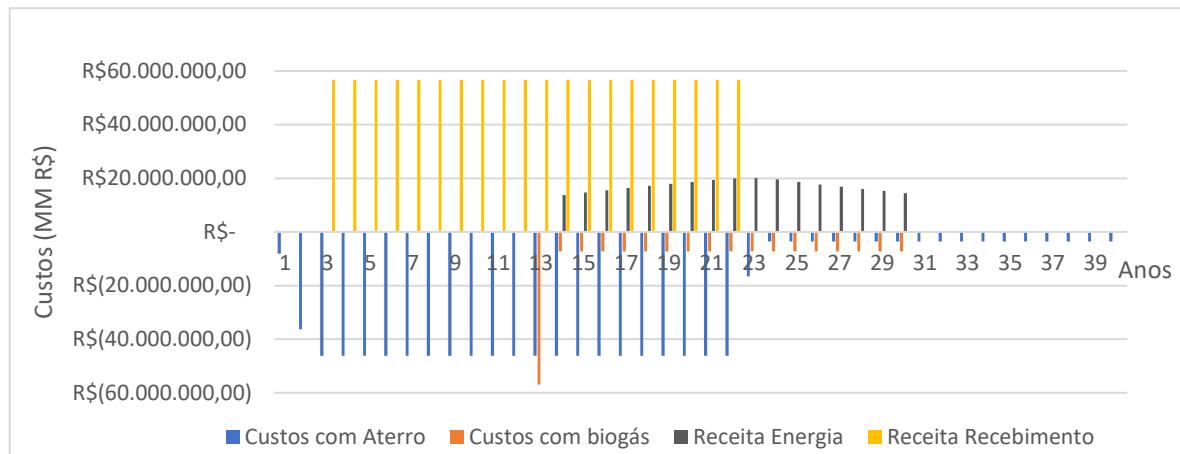
**Tabela 11 - Custos para implantação de dois aterros sanitários com capacidade total de 4000t/dia**

Etapa	Participação sobre o total	Custo por etapa (R\$)
Pré implantação	0,77%	8.130.922
Implantação	3,46%	36.339.562
Operação	87,77%	922.988.104
Encerramento	1,23%	12.977.778
Pós encerramento	6,77%	71.151.968
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>1.051.588.334</b>

Fonte: Elaboração própria

Os fluxos de entrada e saída podem ser descritos conforme a figura 12 contendendo as entradas resultantes da venda de energia elétrica a R\$167,09/MWh, conforme média dos valores entre out/2019 e out/2020 (CCEE, 2020). O tempo de vida dos projetos avaliadas foi de 15 anos, por tanto, foi selecionado o período de 17 anos com maior produção de biogás para a usina de geração de energia estar funcionando. O período entre o ano 14 e o ano 30. Foi considerado o valor de R\$50/t de resíduo o valor a ser cobrado pela disposição dos resíduos. Na imagem abaixo podemos observar os valores obtidos o fluxo de caixa. Assim como a VPL, a TIR e o Payback obtidos, para uma TMA = 16%, estão apresentados na tabela 12. A TMA de 16% foi justificada no capítulo 4.2.

**Figura 12 - Fluxo de caixa aterro sanitário com recuperação energética**



Fonte: Autoria Própria

**Tabela 12 - Índices de avaliação de viabilidade econômica aterro sanitário com recuperação energética**

Índice	Valor
TMA	16%
TIR	21,21%
Payback	6
VPL	R\$ 12.452.725,04

Fonte: Autoria própria

Pelo valor presente líquido ser positivo o projeto é viável economicamente e agregar a geração de energia aumenta a VPL e a TIR mesmo sendo implantada no meio do projeto apenas. Caso fosse possível diminuir os custos de operação do sistema de captação de biogás e geração de energia, além de projetar um tempo de vida do projeto maior, seria possível manter a geração de energia mesmo após o aterro ser desativado. Dessa forma seria possível amenizar os custos com pós encerramento e aumentar ainda mais o retorno financeiro ao projeto. O *payback* em 6 anos possibilitaria a construção de uma reserva financeira para realizar o investimento do sistema de biogás no ano 13, não sendo necessário ao investidor realizar financiamentos ou despesar mais capital.

#### 4.4 Combinação biodigestores e aterro sanitário

A gestão de resíduos nessa combinação entre biodigestor e aterro sanitário dividiria os resíduos domiciliares entre resíduos destinados aos biodigestores, que seriam os orgânicos,

e os demais resíduos que seriam encaminhados ao aterro sanitário, este sem capacidade de produção significativa de biogás devido à ausência de materiais orgânicos.

Nessa estrutura de gestão a quantidade de resíduos destinados a aterros fica conforme a Tabela 13.

**Tabela 13 - Resíduos destinados no aterro sanitário para sistema combinado com biodigestor anaeróbio**

Tipo de Matéria	Participação (%)	Total Agrupamento Sudeste
Material reciclável	44%	869
Papel, papelão e jornal	21%	416
Outros	35%	686
Total	100	1971

Fonte: Autoria própria

A quantidade de resíduos total oriundos do agrupamento sudeste necessitaria de apenas um aterro de grande porte, com capacidade 2000t/dia, para realizar a disposição final.

Para o biodigestor será enviado todo o material orgânico, os quais foram considerados como resíduos orgânicos alimentares para ambas as estimativas. O valor total de material orgânico a ser recebido na usina de biodigestão anaeróbia é 1110,91 t/dia.

Com base no estudo de (LEITE, 2016) foi identificado os custos e receitas estimados para biodigestores anaeróbios DRANCO e KOMPOGAS. Os valores foram estimados em 2016 e trazidos para valores 2020 através do índice IPCA. Foi utilizada a calculadora do Banco Central do Brasil. O valor de venda de energia para o cálculo foi R\$ 185,52/MWh. Os valores estão descritos na Tabela 14 e os valores estimados para o agrupamento sudeste está na Tabela 15.

**Tabela 14 - Custos de implantação e operação e receita estimada para biodigestores com base na tecnologia DRANCO e KOMPOGAS**

Implantação	R\$ 164.931.701,00
Operação	R\$ 29.663.975,00
Quantidade de resíduos (t/ano)	30.1125
Potência anual (MWh)	71.200
Razão de metano no biogás	57%
Implantação por resíduo (R\$/t/ano)	R\$ 547,72
Operação por resíduo (R\$/t/ano)	R\$ 98,51

Receita de venda de energia por resíduo (R\$/t)

R\$ 39,51

Fonte: Autoria própria com dados de LEITE (2016)

**Tabela 15 - Custos de implantação e operação e receita estimada de um biodigestor anaeróbio para o agrupamento sudeste de São Paulo**

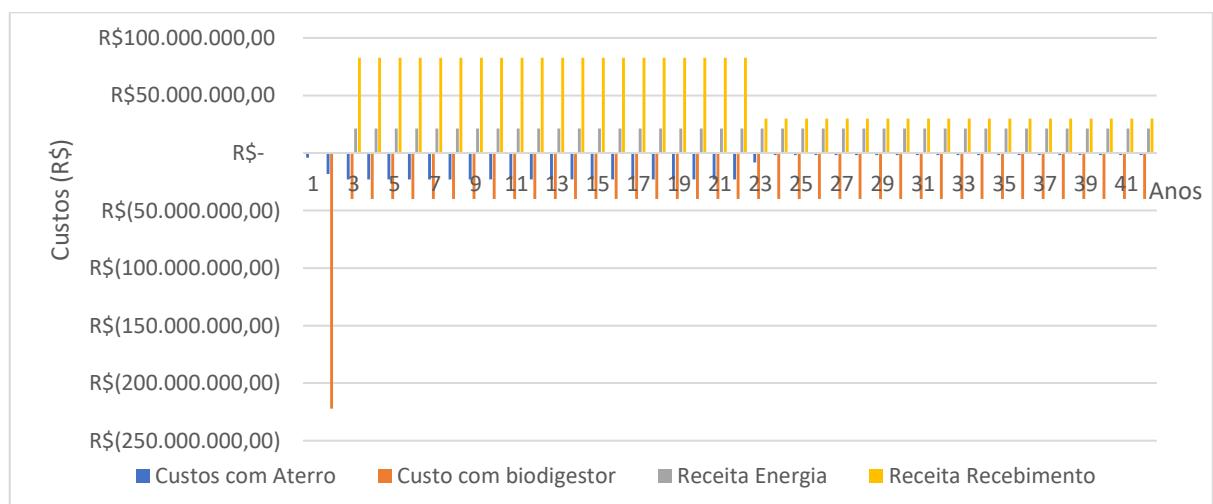
Quantidade de resíduos orgânicos (t/ano)	405.482,15
Implantação biodigestor anaeróbio	R\$ 222.090.031,46
Operação biodigestor anaeróbio	R\$ 39.944.250,26
Receita de venda de energia (ano)	R\$ 16.020.253,19

Fonte: Autoria própria

Considerando que a cidade de São Paulo consomiu 27.511.917MWh no ano de 2019 (SIMA, 2020), a quantidade de energia produzida neste sistema seria capaz de suportar 0,26% da energia demandada na cidade. Porém em relação ao consumo residencial, que foi 11.231.739 MWh (SIMA - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE, 2020) a quantidade de 0,63%. Esse valor corresponde a 76.714 habitantes, se considerarmos a população como 12.176.866 habitantes, conforme informado pelo IBGE (2019)

Para cálculo do fluxo de caixa foi considerado o tempo de vida do biodigestor sendo 40 anos, assim como o aterro. Porém o biodigestor pode continuar a receber resíduo até o último ano enquanto o aterro recebe 20 anos de resíduos apenas. Considerando como R\$50,00 o valor pego pelo recebimento de 1 tonelada de resíduo chegamos nos seguintes valores de fluxo de caixa descritos na Figura 13 e na Tabela 16, considerando TMA = 16%, conforme já explicado.

**Figura 13 - Fluxo de caixa de um sistema aterro sanitário e biodigestor anaeróbio**



**Tabela 16 - Índices de avaliação de viabilidade econômica aterro sanitário com biodigestor**

Índice	Valor
TMA	16%
TIR	-
<i>Payback</i>	-
VPL	<b>-R\$ 165.601,789,44</b>

Fonte: Autoria própria

Como a VPL foi negativa, este cenário não apresenta viabilidade econômica para o recebimento e tratamento de resíduos, também não apresenta *payback* ou TIR. Não é aconselhado realizar um investimento nessas condições de projeto. Para entender como um biodigestor pode ter a viabilidade econômica foi realizado a sugestão de outros cenários

## 4.5 Comparação de cenários

### 4.5.1 Cenários com variação do valor de recebimento de RSU

Variamos os valores a serem pagos pelo município pela destinação do resíduo. Os valores foram variados do valor em que a VPL do projeto de aterro sanitário sem biodigestor se iguala a zero, um valor intermediário e o valor em que a VPL do biodigestor se iguala a zero. Os valores precisaram ser elevados em 30,43 reais por tonelada de resíduo, o que pode ser considerado bastante elevado devido a massa de resíduos total ser 3106,82 t/dia. Ou seja, o custo diário é 94.540,53 reais maior para que o biodigestor apresente VPL = 0 e seja um investimento viável. Os valores estão expostos no Quadro 3.

**Quadro 3 - Taxa de recebimento de resíduo para igualar VPL dos projetos a zero**

Taxa do recebimento de 1t de RSU	Aterro com recuperação energética		Aterro combinado com biodigestor	
	VPL	TIR	VPL	TIR
R\$ 47,85	0	16%	<b>-R\$ 178.183.476,46</b>	-
R\$ 60	<b>R\$ 70.411.709,01</b>	44%	<b>-R\$ 107.042.574,97</b>	-
R\$ 78,28	<b>R\$ 176.360.731,73</b>	79%	0	16%

Fonte: Autoria própria

#### 4.5.2 Cenário variando a proporção de metano no biogás do biodigestor

A composição do biogás pode variar dependendo do tipo de resíduo, por isso variou-se as proporções de metano no biogás próximo a valores encontrados em estudos de caso realizado pela PROBIOGÁS (2015). Os valores são a expectativa de proporção de biogás dada pelos fornecedores nos estudos de caso, sendo 73% na Draco e 65% na Valorga. A usina de metanização extra seca Bekon forneceu o valor real de produção de metano no estudo, este sendo 71%. Estão apresentados na Tabela 17 os valores de recebimento de RSU necessário para zerar o VPL.

**Tabela 17 - Valores de VPL do projeto de aterro com biodigestor com variação da proporção de metano no biogás**

Proporção de Metano no Biogás	Valor do RSU para zerar o VPL do investimento (R\$)	Valor total de recebimento de resíduo por ano
57%	R\$ 78,28	R\$ 88.056.244,09
60%	R\$ 77,45	R\$ 87.119.113,64
65%	R\$ 76,15	R\$ 85.662.923,42
70%	R\$ 74,86	R\$ 84.206.733,21
75%	R\$ 73,56	R\$ 82.750.542,99

Fonte: Autoria própria

Apesar da proporção de metano aumentar a quantidade de energia elétrica produzida e vendida, esse valor ainda não é suficiente para fazer o biodigestor ser um investimento financeiramente viável frente ao aterro sanitário com recuperação energética. O valor da tonelada de resíduo, para a VPL ser 0, é R\$25,71 maior.

## 5. Conclusão

O presente trabalho avaliou duas possibilidades do manejo do resíduo sólido urbano do ponto de vista financeiro e foi avaliada uma vantagem R\$ 30,43 e R\$ 25,71 por toneladas de resíduos, no pior e melhor cenário de operação do biodigestor, considerando a taxa de metano no biogás. As variações financeiras sem relação a diferentes fração de metano no biogás não é tão significante. Com 57% de metano presente no biogás o valor da taxa de recebimento necessário para o projeto ser economicamente viável é R\$78,28 enquanto para

a composição do biogás com 75% de metano encontramos um valor de R\$73,56. Esse valor não altera de maneira significante a viabilidade do projeto.

Ao ser avaliado em larga escala, como no agrupamento sudeste da cidade de São Paulo o qual produz aproximadamente 3106,82 toneladas de RSU por dia, as quantias gatas com o biodigestor, com as diversas frações de metano, se tornam bastante superiores às encontradas com aterro sanitário. A diferença diária com a maior taxa de metano no biogás é R\$79.876,24.

Entretanto, pela PNRS, caso haja possibilidade de se efetuar o tratamento dos resíduos, caso do biodigestor anaeróbio, este deve ser priorizado e devem ser elaborados mecanismos de facilitar o acesso a esses serviços.

Por outro lado, esses valores são pagos pela prefeitura da cidade com o dinheiro dos cidadãos pagadores de impostos, os gestores devem discutir em suas políticas em conjunto com a sociedade para avaliar se a prioridade atual da cidade é o tratamento mais adequado dos resíduos e a energia como produto deste tratamento.

Porém segundo a PNRS deveriam ser propostos auxílios financeiros para facilitar a implantação deste tipo de tecnologia, porém não foram, ainda, editadas leis nacionais ou estaduais que fomentem e atraiam investimentos para este setor.

Outro ponto a ser lembrado é a questão estratégica da diversificação da matriz energética. Mesmo após a crise hídrica de 2015, a matriz segue dependente do setor hídrico. Os governos deveriam ter se planejados para ampliar as possibilidades de geração energética e o biogás pode ser uma ótima opção, por tratar do problema de gestão de resíduos e geração de energia.

Além da via econômica e estratégica, existe o problema tecnológico. Pelo o processo de tratamento de RSU através de biodigestores anaeróbios ser pouco maduro no Brasil, ainda existe grandes possibilidades de desenvolver essa tecnologia e, consequentemente, e aumentar a eficiência do processo, reduzir custos e adaptar essa tecnologia usada em larga escala no exterior para o contexto brasileiro.

## 6. Referências

- ABETRE, A. B. D. E. D. T. D. R.; FGV, F. G. V. **Estudo sobre os Aspectos Econômicos e Financeiros da Implantação e Operação de Aterros Sanitários** BMC Public Health, 2007. Disponível em: <<https://ejournal.poltekgal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298>> http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Abnt., p. 1–7, 1992.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2004. Resíduos Sólidos - Classificação. p. 1–605, 2004.
- ABRELPE, A. B. DE L. P. E R. E. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**, 2018. Disponível em: <[http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama\\_abrelpe\\_2017.pdf](http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf)>
- ABRELPE, A. B. DE L. P. E R. E. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**, 2019. Disponível em: <[www.abrelpe.org.br](http://www.abrelpe.org.br)>
- ALVES, I. R. DE F. S. Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos. 2008.
- AMLURB. **Coleta Resíduos Sólidos Urbanos.** Disponível em: <<http://dados.prefeitura.sp.gov.br/dataset/coleta-de-residuos-solidos-urbanos>>. Acesso em: 10 out. 2020.
- ARAUJO, G. JOSE FERRARESI DE. Análise energética, ambiental e econômica de biodigestores de circulação interna e concentradores de vinhaça para geração de eletricidade, fertilizantes e créditos de carbono em diferentes cenários econômicos. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 8, n. 1, p. 28–48, 2017.

BARRAK, E. ANÁLISE DO POTENCIAL TEÓRICO DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS NO ATERRA SANITÁRIO DE VARGINHA. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.8, p. 61–75, 2019.

BONFANTE, T. M. Análise da viabilidade econômica de projetos que visam à instalação de biodigestores para o tratamento de resíduos da suinocultura sob as ópticas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e da geração de energia. n. Mdl, p. 176, 2010.

BRASIL, P. DA R. Política Nacional de Resíduos Sólidos - LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Regulamento. . 2010, p. 1–19.

BRITO, F.; HORTA, C. J. G.; AMARAL, E. F. L. A urbanização recente no Brasil e as aglomerações metropolitanas. **Unmuddling Longitudinal Models**, v. 80, n. 9, p. 6592–6598, 2016.

CAIXETA, D. M. Geração De Energia Elétrica a Partir Da Incineração De Lixo Urbano : O Caso De Campo Grande-MS. **Monografia de Especialização**, p. 1–86, 2005.

CALLEFI, J. S. et al. Palavras-chave: Fibra Orgânica. Serragem. Viabilidade Econômica. Contenção de hidrocarbonetos.

---

1. p. 201–206, 2018.

CCEE, C. DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Preços médios**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/precos\\_medios?\\_afrLoop=260715349731974&\\_adf.ctrl-state=98zr9mc8q\\_40#!%40%40%3F\\_afrLoop%3D260715349731974%26\\_adf.ctrl-state%3D98zr9mc8q\\_44](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afrLoop=260715349731974&_adf.ctrl-state=98zr9mc8q_40#!%40%40%3F_afrLoop%3D260715349731974%26_adf.ctrl-state%3D98zr9mc8q_44)>. Acesso em: 10 out. 2020.

COELHO, T. C.; ALENCAR, R.; OLIVEIRA, R. M. S. DE. Estimativa Da Produção Teórica Do Metano Gerado No Aterro Sanitário De Palmas - To. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 7, n. 12, p. 1458–1470, 2011.

DE ABREU, A. E. S. Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades. 2015.

DE OLIVEIRA, L. G. et al. Viabilidade econômica de projeto de mecanismo de desenvolvimento limpo em aterro sanitário na cidade de Viçosa - MG. **Textos de Economia**, v. 17, n. 1, p. 100, 2014.

ECOURBIS. **Aterro Sanitário, c2020. EcoUrbis Ambiental.** Disponível em: <<https://www.ecourbis.com.br/destinacao.aspx?content=aterro-sanitario>>. Acesso em: 15 ago. 2020.

FARIAS, D. F. Estudo Para Implementação De Um Biodigestor Comunitário Em Comunidade De Baixa Renda. p. 79 p, 2009.

FEAM, F. E. DO M. A. Anaeróbio para a Biometanização da Fração. 2009.

FERNANDES, R. T. V.; SILVEIRA, B. D. A. DA; OLIVEIRA, M. R. DE. Planejamento urbano “open source”: Um estudo de caso na identificação de áreas para implantação de aterro sanitário. **Holos**, v. 8, p. 126, 2017.

FERREIRA, B. S.; BRÁS, I.; SILVA, M. E. Avaliação do efeito da recirculação de lixiviados num aterro sanitário. **Avaliação do efeito da recirculação de lixiviados num aterro sanitário.**, v. 2, n. 2, p. 107–117, 2017.

GARTNER, G. L. Geração de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos em condomínios verticais. 2015.

GOMES, F. C. DE S. P.; DE AQUINO, S. F.; COLTURATO, L. F. DE D. B. Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: Estado da arte e análise crítica das principais tecnologias. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 295–304, 2012.

GONÇALVES, F. D. S. IMPACTOS AMBIENTAIS RESULTANTES DO DESCARTE FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO LIXÃO DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DE PIRANHAS - PB. v. 151, p. 10–17, 2015.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: Impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciencia e Saude Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1503–1510, 2012.

GRIPP, W. G. **Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo**, 1998.

GRS-UFPE. Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. p. 188, 2014.

HENRIQUES, R. M. Aproveitamento Energético dos RSU: uma abordagem tecnológica. **Tese-UFRJ**, p. 204, 2004.

HTTPS://WWW.INFOENEM.COM.BR/WP-  
CONTENT/UPLOADS/2015/10/LIXAO.PNG. **Lixão.** Disponível em:  
<<https://www.infoenem.com.br/wp-content/uploads/2015/10/lixao.png>>. Acesso em: 19 dez. 2020.

I&T, G. DE RESÍDUOS; NRG. Estudo de alternativas de tratamento de resíduos sólidos. **Via Pública**, 2012.

IBGE. IBGE divulga as estimativas da população dos municípios para 2019. **Estatísticas Sociais**, n. Revisão 2018, p. 7, 2019.

JACOBOWSKI, M. **VIABILIDADE ECONÔMICA DA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO BIOGÁS: UM ESTUDO DE CASO NO ATERRA SANITÁRIO DE TOLEDO, PARANÁ.** [s.l.] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2018.

KOMPOGAS. **Anaerobic digestion.** Disponível em: <[https://www.hzinova.com/cms/en/?page\\_id=256#plants](https://www.hzinova.com/cms/en/?page_id=256#plants)>. Acesso em: 10 out. 2020.

LEITE, C. B. Tratamento de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético: avaliação econômica entre as tecnologias de digestão anaeróbia e incineração. p. 117, 2016.

LINHARES, D. D. C. et al. Prospecção tecnológica de processos de biodigestão anaeróbia com recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. n. 1, p. 1–8, 2017.

LUCIANA DIAS DE LUNA, M. et al. Tratamento Anaeróbio De Resíduos Sólidos Orgânicos Para Pequenas Comunidades. **Tratamento Anaeróbio De Resíduos Sólidos Orgânicos Para Pequenas Comunidades**, v. 29, n. 1, p. 24–34, 2008.

MARENKO, J. A. et al. **A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo**Revista USP, 2015.

MARQUES, E. Proposição econômica de arranjos logísticos para a gestão de reciclagem de resíduos da construção civil em consórcios intermunicipais. 2019.

MARTINS, L. O. S.; SILVA, L. T. E; CARNEIRO, T. A. F. **ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA DA IMPLANTAÇÃO DE USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE SANTO ANTÔNIO DE JESUS – BA.** **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2016.

- MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Production**, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.
- MINADEO, R. Fusões e Aquisições: Visão Panorâmica e Estudos de Casos Analisados Segundo o Modelo de Weisbach (1993). **Gestão.Org**, v. 15, n. 2, p. 589–602, 2017.
- MMA, M. DO M. A. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. **MMA Publicações**, p. 103, 2012.
- MONTAGNA, T. B. BIOGÁS PRODUZIDO EM ATERRAÇAMENTO SANITÁRIO COM FONTE DE ENERGIA - UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. 2013.
- OZCAN, H. K. et al. Municipal solid waste characterization according to different income levels: A case study. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 10, 2016.
- PERROT, J. F.; SUBIANTORO, A. Municipal waste management strategy review and waste-to-energy potentials in New Zealand. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 9, 2018.
- PNUD, P. DAS N. U. PARA O D.-. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável** Arcadis, 2010. Disponível em: <<http://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&from=export&id=L612330570%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1007/s00428-016-1997-7>>
- PROBIOGÁS, S. N. DE S. A. . B. **O estado da arte da tecnologia de metanização seca** *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2015.
- REICHERT, G. A. Aplicação da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos: uma Revisão. **Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, n. 1, p. 1–16, 2005.
- RODRIGUES, K. F. .; ROZENFELD, H. Análise de viabilidade econômica. **Grupo Engenharia Integrada e Engenharia de Integração**, p. 17, 2015.
- RODRIGUES, R. Análise econômica da utilização de resíduos agroindustriais em painéis de partículas: produção à base bagaço de cana-de-açúcar. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2018.
- SÃO PAULO. Dados Demográficos dos Distritos pertencentes as Subprefeituras. p. 5–8, 2010.

- SCHETTINI, L. Avaliação de aspectos geológicos e geotécnicos na implantação do Aterro Sanitário de São Carlos – SP , com o auxílio da geofísica. p. 187, 2016.
- SCHULZ, F. Biodigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. **Unisinos - Universidade Do Vale Do Rio Dos Sinos Ciências Exatas E Tecnológicas**, n. 1, p. 1–114, 2015.
- SHINODA, C. Viabilidade de projetos de investimento em equipamentos com tecnologia avançada de manufatura. Estudo de múltiplos casos na siderurgia brasileira. p. 176, 2008.
- SILVA, F. M. DA. BIOGÁS DE LIXO NO ATERRO SANITÁRIO DE GRAMACHO. 2015.
- SILVA, E. D. S.; DE OLIVEIRA, G. S. Biodigestor: Uma Proposta De Aproveitamento Do Lixo Orgânico No Município De Santarém. p. 11, 2014.
- SIMA - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE. Anuário de Energéticos por Municípios do Estado de São Paulo 2020 - ano base 2019. 2020.
- SINDIGÁS. **Evolução do preço do GLP Preço Paridade de Importação ( semanal ) x Preços médios ponderados dos produtores e importadores.** Disponível em: <[http://www.sindigas.org.br/novosite/?page\\_id=3020](http://www.sindigas.org.br/novosite/?page_id=3020)>. Acesso em: 10 abr. 2020.
- SISINNO; MOREIRA. [Evaluation of environmental contamination and pollution at the area under the influence of the Morro do Céu landfill dump in Niterói, Rio de Janeiro, Brazil]. **Cadernos de saude publica**, v. 12, n. 4, p. 515–523, 1996.
- SONTAG, A. et al. Análise de Viabilidade Econômica para Sistemas de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Marechal Cândido Rondon – PR. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 4, n. 3, p. 1–13, 2015.
- SOUTO, L.; RABBANI, E. R. K. Geração de Energia e Biogás usando biodigestores : uma opção ambientalmente correta para Região Metropolitana do Recife ... n. September, 2015.
- SSO, S. DE S. E O. **Contrato: 26/SSO/04 - Execução, sob regime de concessão, dos serviços divisíveis de limpeza urbana - Agrupamento SudesteSão PauloPortal de Transparência**, , 2004.
- TURDERA, M. V; YURA, D. No Município De Dourados. [s.d.].

VENTURA, M. M. O Estudo de Caso como Modalidade de Pesquisa. **Rev SOCERJ**, v. 20, n. 5, p. 383–386, 2007.

VIASOLO ENGENHARIA S.A. **Aterro controlado**. Disponível em: <<http://www2.viasolo.com.br/?sustentabilidade=educacao-ambiental/valorizacao-de-residuos/aterro-controlado>>. Acesso em: 19 dez. 2020.

VISENTIN, R. **VIABILIDADE ECONÔMICA DA COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO PARA FINS AGRÍCOLAS**, 2019.

YIN, R. K. **Estudo de caso planejamento e método**. 2<sup>a</sup> edição ed. [s.l: s.n.].