

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ENGENHARIA**

**ANÁLISE E GERENCIAMENTO DE RISCOS EM PLANTAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS
A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

PEDRO HENRIQUE BERTRAMI D'ANGELO

**São Paulo
2023**

ANÁLISE E GERENCIAMENTO DE RISCOS EM PLANTAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

PEDRO HENRIQUE BERTRAMI D'ANGELO

Monografia apresentada à Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética

Orientadora: Vanessa Pecora Garcilasso

**São Paulo
2023**

D'Angelo, Pedro Henrique Bertrami

Análise e Gerenciamento de Riscos em Plantas de Produção de Biogás a partir de Resíduos Sólidos Urbanos. / Pedro Henrique Bertrami
D'Angelo – São Paulo, 2023.

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

1.Biogás 2.Digestão Anaeróbia 3.Aterros Sanitários 4.Análise de Risco.
Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada.

RESUMO

A sociedade atual tem dedicado muitos esforços para a redução de emissões atmosféricas e aumento do uso de tecnologias sustentáveis em diversos setores. No setor de energia, uma das tecnologias que se apresenta como uma solução para diferentes problemas ambientais é o aproveitamento energético do biogás, gás combustível majoritariamente composto de metano, proveniente da decomposição anaeróbia do Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Esta solução, além de atacar o problema logístico de descarte de resíduos, promove ainda energia limpa se comparada às fontes fósseis tradicionais. Esta monografia apresenta o panorama atual do RSU no Brasil, as diferentes tecnologias para produção, purificação e uso do biogás e regulamentações vigentes para categorização do biogás como biometano, podendo ser aplicado em substituição ao gás natural. Por fim, detalha uma análise de riscos e medidas de controle em todas as etapas do processo. A análise compreende tanto os riscos técnicos quanto contratuais e ambientais que devem ser considerados em um projeto de produção e aproveitamento energético do biogás a partir de RSU.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Digestão Anaeróbia, Aterros Sanitários, Análise de risco.

ABSTRACT

Current Society has been putting a large amount of effort into reducing atmospheric emissions and into increasing the use of sustainable Technologies in different sectors. In the energy segment, one of the uprising Technologies, which presents itself as a solution for multiple environmental problems, is the use of the energetic potential of biogas, a flammable gas mostly composed of methane, produced from the anaerobic digestion of the organic fraction of Municipal Solid Waste (MSW). This solution, besides helping towards the logistic issue of waste disposal, provides clean energy, compared to traditional fossil fuels. This monography presents the current scenario of MSW in Brazil, the different technologies for production, purification and use of biogas, and the regulations for categorizing the biogas as biomethane, making it suitable for substituting the natural gas. Finally, it details a risk assessment and control measures throughout all phases of the process. The assessment comprehends technical, contractual, and environmental risks that must be tended to when developing a project for biogas production through MSW.

Keywords: Biogas, Anaerobic digestion, Landfills, Risk assessment.

ABREVIATÖES

ACL, Ambiente de Contrataç o Livre

ANP, Agência Nacional de Petróleo

CAPEX, Capital Expenditure

CCEE, Câmara de Comercializa o de Energia Elétrica

CSTR, Continuous Flow Stirred Reactor

EIA, Estudo de Impacto Ambiental

GEE, Gases de Efeito Estufa

GIZ, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit

GNV, Gás Natural Veicular

HAZOP, Hazard and Operability Study

LI, Licença de Instala o

LO, Licença de Opera o

LP, Licença Prévia

MME, Ministério de Minas e Energia

PCI, Poder Calorífico Inferior

PEAD, Polietileno de Alta Densidade

PLANARES, Plano Nacional de Resíduos

PLD, Preço de Liquida o das Diferenças

PNRS, Política Nacional de Resíduos Sólidos

PSA, Pressure Swing Adsorption

RSU, Resíduos Sólidos Urbanos

SLA, Service level agreement

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Hierarquia de estratégias preferíveis para gerenciamento de resíduos.....	14
Figura 2.2 - Destinação final de RSU no Brasil.....	16
Figura 2.3 - Composição típica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil.....	17
Figura 2.4 - Passo a passo da digestão anaeróbia.....	18
Figura 3.1 - Descrição das etapas da digestão anaeróbia.....	23
Figura 3.2 - Representação esquemática de um reator CSTR.....	25
Figura 3.3 - Esquema de um reator do tipo garagem com aproveitamento de calor para.....	26
controle de temperatura.	
Figura 3.4 - Exemplo de alocação de um aterro com impermeabilização com geomembrana.....	27
de PEAD.	
Figura 3.5 - Composição de um aterro sanitário para produção de biogás	27
Figura 3.6 - Trocador de Calor tipo Casco-Tubo.....	28
Figura 3.7 - Diagrama típico do processo de Water Scrubbing.....	29
Figura 3.8 - Diagrama típico do processo de PSA (Pressure Swing Adsorption)	30
Figura 3.9 - Processo de separação por membrana (com três estágios)	31
Figura 3.10 - Equipamento danificado por incrustação de siloxanos	33
Figura 4.1 - Fluxograma simplificado da planta considerada neste estudo de caso	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Requisitos de pureza do biogás para categorização como biometano.....	22
Tabela 4.1 - Matriz de risco considerada para efeito deste trabalho.....	36
Tabela 4.2 - Análise dos riscos relacionados ao fornecimento de RSU e suas medidas de controle.....	38
Tabela 4.3 - Análise dos riscos construtivos e suas medidas de controle.....	38
Tabela 4.4 - Análise dos riscos operacionais e suas medidas de controle.....	39
Tabela 4.5 - Riscos no processo de captação do biogás.....	40
Tabela 4.6 - Riscos do processo de remoção de umidade do biogás.....	40
Tabela 4.7 - Risco nas colunas de adsorção e consequente falha na remoção de impurezas.....	41
Tabela 4.8 - Riscos na etapa de uso do biogás (na usina de geração).....	42

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 – Reação de oxidação de um siloxano, resultando na produção de SiO ₂	32
---	----

Índice

1-	Introdução	11
2-	Revisão Bibliográfica.....	13
2.1	Conceitos gerais em Resíduos Sólidos Urbanos	13
2.2	Cenário do RSU no Brasil	16
2.3	Produção de biogás a partir de RSU: Digestão Anaeróbia	18
2.4	Produção de biogás a partir de RSU: Gás de aterros sanitários	20
2.5	Tratamento e purificação de biogás.....	20
2.6	Regulamentações para tratamento de Biogás	21
3-	Plantas de Produção de Biogás.....	23
3.1	Produção de biogás de RSU em reatores de digestão anaeróbia	23
3.2	Produção de biogás de RSU em aterros sanitários.....	26
3.3	Tratamento e purificação de biogás.....	28
4-	Gerenciamento de riscos em plantas de produção de biogás a partir de RSU – Um estudo de caso ..	34
4.1	Riscos Técnicos	37
4.2	Riscos Ambientais.....	42
4.3	Riscos Contratuais	44
5-	Conclusões.....	47
6-	Bibliografia.....	50

1- Introdução

O estilo de vida de parte da população mundial atual apresenta hábitos de consumo que levam a uma grande produção de lixo. Estes resíduos são produzidos em todos os setores da sociedade, agropecuária, indústria, residências, comércios, construção etc. Este trabalho abordará os riscos inerentes a uma das formas de aproveitamento energético de um destes tipos de resíduo, o biogás produzido a partir de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), originados majoritariamente por residências, comércio e limpeza urbana.

A decomposição destes resíduos provoca severos danos ambientais, desde a emissão de gases poluentes até a infiltração de líquidos tóxicos que podem contaminar o solo e reservas de água. Isso faz de seu descarte um grande desafio. Uma das formas de reduzir estes impactos é através de tratamentos de superfície no solo onde os resíduos são depositados, evitando assim a infiltração do líquido (chorume). Outra forma tradicional é a queima do gás produzido pela decomposição deste material, denominado biogás. Este biogás é resultado de um processo de digestão anaeróbia da fração orgânica do lixo, realizada por conjuntos de bactérias, e é composto majoritariamente por metano (CH_4), gás que contribui para o aquecimento global cerca de 21 vezes mais que o dióxido de carbono (CO_2) (NGER, 2022). Ao queimá-lo, é produzido CO_2 , reduzindo significativamente a emissão de gases de efeito estufa (GEE).

O metano é o principal componente de um dos combustíveis gasosos mais utilizados no mundo, o gás natural. Apesar de seus impactos negativos se liberado à atmosfera, o metano é muito útil à sociedade pois é um gás inflamável com elevado poder calorífico inferior (PCI), de 11.950kcal/kg (Termal Fluids Central, 2011). Essa propriedade faz do biogás uma promissora alternativa energética, em substituição ou complemento a fontes fósseis de energia.

Existem duas formas de produção de biogás a partir de RSU: aterros sanitários e reatores. Para cada um destes segmentos, existem diferentes tecnologias para controle da produção, aumento de eficiência e purificação do gás produzido. Historicamente, o biogás produzido é queimado em um *fare*, um queimador no qual é feita a combustão do metano, produzindo CO_2 , gás com potencial de efeito estufa muito inferior ao metano. Hoje, cresce a produção de biogás para aproveitamento energético, isto é, ao invés de queimado em *flare*, o gás é utilizado para geração de energia elétrica, cocção, mobilidade, entre outros.

O uso final do biogás determinará o rigor com o qual deve ser tratado. Para uso em cocção, por exemplo, usualmente se faz a remoção de H_2S (sulfeto de hidrogênio, resultado da redução de peptídeos, aminoácidos e sulfatos) e de água somente. Para aplicações mais exigentes, tal qual o uso como combustível veicular ou injeção na rede de gás, os tratamentos vão muito além, pois, para estes casos, o biogás deve possuir composição equivalente ao gás natural, e para isso, é necessário que seja removido da sua composição também o CO_2 , transformando-o em biometano

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo avaliar os riscos técnicos, contratuais e ambientais, inerentes a uma instalação de produção de biogás provenientes de RSU, tanto pela sua disposição em aterro sanitário, quanto pelo tratamento anaeróbio da fração orgânica presente no RSU. As análises foram realizadas por meio da metodologia Hazop (Hazard and Operability Study), um método de mapeamento, quantificação e gerenciamento de riscos. O método, que possui grande importância na indústria, foi adotado por se aplicar não só a riscos de segurança, mas também riscos de eficiência causados por desvios em processos.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Diagnosticar e quantificar riscos técnicos, contratuais e ambientais para o estudo de caso de planta de geração de energia elétrica através de biogás produzido a partir de RSU em duas situações distintas: (i) biogás produzido em aterro sanitário e; (ii) biogás produzido a partir do tratamento anaeróbio da fração orgânica do RSU;
- Diagnosticar e quantificar riscos técnicos, contratuais e ambientais para o estudo de caso de uma planta de tratamento do biogás;
- Propor medidas mitigatórias, de modo a reduzir a severidade ou probabilidade de ocorrência dos riscos analisados.

1.2 Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido a partir de dados secundários provenientes de referências bibliográficas, tanto de artigos acadêmicos quanto de estudos de caso e de documentação técnica de empresas do setor. Com base na literatura, foi realizado um levantamento dos possíveis riscos, suas causas e impactos. Foram levantadas também as possíveis medidas de controle para gerenciamento destes riscos.

1.3 Estrutura do Trabalho

Após a introdução, objetivos e metodologia, o Capítulo 2 deste trabalho apresenta um panorama do setor de RSU no Brasil, bem como as principais tecnologias disponíveis para disposição e tratamento de RSU, como aterros sanitários e reatores de digestão anaeróbia, além de unidades de tratamento do biogás. Por fim, fornece uma visão geral das presentes regulamentações existentes.

O Capítulo 3 detalha o processo da biodigestão e detalha as tecnologias de produção e tratamento do biogás. Uma vez compreendidos os processos, o Capítulo 4 apresenta a análise de riscos de um estudo de caso com objetivo de geração de energia elétrica a partir de biogás produzido a partir de RSU e tratado. O método selecionado para realizar a análise e gerenciamento dos riscos foi o *Hazop*.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e considerações finais do trabalho.

2- Revisão Bibliográfica

Este capítulo traz o contexto atual dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil, introduz as formas de produção de biogás a partir de RSU e seu tratamento. Por fim, estabelece o cenário atual de legislações e regulamentações vigentes no Brasil para este setor, especialmente focado nos requisitos de tratamento para diferentes aplicações.

2.1 Conceitos gerais em Resíduos Sólidos Urbanos

A definição precisa de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) possui variações em diferentes locais, mas pode-se entendê-lo como qualquer resíduo (lixo) produzido pelas populações urbanas. Este conjunto de resíduos engloba o lixo residencial, mas pode também incluir resíduos industriais ou produzidos por outros tipos de estabelecimentos, como escolas e comércios.

No Brasil, a Lei 12.305/2010, que instituiu o Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) define resíduos sólidos como “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se 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 técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”. Os resíduos sólidos urbanos são definidos especificamente como aqueles resíduos sólidos de origem domiciliar ou oriundos da limpeza urbana (PLANARES, 2022).

O RSU tem por natureza ser muito diverso. Pode conter material orgânico (biodegradável ou compostável), como restos de alimentos e resíduos vegetais, material reciclável, como plásticos, metais e papéis, e diversos outros tipos de resíduos que não se encontram em nenhuma dessas categorias.

Mesmo com medidas de redução, é esperado que, com o desenvolvimento da sociedade, aumente-se o volume de resíduos gerados, pois aumenta-se a população e perfil de consumo. Um estudo do Banco Mundial aponta que a produção global de RSU deve subir de 2,01 bilhões de toneladas em 2016 para 2,59 bilhões em 2030 e 3,40 bilhões em 2050 (The World Bank, 2018). Com isso, torna-se cada vez mais imperativa a necessidade de tecnologias e políticas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

A correlação entre desenvolvimento e produção de resíduos fica clara ao se analisar diferentes regiões do mundo. Em 2016, todo o continente africano produziu 174 milhões de toneladas de RSU, o que equivale a uma produção per capita de 143kg/hab/ano (ONU, 2017). Por outro lado, no mesmo ano, a União

Europeia produziu 493kg/hab/ano (Eurostat, 2023). Em 2018, a produção per capita nos Estados Unidos foi de 805kg/hab/ano (EPA, 2011). No Brasil, em 2016, a produção foi de 380kg/hab/ano (ABRELPE, 2016).

Existem três macroestratégias que devem ser executadas antes do descarte dos resíduos. São elas Redução, Reuso e Reciclagem. Redução refere-se às políticas socioculturais que visam diminuir o volume de resíduos produzidos pelas populações; reuso pode ser tanto dar uma nova utilidade a um recurso que seria descartado ou reutilizar para a mesma finalidade que possuía originalmente. Em ambos os casos, a ideia é prolongar a vida útil de um recurso, requerendo menor produção; Reciclagem é o processamento do material para produção de novos produtos, através da mesma matéria prima.

A Figura 2.1 mostra, de forma macro, as 4 destinações para os resíduos, em ordem de preferência. Ela mostra que o descarte deve ser realizado somente caso não seja possível reutilizar ou reciclar os resíduos. Ainda assim, aliado ao descarte, aparece o tratamento, como estratégia mitigatória de riscos, que passam por poluição do ar, de corpos d'água, danos à saúde humana e de outras formas de vida na região do descarte.

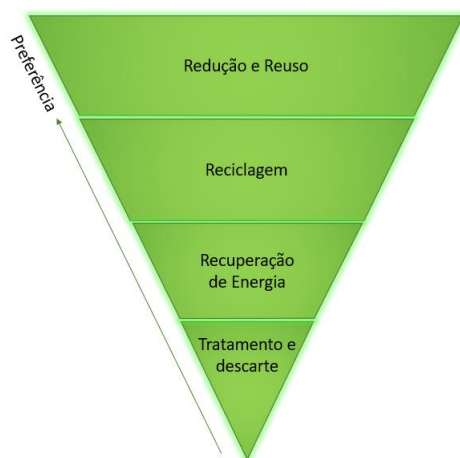


Figura 2.1 - Hierarquia de estratégias preferíveis para gerenciamento de resíduos. Fonte: Traduzido de EPA, 2021.

Quanto à disposição de RSU, a forma inadequada de descarte são os lixões. Neste tipo de descarte, não existe tratamento superficial do solo, de modo que este tipo de instalação permite a penetração de substâncias tóxicas (conhecida popularmente como “chorume”) no solo, podendo afetar a vida vegetal e animal nos arredores e poluição de corpos d'água subterrâneos, como lençóis freáticos. Além disso, nos lixões não há controle do tipo de resíduo depositado e nem há estrutura correta para disposição desse resíduo.

Os lixões representam ainda um grande problema social, pois além de promover a proliferação de animais como ratos e baratas, são locais de trabalho de muitos catadores, que ficam expostos a condições

insalubres e doenças. Alguns destes catadores inclusive residem no local ou sua proximidade, aumentando a exposição.

A forma de disposição mais adequada é o aterro sanitário. Ao contrário dos lixões, os aterros passam por um processo de impermeabilização do solo com uma lona adequada, para impedir a infiltração de chorume no solo e consequente contaminação. Além disso, os aterros possuem sistemas de captação de biogás, conjunto de gases produzidos pela digestão anaeróbia da matéria orgânica presente no RSU, composto basicamente por metano (CH_4 , cerca de 40%-60%) e o dióxido de carbono (CO_2) (Sullivan P., 2010). Quanto maior a concentração de metano, maior será o poder calorífico inferior (PCI) do combustível, sendo que o PCI do metano (100%) é de 34.300kJ/m^3 . Devido à natureza do resíduo, existem ainda contaminantes que devem ser filtrados para certas aplicações do gás, como o H_2S e Siloxanos (Petersson, A. et al, 2009).

O biogás captado pode ser utilizado como combustível para diferentes aplicações. Alguns usos são menos exigentes quanto à qualidade do biogás, como cocção e aquecimento. Outros já requerem maior cuidado com a composição e tratamento do combustível, como em plantas de geração de energia elétrica, tipicamente feita através de geradores acionados por motores a combustão. Existem ainda aplicações em que o biogás pode ser utilizado como substituto ao gás natural após passar por um tratamento muito mais refinado, que será abordado nas seções seguintes deste trabalho. Após este tratamento, o biogás passa a ter composição muito similar à do gás natural, sendo então chamado de biometano e podendo ser aplicado em veículos a gás ou mesmo comercializado no mercado de gás natural.

Em relação ao tratamento dos RSU, uma das opções é a incineração. Embora seja efetiva na redução de volume de resíduos (entre 85% e 90%), e pode ser utilizada para aproveitamento energético, a incineração provoca a emissão de diversos poluentes, como metais pesados, dioxinas e furanos, que apresentam um desafio no descarte (COELHO, 2020). Devido à redução de volume de resíduos e ao custo de implantação de sistemas de tratamento de emissões adequado, este tipo de solução é muito visto em países desenvolvidos com limitações de território, como o Japão e Suíça. Esta estratégia de gerenciamento de resíduos, no entanto, não será o foco deste trabalho.

Existem ainda outras tecnologias mais modernas, mas que ainda possuem pouca contribuição no panorama de gerenciamento de resíduos mundial, como a gaseificação e a pirólise, que utilizam a parcela não orgânica do resíduo para produção de gás sintético, majoritariamente composto de H_2 e CO . Além do gás, que pode ser utilizado como combustível, o processo produz um resíduo sólido com grande aplicabilidade no ramo de fertilizantes (Kaza S et. al, 2018).

2.2 Cenário do RSU no Brasil

Em 2022, o Brasil produziu 81,811 milhões de toneladas de RSU (ABRELPE, 2022). Dez anos antes, em 2012, este número foi de 73,386 milhões de toneladas (ABRELPE, 2012). Neste período, o crescimento foi de 11,48%, contra um aumento populacional de 8,32%.

O relatório da Abrelpe aponta ainda que a cobertura de coleta de RSU é de 93,04%, sendo o maior percentual no Sudeste (98,6%) e o menor no Nordeste (82,70%). Deste montante, 61% possuem destinação adequada, para aterros sanitários. O restante segue recebendo tratamento indevido, em lixões e aterros controlados e, portanto, provocando impactos ambientais, riscos de saúde e de segurança. A Figura 2.2 apresenta a destinação final de RSU no Brasil

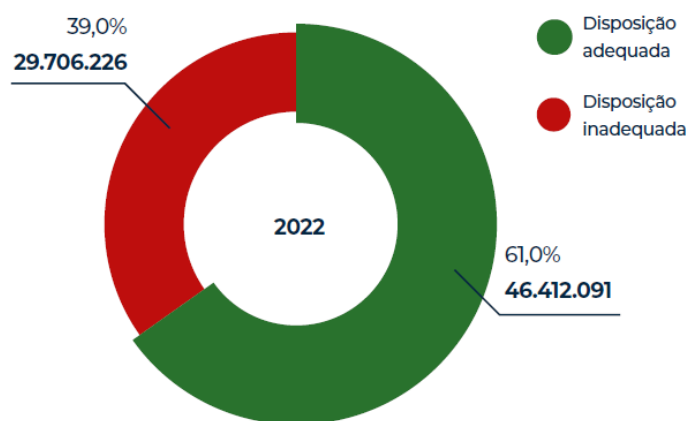
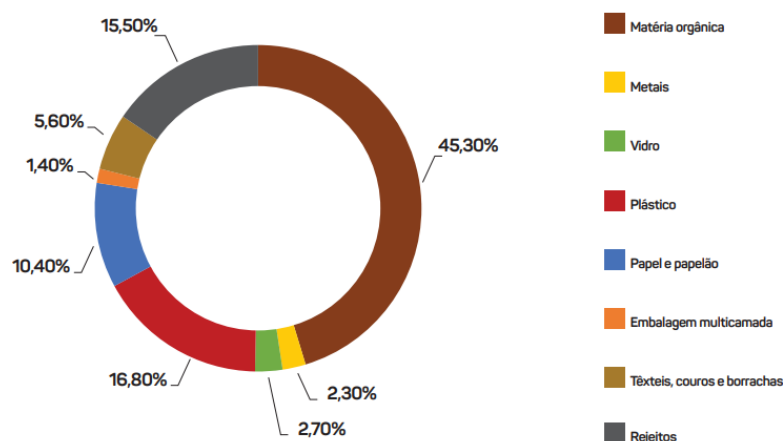


Figura 2.2 - Destinação final de RSU no Brasil. Fonte: ABRELPE - Panorama 2022.

Do resíduo destinado a aterro sanitário, é possível a implementação de medidas de aproveitamento energético. Tipicamente este aproveitamento se dá através da captura do gás produzido no interior do aterro, que pode, após tratamento adequado ao fim, ser aplicado como gás para cocção e aquecimento, queimado em grupos motogeradores para geração de energia elétrica ou ainda injetados na rede nacional de gás natural. Para cada uma destas aplicações, existe um conjunto de características e tratamentos requeridos.

O gás produzido nos aterros é produzido a partir da fração orgânica. Segundo publicação da Abrelpe de 2020, a fração orgânica do RSU coletado no Brasil tipicamente representa cerca de 45,3% da massa total de resíduo coletado. A composição total dos RSU estimada pela ABRELPE é apresentada na Figura 2.3.



Fonte: ABRELPE, 2020.

Figura 2.3 - Composição típica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil. Fonte: ABRELPE, 2020.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída a em 2010 a partir da Lei Federal Nº 12.305. A Lei estabelece as diretrizes a serem seguidas para a gestão de resíduos sólidos no Brasil, abrangendo os papéis do governo federal, dos estados e municípios, bem como do setor privado. A política estabelece diversas um regime de responsabilidade compartilhada, o que torna difícil a gestão. Além disso estabelece diversas metas.

Apesar de instituída em 2010, a PNRS não entregou ainda os resultados esperados e definidos no documento. Ela estabeleceu, por exemplo, a extinção dos lixões até 2014. No entanto, em 2022, 39% do RSU coletado no Brasil recebeu destinação inadequada (Abrelpe, 2022).

Em 13 de Abril de 2022, através do decreto 11.043, o Ministério de Minas e Energia (MME) divulgou o Plano Nacional dos Resíduos Sólidos (Planares). O plano é previsto na Lei 12.305 e tem como principal objetivo definir a estratégia federal para que se atenda ao disposto na PNRS. O Planares tem como uma de suas metas “Eliminar práticas de disposição final inadequada e encerrar lixões e aterros controlados” até 2024. Além disso, outra meta do plano visa reciclar 20% de toda a massa de RSU produzida até 2040 (Planares, 2022).

Outra meta do Plano é, até 2040, recuperar fração orgânica equivalente a 13,5% da massa total de RSU em sistemas de compostagem e digestão anaeróbia, reduzindo assim emissões de gases de efeito estufa (GEE) e diminuição de custos de transporte e volume de resíduos destinados aos aterros (Planares, 2022).

Até 2040, o Planares estabelece ainda que 4% da massa de RSU seja processada em reatores de digestão anaeróbia com aproveitamento energético do biogás, e todos os aterros terão eficiência mínima de 50% de captação destinada a aproveitamento energético. Estes dois segmentos poderão produzir energia elétrica suficiente para alimentar 9,5 milhões de residências (Planares, 2022).

2.3 Produção de biogás a partir de RSU: Digestão Anaeróbia

Uma das formas de produção de biogás é a digestão anaeróbia em reatores. Este processo pode ser feito com resíduos agropecuários, resíduos alimentares industriais, esgoto e com resíduos sólidos urbanos. O processo de digestão anaeróbia ocorre com a fração orgânica do substrato, ou seja, do material que está sendo tratado. É um processo complexo e compreende um ecossistema de microrganismos que, em diferentes etapas, produzem o biogás e tem como resíduo o digestato.

A biodigestão é composta por 4 etapas (Cremonese et al., 2013). O processo é ilustrado na Figura 2.4.

- Hidrólise: Nesta etapa, cadeias carbônicas complexas são quebradas em compostos mais simples, facilitando a absorção do substrato pelos microrganismos responsáveis pela acidogênese.
- Acidogênese: O material resultante da hidrólise é então convertido em ácido acético, ácidos graxos, CO_2 e outros compostos em menor quantidade.
- Acetogênese: Na acetogênese, bactérias processam os ácidos graxos e excretam ácido acético, hidrogênio e CO_2 .
- Metanogênese: Na metanogênese, um conjunto de bactérias produz metano a partir do ácido acético enquanto outro grupo utiliza o hidrogênio e CO_2 .

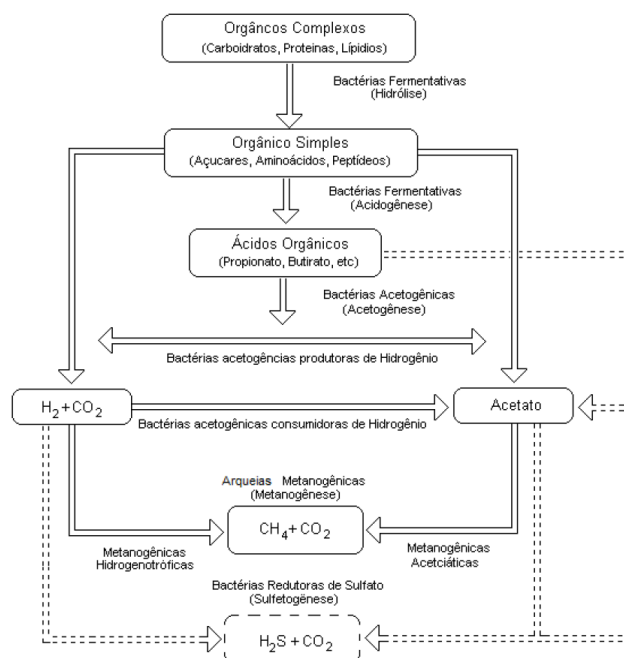


Figura 2.4 - Passo a passo da digestão anaeróbia. Fonte: ALVES, Elton, 2010.

A biodigestão é um processo que ocorre naturalmente, em diversas situações. Em plantas de produção de biogás, o sistema é dimensionado para que esse processo ocorra de forma otimizada. Conforme observado na Figura 2.4, existe uma grande interdependência entre os microrganismos que compõe a colônia existente no reator e um desequilíbrio pode provocar o colapso de todo o processo. Para isso, diversos fatores devem ser controlados, como:

- pH: a solução deve ter pH estritamente neutro, mas pode variar entre 6 e 8. Em soluções ácidas, não ocorrem os processos enzimáticos enquanto em soluções alcalinas, a etapa acidogênica deixa de ocorrer e os produtos do processo não serão CH_4 e CO_2 (Cremonez et al., 2013)
- Temperatura: os microrganismos responsáveis pelo processo de digestão anaeróbia são mesofílicos. Ou seja, prosperam em temperaturas entre 20°C e 45°C (COELHO, 2020). Embora seja uma temperatura ambiente, diversos reatores possuem controles de temperatura, buscando mantê-la sempre em sua temperatura ótima.
- Concentração de sólidos totais: um excesso de sólidos prejudica a eficiência do processo. Cada tipo de biodigestor será projetado para uma especificação de substrato. Um biodigestor CSTR (Reator tanque com mistura contínua), por exemplo, trabalha com substratos mais densos, com teor de sólidos totais de 15% a 20% (PROBIOGÁS, 2015). Tecnologias de reatores mais utilizadas serão aprofundadas no Capítulo 3.
- Tempo de Retenção Hidráulica: é o tempo que o substrato fica no reator. Ele deve ser suficiente para que os sólidos sejam processados, garantindo aproveitamento máximo da matéria orgânica.

Antes de entrar em um reator, o RSU precisa passar por alguns processos de preparo. Como a biodigestão ocorre somente com material orgânico, o resíduo passa por uma triagem, onde se separa a matéria orgânica. Esta fração do RSU é então triturada e misturada com água, buscando um substrato homogêneo e consequentemente maior eficiência da biodigestão (COELHO et al, 2020).

Uma vez concluída a digestão da matéria orgânica, o digestato precisa ser descartado para que uma nova carga de substrato seja inserida no reator. O digestato é um produto rico em nutrientes e pode ser aplicado na produção de biofertilizantes uma vez que seja higienizado. Para resíduos sólidos urbanos, o uso só pode ser feito se houver separação adequada do resíduo antes da digestão. Caso contrário, o digestato é descartado em aterros sanitários (PROBIOGAS, 2015).

2.4 Produção de biogás a partir de RSU: Gás de aterros sanitários

Da mesma forma que nos reatores, o biogás produzido em aterros sanitários também é produzido através de um processo de digestão anaeróbia. Após o RSU ser disposto em camadas e compactado, ele é coberto com uma camada de solo, de modo a evitar o contato com a atmosfera e assim permitir a ocorrência da biodigestão.

Conforme o processo digestivo ocorre, o biogás é produzido e coletado através de tubulações de sucção instaladas durante a deposição do lixo. Este processo de coleta possui eficiência na ordem de 75% (COELHO et al, 2020). O biogás coletado é retirado do aterro através de sopradores, que são ventiladores que garantem fluxo uniforme de gás, que vai então para *flares* (para ser queimado, reduzindo o potencial de efeito estufa através da conversão do metano em gás carbônico), ou aproveitado. No caso de utilização deste gás, ele deve ser tratado para garantir que cumpra sua função, regulamentações e não provoque danos aos equipamentos. Os processos de tratamento serão abordados no Item 2.5 e aprofundados no Capítulo 3. As regulamentações serão detalhadas no Item 2.6 deste Capítulo.

2.5 Tratamento e purificação de biogás

Existem diversas aplicações para o biogás produzido tanto em aterros quanto em reatores. Diferentes aplicações requerem diferentes níveis de tratamento, que pode passar pelas etapas abaixo (Petersson, 2009):

- Remoção de umidade: Este processo é feito através de resfriamento do gás. De maneira geral isso é realizado por de chillers, que resfriam água que subsequentemente retiram calor do biogás em trocadores do tipo casco-tubo. Assim, a umidade condensa e é então drenada. Neste processo, normalmente já é removida a amônia.
- Absorção de CO₂: Para certos usos finais, este processo é necessário. Nele, o biogás é lavado em uma torre de absorção. Essa lavagem, chamada de *scrubbing*, pode ser feita com água, mas também pode ser química. Devido à solubilidade do CO₂, superior à do CH₄, ele é absorvido e na saída da torre, tem-se um biogás mais concentrado e, portanto, com maior poder calorífico.
- Remoção de H₂S: Essa etapa é particularmente importante em biogás de reatores, pois estes apresentam maior concentração de sulfeto de hidrogênio. É uma etapa importante pois o H₂S é muito prejudicial a equipamentos. Uma das tecnologias mais eficientes, embora mais cara, é a adsorção por carvão ativado dopado com iodato de potássio (KI). Este processo promove a oxidação do H₂S sem a necessidade de oxigênio, atendendo a requerimentos para aplicações veiculares e venda de biometano na rede de distribuição.

- Remoção de siloxanos: Siloxanos são compostos de silício muito presentes em biogás de aterros. Quando queimados produzem óxido de silício que provoca grande incrustação em motores e, portanto, devem ser removidos, especialmente para aplicação de geração de energia elétrica com motogeradores. Siloxanos podem ser removidos no mesmo processo de remoção de H₂S, através de resfriamento ou adsorção em alumínio ativado ou sílica gel.
- Odorização: Como o metano é um gás inodoro, por práticas de segurança, é usual que o biogás seja odorizado, com mercaptano, por exemplo. Desta forma, vazamentos são detectados, podendo-se prevenir acidentes.

Os processos serão descritos com mais detalhes no Capítulo 3.

2.6 Regulamentações para tratamento de Biogás

Conforme mencionado no Item 2.4 deste estudo, diferentes aplicações do biogás possuem diferentes exigências de tratamento e qualidade do gás. No Brasil, não existe uma regulamentação para a qualidade do biogás que será utilizado para geração de energia elétrica. Nestas aplicações, a definição do tratamento é feita de modo a atender a especificação do fabricante dos equipamentos.

Motogeradores do fabricante Jenbacher®, por exemplo, tem as características do gás definidas na nota técnica TA 1000-0300. Os equipamentos possuem controle da mistura de combustível tal que o teor de metano pode ser baixo, com ajuste da relação da mistura ar-combustível. Desta forma, a concentração total de metano não é um problema, uma vez que o biogás de aterro possui concentração na ordem de 50% (COELHO et al, 2020).

Já a concentração de H₂S depende de características do motor, como configuração da câmara de combustão e tipo de filtro. Para um motor com pré-câmara, é permitido um limite de 200 mg/kWh. Esta unidade depende do poder calorífico do biogás e, portanto, da sua concentração de metano. Para um biogás com concentração de CH₄ de 60%, por exemplo, o limite é de 83 ppm de H₂S (Jenbacher®, 2021).

A umidade relativa especificada é de 15% para este tipo de motor. Valores elevados provocam condensação e danos ao equipamento. Adicionalmente, a concentração de silício, proveniente de siloxanos e outros compostos organossilícicos, não é especificada para o biogás. O controle indicado é através da comparação de duas análises de óleo do motor, que é contaminado com este silício. A variável de controle é dada pela equação abaixo e não deve exceder 0,02 (Jenbacher®, 2021).

$$[Si] = \frac{\Delta Si [ppm] * Volume total de óleo no motor [l]}{Energia gerada entre medições [kWh]}$$

onde, $\Delta Si[ppm]$ é a diferença de concentração de silício total entre as duas análises.

Desta forma, o limite dependerá não só da qualidade do biogás, mas também da característica do óleo utilizado e regime de operação. O fabricante afirma ainda que a presença destes compostos impacta no intervalo de manutenção, mas não indica o impacto exato.

Por outro lado, para que dado biogás seja utilizado em substituição ao gás natural, para injeção na rede de gás, ou ao GNV (Gás Natural Veicular), ele ser purificado para que se torne biometano e deve atender à Resolução Nº 886 da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), de 29/09/2022.

Esta resolução determina os teores aceitáveis de diferentes componentes do biometano (Tabela 2.1), bem como estabelece as metodologias de medição que devem ser utilizadas para aferir os critérios. Ela determina ainda os processos aprobatórios para que a ANP autorize a comercialização do biometano para aplicações residenciais, comerciais e veiculares.

Abaixo, são detalhados os critérios para aprovação da composição do biometano, extraído do Anexo 1 da Resolução 886 da ANP. O produtor deve emitir relatórios diários de qualidade do biometano, atendendo aos critérios determinados pela resolução. Os critérios possuem uma diferenciação por região geográfica pois retrata as características específicas do gás natural presente.

Tabela 2.1 – Requisitos de pureza do biogás para caracterização como biometano Fonte: Resolução 886 da ANP.

Característica	Unidade	Limite (1)		
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul
Poder Calorífico Superior	kJ/m3	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000	
	kWh/m3	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94	
Índice de Wobbe	kJ/m3	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500	
Metano, mín.	% mol	90,0	90,0	
Etano	% mol	anotar	anotar	anotar
Propano	% mol	anotar	anotar	anotar
Butanos e mais pesados	% mol	anotar	anotar	anotar
Oxigênio, máx.	% mol	0,8	0,8	
CO ₂ , máx.	% mol	3,0	3,0	
CO ₂ + O ₂ + N ₂ , máx.	% mol	10		
Enxofre Total, máx.	mg/m3	70		
Gás Sulfídrico (H ₂ S), máx	mg/m3	10		
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx.	°C		-39	-45
Ponto de orvalho de hidrocarbonetos	°C	15	15	0
Teor de siloxanos, máx.	mgSi/m3	0,3	0,3	0,3
Clorados, máx.	mgCl/m3	5,0	5,0	5,0
Fluorados, máx.	mgF/m3	5,0	5,0	5,0

Antes de comercializar o biometano, o produtor precisa ter seu produto analisado e certificado pela ANP. O processo de aprovação inclui uma análise de risco executada por um consultor independente, com critérios também regulamentados.

3- Plantas de Produção de Biogás

Esta seção aborda com maiores detalhes os processos de produção de biogás em reatores e aterros sanitários.

3.1 Produção de biogás de RSU em reatores de digestão anaeróbia

3.1.1 Digestão Anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia é um conjunto de reações bioquímicas nas quais a matéria orgânica é processada, de modo a produzir uma composição de metano, gás carbônico e em menor quantidade, outros gases. Esta composição de gases é chamada de biogás.

Como introduzido na seção 2.3 e representado na Figura 3.1, a digestão anaeróbia é composta pelas etapas Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese, sendo esta última a que realmente tem como produto o combustível metano.

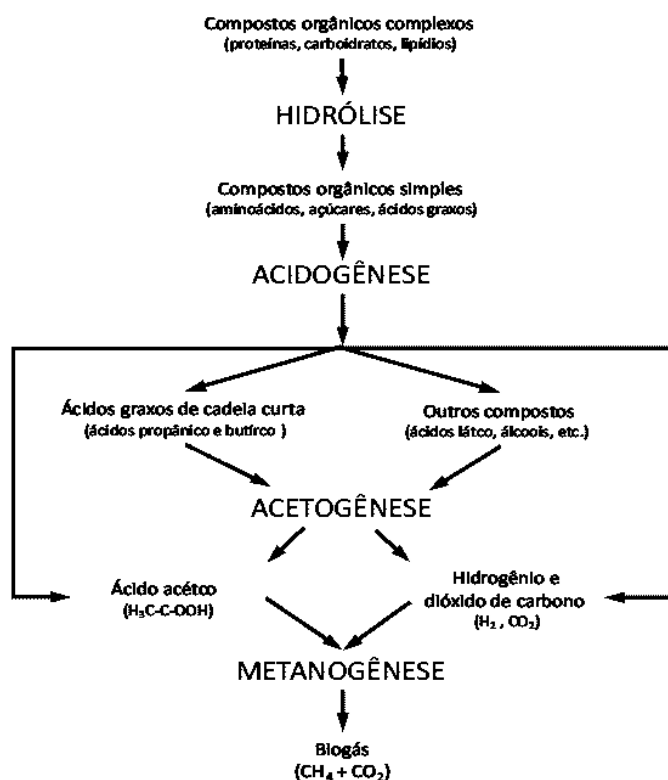


Figura 3.1 - Descrição das etapas da digestão anaeróbia. Fonte: COELHO et al, 2018.

Cada etapa do processo consiste em reduzir compostos orgânicos a compostos menores através da reação com microorganismos específicos. Inicialmente, bactérias hidrolíticas quebram compostos

complexos em aminoácidos, açúcares e ácidos graxos; Estes compostos resultantes da hidrólise são então convertidos em ácidos graxos mais simples, ácidos e álcoois. Este processo, realizado por bactérias fermentativas é denominado acidogênese. Em seguida, a acetogênese é responsável pela formação de ácido acético, gás hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono. Por fim, na metanogênese tem como produto o metano (CH_4) e o CO_2 , combinação denominada biogás.

O processo é complexo e, para que ocorra de maneira eficiente, diversos parâmetros físico-químicos devem ser controlados. As principais variáveis de controle do processo são a ausência de oxigênio, temperatura e pH do substrato.

- **Ausência de oxigênio:** o processo da metanogênese é estritamente anaeróbio. Ou seja, só pode ocorrer na ausência de oxigênio. Caso haja contato com o ar atmosférico, por exemplo, o processo resultará somente em CO_2 , e nenhum combustível será produzido.
- **Temperatura:** Um dos fatores de que tornam o ecossistema de um biodigestor complexo é o controle de temperatura que, se inadequado, provoca desequilíbrio das culturas envolvidas no processo. Temperaturas muito baixas (abaixo de $10^\circ C$) não permitem a ocorrência das reações necessárias, deixando o processo parado. Por outro lado, temperaturas muito altas provocam desnaturação das enzimas, tornando-as incapazes de realizar o processo. A temperatura ideal para o processo será determinada essencialmente pelo tipo de bactéria utilizada no processo metanogênico. Estas bactérias são separadas em 3 grupos:
 - Psicofílicas: atuam em temperaturas inferiores a $20^\circ C$;
 - Mesofílicas: atuam em temperaturas entre $20^\circ C$ e $45^\circ C$;
 - Termofílicas: atuam em temperaturas acima de $45^\circ C$.

No Brasil, majoritariamente se utilizam bactérias mesofílicas, devido às temperaturas ambiente médias.

- **pH:** A acetogênese e metanogênese ocorrem somente em uma faixa de pH neutro, de 6,5 a 8 (Lebuhn, 2008.). Por outro lado, a faixa ideal para as primeiras etapas da biodigestão, hidrólise e acidogênese, é um pouco mais ácida, entre 5,2 e 6,3 (Weiland, 2001.), embora o processo aceite pH mais alto.

Algumas tecnologias de biodigestores separam o processo em duas etapas, de modo que é possível trabalhar cada etapa com pH ótimo. No entanto, para os resíduos sólidos urbanos este processo é inviável. Desse modo, controla-se o pH para que fique neutro, pois permitirá a ocorrência das 4 etapas.

3.1.2 Tipos de reatores

Existem diferentes tipos de reatores para produção de biogás a partir da digestão anaeróbia. As diversas tecnologias atendem segmentos diferentes e substratos com características específicas. Esta seção focará naquelas mais utilizadas no setor de RSU.

Um primeiro tipo de reator aplicável para resíduos sólidos urbanos é o CSTR (*Continuous Flow Stirred Tank Reactor*). Este tipo de reator consiste em um tanque com agitadores que recebe fluxo contínuo de substrato. É um tipo de reator para líquidos com capacidade de lidar com teor de sólidos totais maior, na ordem de 15%. É muito utilizado também na agropecuária e em tratamento de efluentes industriais (Probiogás, 2015). Para RSU é pouco utilizado de fato pois requereria um grande investimento em um processo de triagem muito minuciosa, de modo a remover impurezas, e trituração do substrato, de modo a atender teor de sólidos totais adequado à tecnologia.

A Figura 3.2 abaixo mostra um esquema de um reator CSTR. É possível ver a lona superior, que possui a função de reter o biogás, que será então coletado através de uma tubulação, posicionada na parte superior do reator, e um soprador:



Figura 3.2 - Representação esquemática de um reator CSTR. Fonte: Probiogás, 2015.

No segmento de RSU, são mais utilizados os reatores de digestão seca. Estes reatores, ao contrário do CSTR e outras tecnologias, permitem que se trabalhe com teor de sólidos totais muito maiores. Um primeiro tipo de tratamento seco de RSU é o reator do tipo garagem.

Este tipo de reator trabalha com bateladas, ou seja, alimentação descontínua. O resíduo é disposto no digestor, que é um grande compartimento estanque, daí denominado garagem. O processo de digestão de cada lote ocorre em um intervalo de 3 a 6 semanas (Probiogas, 2015).

A garagem possui aquecimento em suas paredes para garantir uma temperatura de processo adequada para maior produção de metano. Além disso, possui um sistema de captação e aspersão do lixiviado (“chorume”), de modo a obter maior homogeneidade no processo e maior digestão do material.

No entanto, pelo substrato ser não homogêneo e não haver um sistema de mistura, como existe no reator CSTR, o processo de biodigestão é menos eficiente neste tipo de reatores (Probiogas, 2015). Em contrapartida, pode receber resíduos muito menos selecionados, com maior teor de sólidos e de impurezas, reduzindo investimento em pré-tratamento.

A Figura 3.3 mostra um esquema típico de reator de digestão seca descontínua. Neste exemplo, o biogás é levado para um motor a combustão, que pode gerar energia elétrica e a energia térmica necessária para aquecimento do biodigestor. Outras aplicações são possíveis para o biogás captado.

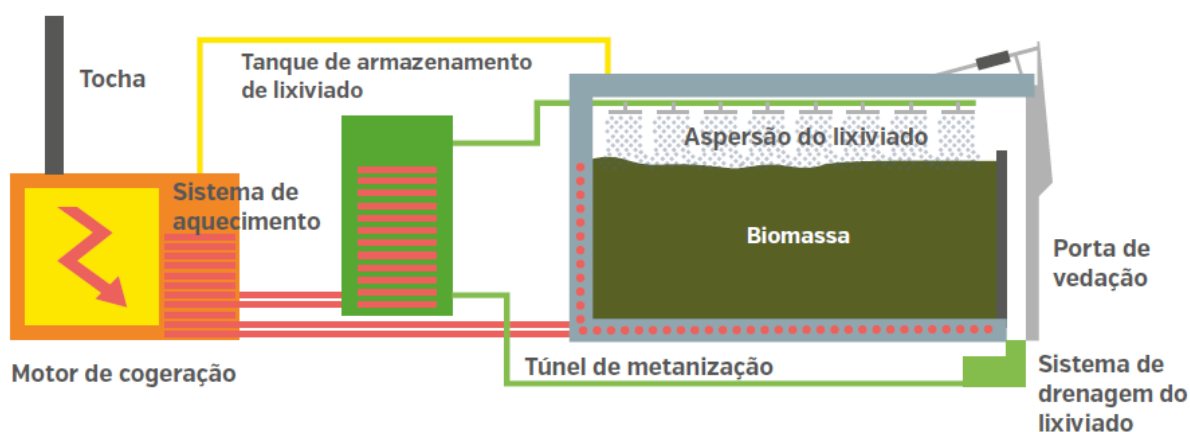


Figura 3.3 - Reator do tipo garagem com aproveitamento de calor para controle de temperatura. Fonte: Probiogás, 2015

Uma segunda opção de reator de digestão seca é o de alimentação contínua. Este tipo de equipamento, assim como o biodigestor de garagem trabalha com substratos de maior teor de sólidos totais, mas o processo é contínuo. Ou seja, ao mesmo tempo que se injeta resíduos para digestão, resíduos já digeridos são retirados do digestor.

A decisão pelo tipo de reator, bem como o tamanho dependerão do volume de resíduo a ser tratado, bem como da logística de abastecimento.

3.2 Produção de biogás de RSU em aterros sanitários

Outra forma de produzir biogás a partir de RSU é através de aterros sanitários. O processo que ocorre no aterro, assim como em um reator, é a digestão anaeróbica. No entanto, devido à característica construtiva dos aterros, o processo não pode ser tão bem controlado quanto em um reator, tornando o processo menos eficiente, mas mais viável para volumes muito grandes de resíduo.

Ao contrário de lixões, os aterros sanitários são sistemas complexos, que demandam uma série de cuidados construtivos para mitigar riscos ambientais.

A construção do aterro se inicia pela impermeabilização do solo. Esta etapa é crucial para evitar infiltração do líquido tóxico (chorume) proveniente da degradação dos resíduos orgânicos. A impermeabilização é feita com camadas de argila e geomembrana de PEAD (polietileno de alta densidade), ver Figura 3.4. Além disso, o aterro conta com um sistema de captação de líquido, realizado por meio de tubulações que destinam o produto a um sistema de tratamento (COELHO et al, 2020).



Figura 3.4 - Exemplo de impermeabilização de um aterro com geomembrana de PEAD. Fonte: Atarfil® Geomembranes.

Da mesma forma, os aterros contam com sistema de extração do biogás, que coletam o combustível e o destina a *flares* (caso não haja aproveitamento energético) ou para uma planta de tratamento, que tornará o gás adequado para consumo em diversas aplicações. O sistema de coleta, no entanto, possui eficiência da ordem de 40% a 60% (COELHO et al, 2018).

A Figura 3.5 mostra um diagrama esquemático de um aterro sanitário e do sistema de coleta de biogás.

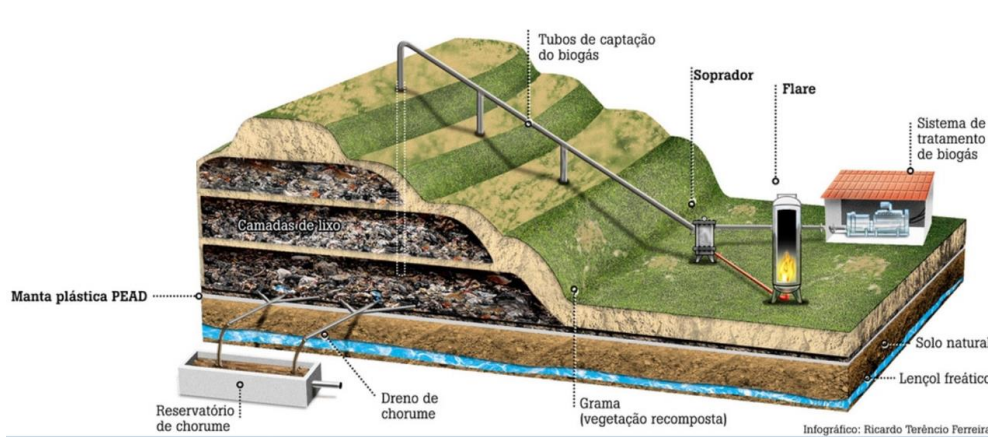


Figura 3.5 - Composição de um aterro sanitário para produção de biogás. Adaptado de Ricardo Terêncio Ferreira.

3.3 Tratamento e purificação de biogás

Para que o biogás possa ser utilizado em diversas aplicações, é necessário que passe por um tratamento. Esse tratamento pode ter o objetivo de aumentar o poder calorífico através do aumento da concentração de metano, ou remover impurezas e componentes tóxicos ou danosos, característicos da composição do resíduo digerido na produção do biogás.

Especialmente para biogás produzido através de RSU, devido à sua composição, este processo de purificação é essencial para garantir a vida útil dos equipamentos onde o biogás é utilizado, bem como o atendimento aos requerimentos da Resolução 886 da ANP para substituição ao gás natural.

3.3.1 Remoção de Umidade

O primeiro passo para o tratamento do biogás é a remoção de umidade. Além de reduzir o poder calorífico do biogás, a umidade provoca condensação nas tubulações e equipamentos. Além disso, na presença de H_2S , outro componente residual do biogás, esta umidade leva à produção de ácido sulfúrico.

A remoção de umidade pode ser realizada por diferentes métodos. Ao resfriar o biogás, o vapor de água presente irá condensar e pode ser coletado e drenado. O mesmo efeito pode ser obtido através da compressão do biogás, pois o aumento de pressão elevará a temperatura de condensação do biogás. Além disso, pode ser removido quimicamente através de sistemas de adsorção utilizando carvão ativado ou sílica gel, ou absorção através de sais higroscópicos, que absorvem umidade (Petersson, 2009).

Estes métodos podem ainda ser combinados. A compressão, por exemplo, tipicamente é após outros métodos, pois a umidade excessiva provoca danos a compressores.

O processo de secagem por resfriamento tipicamente ocorre em um trocador de calor do tipo casco-tubo, onde o biogás que flui pelo casco é resfriado pela troca de calor com um fluido frio que circula pelos tubos. Este fluido pode ser, por exemplo, água gelada resfriada em um *chiller*. Abaixo, a Figura 3.6 mostra o esquemático de um trocador deste tipo.

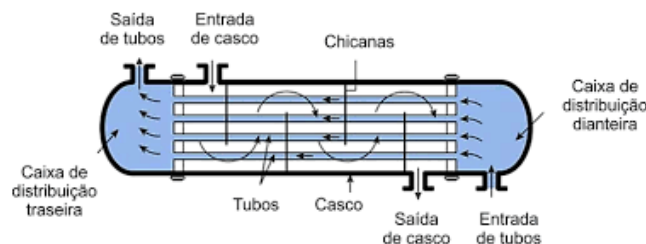


Figura 3.6 - Trocador de Calor tipo Casco-Tubo.

Para aplicação em secagem, este trocador é instalado com uma pequena angulação e existe na parte mais baixa do casco um ponto de drenagem, para remoção da umidade condensada do biogás.

3.3.2 Remoção de CO₂

A remoção do dióxido de carbono é a etapa mais importante para a elevação do poder calorífico do gás. A composição do biogás tem como segunda maior concentração a de CO₂. Para que o biogás possa ser utilizado, por exemplo, para injeção na rede de gás, a ANP exige concentração máxima de 3%.

O principal método de remoção é a lavagem do gás com água, ou *Water Scrubbing*. Este método consiste em uma torre onde o biogás encontra um fluxo de água, em contracorrente. O CO₂ possui solubilidade em água cerca de 26 vezes superior à do metano, em temperatura ambiente. Esta propriedade faz com que seja possível separar os dois gases através da absorção. Este processo pode entregar um biogás com concentração de metano entre 80% e 99%, a depender da concentração de outros gases como N₂ e O₂ que não são absorvidos (Angelidaki et al, 2019).

O CO₂ pode ainda ser removido desta água em uma torre de degasagem, onde a água é aspergida o contato com o ar remove o gás dissolvido, permitindo que a água retorne ao processo para remover CO₂ do biogás novamente.

Naturalmente, após a lavagem, o biogás fica saturado de umidade e deve então passar por um processo de secagem. No entanto, para que o biogás passe pela torre e passe pelo processo de lavagem, ele deve ser primeiro comprimido e, para tal, deve estar seco, a fim de evitar danos aos compressores. Por este motivo, é comum que plantas de tratamento de biogás possuam dois pontos de secagem.

A Figura 3.7 mostra um esquemático do processo de lavagem para remoção de CO₂. É possível ver que a água passa por um ciclo fechado.

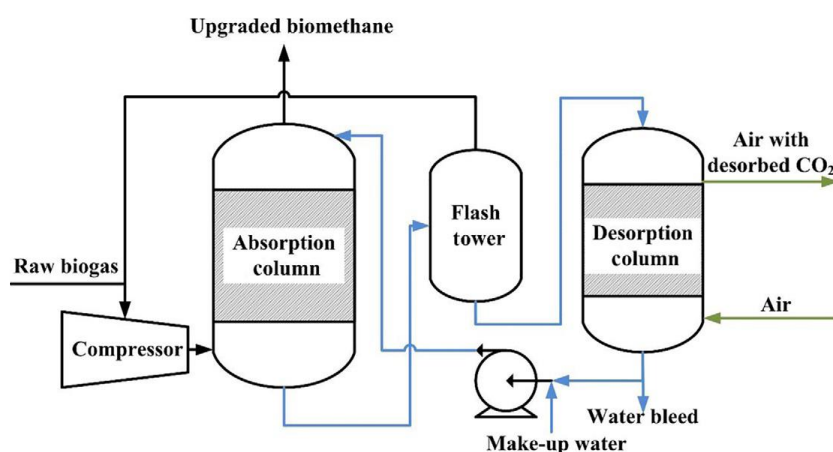


Figura 3.7 - Diagrama típico do processo de Water Scrubbing. Fonte: Angelidaki et al, 2019.

O *Water Scrubbing* pode também realizar a remoção do H_2S , pois sua solubilidade também é superior à do metano. No entanto, é desejável que a remoção deste gás seja feita antes da remoção do CO_2 , especialmente quando a concentração é elevada, para evitar alguns danos como corrosão do compressor.

O processo de Scrubbing pode também ser feito com solventes orgânicos ao invés de água. A vantagem está na maior solubilidade do CO_2 que, além de garantir concentração muito elevada de metano (da ordem de 96%-98,5%), permite que o equipamento seja menor. A maior solubilidade, no entanto, torna a regeneração é mais difícil, pois requer aquecimento do solvente (Angelidaki et al, 2019).

Além dos processos de absorção descritos, é possível realizar a remoção da CO_2 pelo método PSA (*Pressure Swing Adsorption*), onde utiliza-se sólidos como carvão ativado, zeolita e sílica gel. Neste processo o biogás é pressurizado e isto faz com que ele adira à superfície do material adsorvente.

Os materiais são selecionados em virtude do tamanho das moléculas que deve adsorver. Como a estrutura molecular do CH_4 é maior que a do CO_2 , e também do H_2S , o metano não é adsorvido no processo. Uma vez saturado o material, ou seja, quando não há mais capacidade de adsorver o dióxido de carbono, a torre é então despressurizada e, com isso, libera as partículas aderidas, regenerando o material para que adsorva novamente.

Devido a esta característica do processo, tipicamente utiliza-se mais de uma torre, de modo que sempre haja material disponível para adsorção enquanto uma torre é despressurizada. No entanto, ao contrário do CO_2 , o H_2S não se desprende do material durante a pressurização. Por este motivo, ele deve ser removido antes do PSA, de modo que não sature o material.

A Figura 3.8 mostra um diagrama do processo. É possível observar que a umidade e o H_2S são removidos antes que o material passe pelas torres de adsorção.

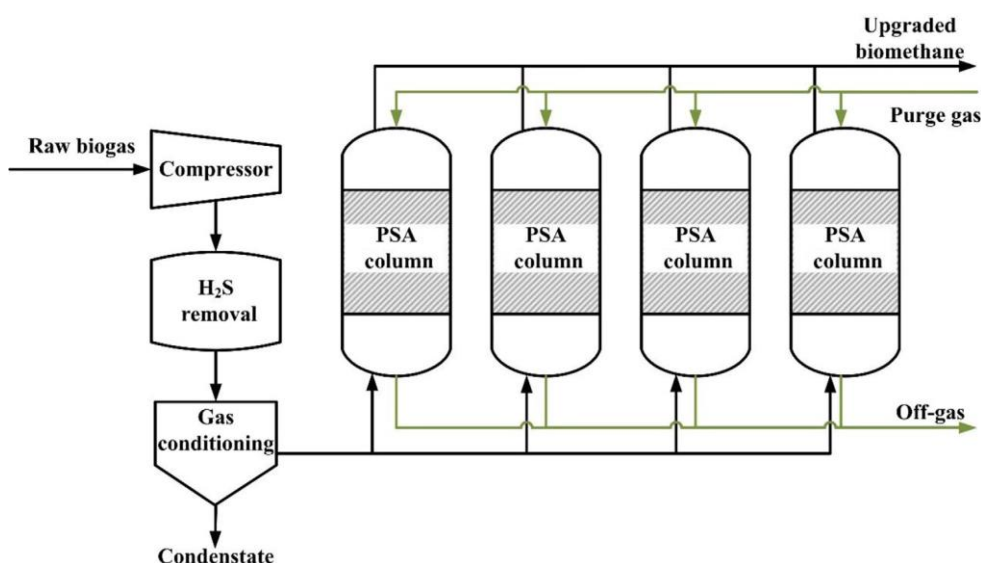


Figura 3.8 - Diagrama típico do processo de PSA (*Pressure Swing Adsorption*). Fonte: Angelidaki et al, 2019.

O PSA é uma tecnologia barata e compacta para remoção de CO₂. Assim como a absorção com solventes orgânicos, pode entregar um biogás com teor de metano de 96% a 98%.

O último método que será abordado neste trabalho é a separação por membranas. Este método consiste na passagem do biogás por uma membrana seletiva às moléculas. O processo pode ser feito com uma única membrana ou em múltiplos estágios. Pode ainda ser chamado de seco ou úmido, a depender do tipo de membrana.

Na separação a seco, membranas de poliamida ou acetato de celulose são normalmente utilizadas. No processo úmido, a membrana é higroscópica, podendo absorver fração líquida presente no biogás. Desta forma, além da filtragem proporcionada pela membrana, o líquido retido ainda absorve parte do CO₂, podendo tornar o processo ainda mais eficiente.

Tecnologias atuais de separação por membrana permitem recuperação de cerca de 99,5% do metano e biogás com pureza superior a 99% (Angelidaki et al, 2019). A Figura 3.9 mostra um diagrama esquemático do processo. Neste caso em particular, se trata de um processo em três estágios.

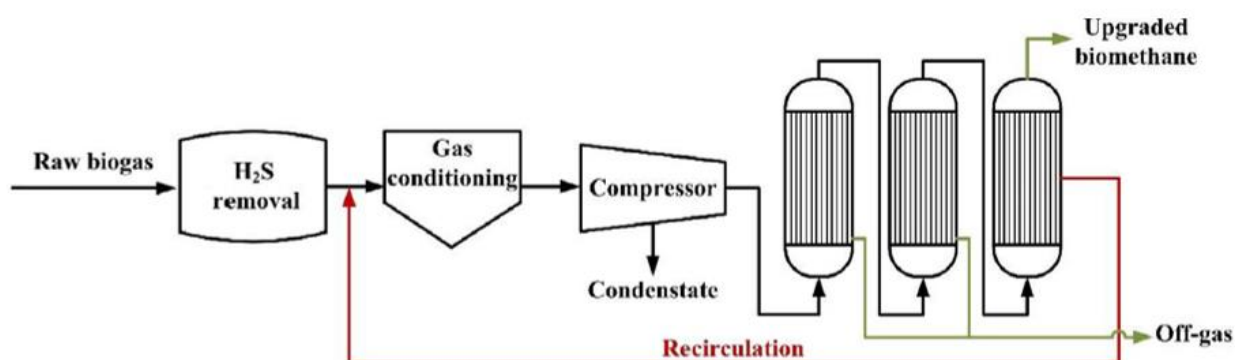


Figura 3.9 - Processo de separação por membrana (com três estágios). Fonte: Angelidaki et al, 2019.

Existem outros métodos utilizados para concentrações de CO₂ menores, como a absorção química. Nestes processos, o gás passa por uma torre com um solvente, ao invés de absorver o dióxido de carbono, reage com ele. No entanto, como o biogás de RSU possui concentração elevada de CO₂, este método não será aprofundado neste trabalho.

3.3.3 Remoção de H₂S

A remoção de H₂S é um importante de limpeza do biogás, com intuito de evitar degradação de equipamentos e tubulações em que o biogás será utilizado.

Um primeiro método de remoção é a precipitação. Ela não ocorre no biogás em si, mas sim no próprio digestor, onde é feita pela adição de sais de ferro. Os íons de ferro se ligam ao enxofre para formar sulfato de ferro. Este composto possui baixa solubilidade e então precipita, sendo retirado junto com o digestato. Para aplicações com RSU, este método não é aplicado devido ao substrato ser sólido.

Para o propósito deste trabalho, o primeiro método abordado será a adsorção por carvão ativado. O H_2S , na presença de água é oxidado e então forma-se enxofre, que então é adsorvido na superfície do carvão ativado. O processo pode ainda ser acelerado se o carvão for dopado com KI, K_2CO_3 ou ZnO .

Estes compostos permitem ainda que o processo ocorra sem adição de oxigênio, necessária inicialmente para a oxidação do enxofre. Isso permite que a concentração de O_2 no biogás resultante seja muito inferior. Isso é necessário, especialmente em casos de injeção do biogás na rede de gás, uma vez que a ANP permite teor máximo de O_2 de 0,8%.

A regeneração do material adsorvente é custosa, tornando a tecnologia pouco aplicável para plantas de pequena escala.

A adsorção também pode ocorrer por materiais impregnados com óxidos de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou Fe_2O_3). Embora o material só possa ser regenerado um certo número de vezes, devendo então ser substituído, o método possui a vantagem de também promover a remoção de siloxanos (PETERSSON, 2009). Neste processo, duas torres são utilizadas. Em uma ocorre a adsorção enquanto na outra ocorre a regeneração do material, através da adição de oxigênio. Costa et al. encontrou uma eficiência de 68% de regeneração utilizando ar a temperatura ambiente (COSTA et al, 2020). Eficiências maiores podem ser obtidas com temperaturas elevadas.

Outro método para a remoção do sulfeto de hidrogênio é a absorção por membranas. O mecanismo é exatamente igual ao sistema de membranas para separação de CO_2 .

3.3.4 Remoção de O_2 e N_2

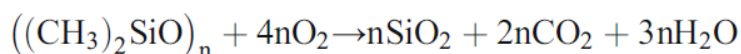
A remoção de O_2 e N_2 é necessária para algumas aplicações, como a injeção do biogás na rede, em substituição ao gás natural. Outras aplicações, onde a queima ocorre no local, não demandam este tratamento. Isso se aplica à produção de energia elétrica em motogeradores de ciclo Otto ou à queima em caldeiras para produção de energia térmica. Biogás de RSU, seja em reatores ou em aterros, possui concentração mais elevada de nitrogênio, devido à natureza do substrato, em comparação com biogás de outras fontes.

A remoção, assim como a do CO_2 e do H_2S pode ser feita por adsorção ou por membranas.

3.3.5 Remoção de Siloxanos

Os siloxanos são compostos que possuem silício e oxigênio. Eles são muito comuns em RSU pois são utilizados em diversos produtos como xampus. Eles se tornam particularmente críticos quando queimados, seja em motogeradores ou queimadores. Ao serem oxidados durante a combustão, os siloxanos produzem óxido de silício, que incrusta nos equipamentos, afetando significativamente os intervalos e custos de manutenção. A reação de oxidação de um siloxano é indicada na Figura 3.10. A Figura

3.11, por sua vez, mostra um equipamento que sofreu incrustação de óxido de silício. Esta camada de óxido prejudica a troca de calor levando a sobreaquecimento e aumentam atrito de partes móveis, como pistões e válvulas dos motores utilizados para geração de energia elétrica.



Equação 3.1 - Reação de oxidação de um siloxano, resultando na produção de SiO_2 (óxido de silício).



Figura 3.10 - Equipamento danificado por incrustação de siloxanos. Fonte: Evoet, 2018.

A concentração de siloxanos no biogás depende de diversos fatores. Diferentes aterros sanitários, por exemplo, possuem diferentes concentrações, que dependem da característica do resíduo depositado, da idade e da condição do aterro (Shen et al, 2018).

Dentre os métodos de remoção, o mais utilizado é a adsorção, que pode ser feita com carvão ativado ou com sílica gel. Outros adsorventes são utilizados em menor escala. A sílica gel possui maior capacidade de adsorção (mg/g) que o carvão ativado, cerca de dez vezes. Além disso, mediante aquecimento, a regeneração da sílica gel é de cerca de 95% (Schweigkofler and Niessner, 2001). Por outro lado, o custo de implementação e operação de sistemas a base de carvão ativado é inferior ao da sílica gel.

Os siloxanos podem também ser removidos por absorção. No entanto, ao contrário do CO_2 , a remoção é pouco efetiva com este tipo de solução. Desta forma, não é muito aplicada para biogases com elevado teor de siloxanos, como é o caso do biogás de RSU.

A separação por membranas também é possível, mas assim como a absorção, pouco utilizada. Os principais motivos são o custo mais elevado (tanto na implantação quanto na renovação das membranas) e menor eficiência. Deste modo, costuma-se aplicar a remoção por adsorção.

Outros métodos também estão disponíveis, com tecnologias disponíveis no mercado, nos quais os siloxanos são removidos junto com o H_2S , como a adsorção com óxidos de ferro, descrita na Seção 3.3.3 – Remoção de H_2S .

4- Gerenciamento de riscos em plantas de produção de biogás a partir de RSU – Um estudo de caso

Esta seção abordará os riscos inerentes ao processo de produção, purificação e uso de biogás. Serão abordados os riscos na produção, tanto em um reator anaeróbio quanto em um aterro sanitário. O uso final do sistema estudado é a produção de energia elétrica *in-loco* através de grupos motogeradores. Quanto ao sistema de tratamento do biogás, devido à heterogeneidade das tecnologias disponíveis no mercado, será avaliada uma instalação com características específicas. Os equipamentos e processos da planta de tratamento abordada neste estudo de caso foram arbitradas com base nas tecnologias disponíveis no mercado e requisitos de purificação para a aplicação definida. As características das plantas são definidas abaixo:

- **Método de produção 1: Reator**
 - Reator: do tipo garagem de alimentação descontínua (bateladas);
 - Característica do RSU: fornecido após processo de triagem para remoção de todo o material não orgânico, de modo que o reator seja alimentado somente com a fração orgânica do RSU. Esta análise não contemplará as etapas de triagem.
 - Controle de temperatura: recuperação de calor do grupo motogerador (cogeração);
- **Método de produção 2: Aterro sanitário**
 - Característica do RSU: fornecido após processo de triagem (remoção da fração reciclável), de modo que sejam depositadas no aterro as parcelas orgânica e de rejeitos. Esta análise não contemplará as etapas de triagem.
 - Lixiviado removido por caminhão tanque e tratado em estação de tratamento de efluentes (ETE) externa à instalação.
- **Uso final:** produção de energia elétrica em grupos motogeradores;
- **Sistema de tratamento do biogás:**
 - Remoção de CO₂: Neste caso, não será realizada a remoção de CO₂ pois a aplicação na geração de energia elétrica não requer esta etapa.
 - Remoção de H₂S e Siloxanos: Coluna de adsorção por óxidos de ferro.
 - Remoção de umidade: Trocador de calor casco-tubo resfriado por uma unidade de resfriamento de água (*Chiller elétrico a ar*).

A Figura 4.1 mostra um fluxograma simplificado das plantas estudadas, com produção por reator e por aterro sanitário. Os fluxogramas foram desenvolvidos com referência nas configurações adotadas pela empresa de produção de energia e utilidades Ecogen Brasil Soluções Energéticas Ltda.

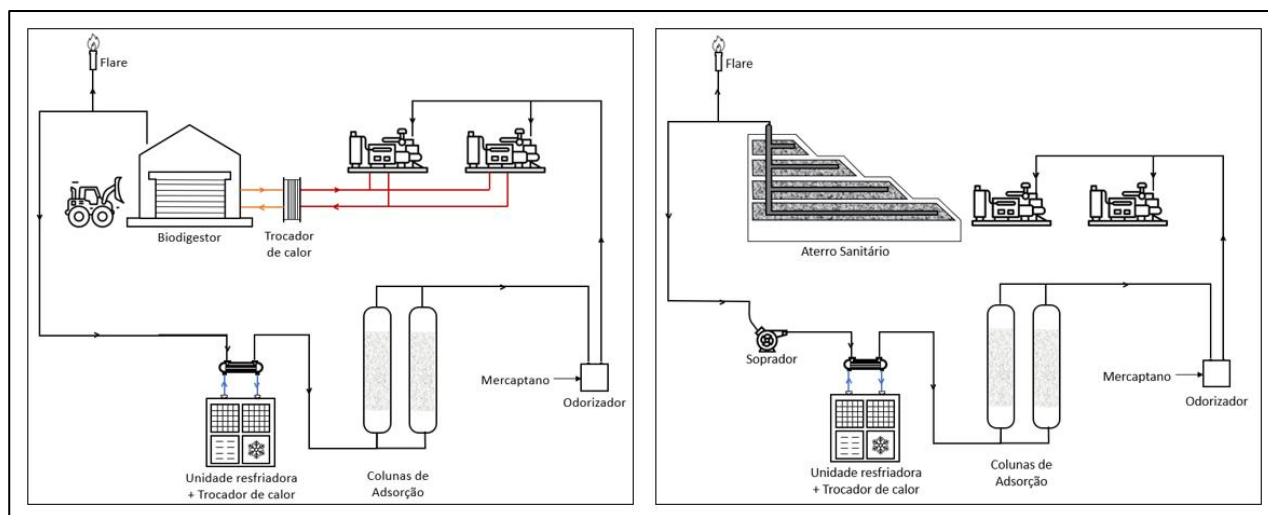


Figura 4.1 - Fluxogramas propostos das plantas consideradas neste estudo de caso (Reator e Aterro). Fonte: Elaborado pelo autor com base no sistema proposto neste estudo de caso.

A leitura do fluxograma se inicia no biodigestor, ou no aterro sanitário, onde ocorre a digestão anaeróbia. Então é realizada a coleta do biogás. O primeiro equipamento é o *flare*, queimador que fará a combustão do biogás quando não houver consumo pelo processo, ou se a produção for superior ao consumo.

Em seguida, o biogás é transportado através de tubulações até a etapa de tratamento. No caso do aterro sanitário, devido à baixa pressão do gás, um soprador é necessário para realizar a extração do biogás do interior do aterro (RAJARAM, 2012).

Ao chegar na etapa de tratamento, o primeiro processo é a remoção de umidade onde, em um trocador casco-tubo, o biogás troca calor com água gelada de modo que a redução de temperatura provoque a condensação da umidade presente.

Na próxima etapa, o biogás passa por uma coluna de adsorção onde o sulfeto de hidrogênio e os siloxanos são adsorvidos, deixando o biogás apto a ser utilizado pelos grupos motogeradores. O sistema de adsorção possui duas colunas, sendo que uma está em operação enquanto a outra está na etapa de regeneração. O controle das torres é feito através de válvulas de bloqueio.

Após o fim do tratamento do biogás, o biogás é composto basicamente só por CH_4 e CO_2 e, portanto, é inodoro. Ele passa então por um odorizador, onde é misturado com mercaptano, para que se possa detectar vazamentos e evitar riscos à segurança (GIZ, 2016).

O biogás então entra nos motogeradores, onde ocorre a combustão e a geração de energia elétrica, que será então injetada e comercializada na rede elétrica. Os motogeradores aquecem devido à combustão e precisam ser refrigerados. O calor do líquido de arrefecimento é então trocado em um trocador de calor a placas, aquecendo um outro circuito de água que realiza o controle de temperatura nas paredes do reator

(PROBIOGAS, 2015). No caso do aterro, não há este aproveitamento energético e os motores são então refrigerados por radiadores.

A análise de risco é uma etapa muito importante do desenvolvimento de um projeto. Se não mapeados, desvios podem provocar danos a equipamentos, perdas de eficiência e de receita, acidentes de trabalho etc. Para isso, deve-se realizar uma diligência através de uma análise de riscos, de forma a municiar os tomadores de decisão quanto às medidas mitigatórias a serem tomadas, ou em um caso extremo onde as medidas de contenção não sejam suficientes, até mesmo inviabilizar a execução.

Existem diversas técnicas para analisar os riscos existentes em um empreendimento. Este trabalho aborda os riscos com base na metodologia HAZOP (*Hazard and Operability Study*), desenvolvido pela Imperial Chemical Industries Ltd. Esta é uma metodologia consolidada para análise de riscos em que o risco é o produto de dois índices: Severidade e Probabilidade. Quanto maior este produto, maior será o risco.

A metodologia HAZOP foi selecionada para o desenvolvimento deste trabalho porque aborda tanto riscos de segurança quanto riscos à qualidade e eficiência do processo e, conseqüentemente, do produto final. O foco em desvios em processos faz do HAZOP uma metodologia muito consolidada na indústria. Além disso, o HAZOP é executado em fase de projeto executivo, ou seja, com processos e fluxogramas definidos.

O HAZOP é um método qualitativo de análise de risco e consiste em avaliar os possíveis desvios do processo, suas causas e efeitos, probabilidade e severidade. Com base no risco calculado (Probabilidade x Severidade) para cada desvio, é determinada a necessidade ou não de medidas de controle. O risco é então recalculado com os novos índices de severidade e probabilidade, após a aplicação das medidas de controle. A necessidade ou não de medidas de controle é determinada pela aceitação a risco de quem está desenvolvendo o projeto.

O método estabelece que os critérios qualitativos utilizados para a quantificação da probabilidade e severidade sejam determinados pela equipe conduzindo a avaliação de risco. A matriz de risco definida e a descrição dos índices de Severidade e Probabilidade são detalhados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Matriz de risco considerada para efeito deste trabalho. Fonte: Elaborado pelo autor com base em estudos de risco realizados na empresa Ecogen Brasil, 2021.

Severidade \ Probabilidade	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	2	4	6	8
3	3	6	9	12
4	4	8	12	16

Probabilidade	Descrição	Severidade	Descrição
1	Improvável	1	Pouco ou nenhum impacto a equipamentos ou processo
2	Pouco Provável	2	Impactos a médio/longo prazo
3	Provável	3	Impactos imediatos a equipamentos ou processo
4	Muito provável	4	Severidade 3 e/ou riscos de segurança humana

4.1 Riscos Técnicos

Os riscos técnicos serão abordados nesta seção individualmente por etapa do processo: Produção do biogás, Captação do biogás, Secagem, Coluna de Adsorção e Uso do biogás. Cada seção a seguir contempla uma destas etapas e seus riscos, bem como suas medidas de controle. As tabelas apresentadas em etapa analisada contêm a descrição, origem e impacto de cada risco, bem como sua quantificação e medidas de controle para mitigação.

As medidas de controle visam redução do risco, seja pela redução em sua severidade, seja na redução da probabilidade de ocorrência. As medidas foram consideradas de modo a tornar o risco residual (após aplicação das medidas) aceitável. Para este trabalho, busca-se que nenhum risco seja quantificado em mais de 5.

4.1.1 Produção do Biogás:

A etapa de produção de biogás compreende essencialmente o reator, ou aterro sanitário, em si. Os riscos podem ser separados em 3 grupos: Desvios do RSU, Falhas construtivas e Falhas Operacionais.

Durante esta etapa, o principal risco ao processo é a falta de alimentação de RSU. Isso pode acontecer por uma falha na logística e coleta de resíduos, ou mesmo internamente à planta, pela falha das pás carregadeiras ou caminhões que alimentam o processo. Uma falha Estes riscos podem ser mitigados, respectivamente pela adoção de contratos comerciais de fornecimento de RSU que contemplem multas ao não fornecimento, e a redundância de pás carregadeiras e outros maquinários e/ou contratos de manutenção com SLA (tempo máximo de atendimento) definidos. Estas medidas são focadas em reduzir a probabilidade de ocorrência do desvio.

Outro risco é a composição de RSU, que pode possuir impurezas em excesso ou característica que não permita a produção do volume esperado de biogás, afetando assim o retorno do projeto. Como este estudo de caso retrata uma planta que recebe o RSU após a triagem, a probabilidade de ocorrência de um desvio pode ser reduzida através de contratos que possuem exigências mínimas na qualidade do insumo. A Tabela 4.2 mostra a análise dos riscos relacionados a desvios do RSU.

Tabela 4.2 - Análise dos riscos relacionados ao fornecimento de RSU e suas medidas de controle[VG1]

Desvio	Causa do Desvio	Efeito ou Consequência	Severidade	Probabilidade	Risco	Medida de controle	Severidade	Probabilidade	Risco Residual
Produção do biogás									
Falta de alimentação de resíduos	Logística de Coleta e transporte	Interrupção na produção	3	2	6	Contratos comerciais com punições previstas para interrupção no fornecimento de RSU.	3	1	3
	Problemas em pás carregadeiras		3	2	6	Redundância de Equipamentos; Contratos de manutenção com SLA adequado.	3	1	3
Composição do RSU	Natureza do RSU	Imprevisibilidade da composição final do biogás	2	2	4	Contratos comerciais com especificações mínimas de triagem do material.	2	1	2

O segundo grupo de riscos está associado às falhas construtivas, especificamente falha na vedação do reator ou das células do aterro. Estes riscos são apresentados na Tabela 4.3. Além de ocasionar perda de biogás, permitiria a entrada de ar e a digestão anaeróbia deixaria de ocorrer. Na presença de oxigênio, o processo passaria a produzir essencialmente CO₂. A falha de vedação pode ocorrer pela abertura indevida da comporta ou por danos estruturais no reator, ou falha no processo de fechamento da célula do aterro. No caso do reator, pode-se instalar sensores de detecção de O₂, e estabelecer procedimentos e intertravamentos que impeçam a abertura da porta com o reator carregado e definição de rotina de manutenção preventiva da estrutura do reator. Os sensores de O₂ servem para reduzir a severidade do desvio, uma vez que permite detecção precoce. Os intertravamentos e rotinas, por outro lado, atuam na redução de probabilidade de ocorrência.

Para o aterro, as células devem ser bem compactadas e vedadas corretamente quando estiverem completamente preenchidas, de modo a reduzir a probabilidade de falha e, caso ocorra um vazamento, ele será de menor severidade do que sem o procedimento correto de vedação.

Tabela 4.3 - Análise dos riscos construtivos e suas medidas de controle.

Desvio	Causa do Desvio	Efeito ou Consequência	Severidade	Probabilidade	Risco	Medida de controle	Severidade	Probabilidade	Risco Residual
Produção do biogás									
Vedação do reator	Abertura indevida de portas	Entrada de ar no reator - Não produção de metano	2	3	6	Instalação de sensores de presença de O ₂ , para que se possa corrigir o problema rapidamente; Procedimentos operacionais e intertravamentos.	1	1	1
	Danos estruturais		2	2	4	Rotina de manutenção preventiva.	2	1	2
Vedação das células do aterro	Procedimento incorreto de fechamento das células	Perda de biogás	3	3	9	Realizar o fechamento das células com todas as camadas necessárias.	2	1	2

No aterro sanitário, existem ainda riscos como deslizamentos, que podem provocar acidentes. A disposição o mais horizontal possível e compactação do RSU se mostram estratégias de mitigação efetivas para este caso, reduzindo significativamente tanto a probabilidade quanto a severidade de um desvio. A compactação, além de evitar deslizamentos, deixa menos espaço para ar no interior do aterro, minimizando também riscos de incêndio (WELCH et al., 2017).

Outro risco avaliado é a falha no controle de temperatura do reator, que é realizado pela recuperação de calor proveniente dos motogeradores que queimam o biogás. Um entupimento do trocador de calor ou vazamento pode provocar a perda deste controle, desviando a temperatura do processo da ideal e prejudicando a eficiência da produção. O impacto é baixo, afetando a eficiência, mas não inviabilizando a operação. De maneira geral, os entupimentos e vazamentos (incrustação e corrosão) podem ser evitados através de controle de qualidade da água que circula no sistema (ECOGEN BRASIL, 2022). Os riscos e medidas de controle associados a desvios operacionais são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Análise dos riscos operacionais e suas medidas de controle.

Desvio	Causa do Desvio	Efeito ou Consequência	Severidade	Probabilidade	Risco	Medida de controle	Severidade	Probabilidade	Risco Residual
Produção do biogás									
Deslizamentos	RSU mal compactado em grandes pilhas.	Acidentes de trabalho	4	3	12	Dipor o RSU mais horizontalmente e realizar a compactação adequada.	2	1	2
Temperatura	Entupimento de trocador de calor	Redução no volume de biogás produzido devido à temperatura fora da ideal	1	2	2	Controle de qualidade de água.	1	1	1
	Vazamento em tubulações		1	2	2	Controle de qualidade de água e rotinas de inspeção.	1	1	1

4.1.2 Captação do Biogás:

Para aterros sanitários, o sistema de captação do biogás compreende toda a tubulação do aterro até o soprador, o próprio soprador e a tubulação do soprador até o trocador de calor do sistema de secagem. Para a planta com reator, esta etapa não possui o soprador. A partir desta etapa, os riscos existentes são os mesmos independente da produção do biogás ocorrer através de um reator anaeróbio ou aterro sanitário. Nesta etapa, para o aterro, o principal risco é a falta de vazão do biogás provocada por falha elétrica ou mecânica do soprador. Este risco pode ser mitigado utilizando mais de um soprador, a depender do volume de biogás produzido, ou facilitando a manutenção através da disponibilização de peças de reposição em almoxarifado local. Esta solução é ligeiramente menos efetiva na mitigação do risco, mas reduz investimento inicial (CAPEX). A operação com mais sopradores minimiza significativamente a probabilidade de um desvio de falta de vazão.

Outro risco são os impactos causados pelo próprio biogás, ainda não tratado como, depósitos de particulados de siloxanos e a ocorrência de corrosão nas tubulações e conexões, causadas pela presença de H₂S e umidade no biogás ainda não tratado. Esta corrosão pode ser evitada utilizando materiais adequados para a tubulação como o PEAD (polietileno de alta densidade) (BRASKEM, 2005).

A Tabela 4.5 detalha os riscos do processo de captação do biogás, suas quantificações e respectivas medidas de controle.

Tabela 4.5 - Riscos no processo de captação do biogás.

Desvio	Causa do Desvio	Efeito ou Consequência	Severidade	Probabilidade	Risco	Medida de controle	Severidade	Probabilidade	Risco Residual
Captação do biogás									
Corrosão	Presença de H ₂ S na presença de umidade	Vazamentos ou ruptura de tubulações;	3	2	6	Uso de tubulações não corrosíveis, com materiais como PEAD.	3	1	3
Falta de vazão de biogás (aterro)	Falha elétrica no acionamento do soprador	Perda de vazão de biogás e interrupção na geração de energia elétrica.	3	2	6	Redundância de Equipamentos ou peças de reposição no local.	2	1	2
	Falha mecânica do soprador	Perda de vazão de biogás e interrupção na geração de energia elétrica.	3	2	6	Redundância de Equipamentos ou peças de reposição no local.	2	1	2

4.1.3 Processo de Secagem – Remoção de Umidade:

Diversos fatores podem provocar uma falha na remoção de umidade. Os riscos são sumarizados na Tabela 4.6. Uma possível causa é uma falha mecânica ou elétrica da unidade resfriadora. Desta forma, não ocorre troca de calor no trocador e o biogás não é resfriado, permitindo a passagem de umidade para as etapas subsequentes do processo. Para isso, é necessária a presença local de uma equipe de manutenção qualificada ou firmamento de contratos de manutenção, de modo a executar manutenção preventiva a atuação rápida em caso de falha. Esta medida atua tanto na redução da probabilidade de falha, através de preventiva, quanto na redução da severidade, reduzindo tempo de indisponibilidade.

Pode ocorrer ainda incrustação ou corrosão nos tubos do trocador de calor, provocados por excesso de sais, amônia, cloro ou outros contaminantes na água que circula entre o trocador e a unidade resfriadora. Para isso se faz necessário controle adequado da qualidade de água do sistema (ECOGEN BRASIL, 2022).

Um último ponto que pode provocar falha na remoção de umidade é a falta de drenagem do casco do trocador. Isso pode acontecer por instalação inadequada (sem o caimento necessário), entupimento ou dimensionamento incorreto do dreno. Sem drenagem, pode ocorrer excesso de água, provocando carregamento de umidade junto com o biogás na saída do trocador. Para evitar estes tipos de problemas, pode-se implementar uma automação do sistema de drenagem ou implementação de rotina operacional bem definida.

Tabela 4.6 - Riscos do processo de remoção de umidade do biogás.

Desvio	Causa do Desvio	Efeito ou Consequência	Severidade	Probabilidade	Risco	Medida de controle	Severidade	Probabilidade	Risco Residual
Secador									
Alta umidade na saída	Falha elétrica ou mecânica na unidade resfriadora.	Falha na remoção de H ₂ S nas membranas separadoras; Danos aos compressores do sistema de water scrubbing.	2	3	6	Equipe local de operação capacitada; Contrato de manutenção com SLA definido.	1	2	2
	Corrosão ou incrustação nos tubos da unidade resfriadora ou do trocador.		3	2	6	Controle de qualidade de água, especialmente para amônia, cloro, cálcio, magnésio (e outros sais).	2	1	2
	Falta de drenagem do casco do trocador		2	2	4	Automação ou procedimento e controle da rotina de drenagem.	2	1	2

4.1.4 Coluna de adsorção – Remoção de H₂S e Siloxanos:

No processo de adsorção, o principal risco é a saturação do material adsorvente, que levaria à não remoção das impurezas. Com a passagem de H₂S e dos siloxanos, pode ocorrer corrosão de tubulações metálicas e equipamentos, bem como incrustação de óxido de silício nos motogeradores, aumentando risco de falhas, custo de manutenção e indisponibilidade. A principal forma de evitar este risco é utilizando duas colunas de adsorção. Enquanto uma está adsorvendo, a outra está em regeneração, através da passagem de oxigênio (Petersson et al., 2009).

As duas colunas são manobradas através de válvulas. Uma falha de manobra das válvulas pode levar o biogás a passar pela coluna saturada, e ainda com a inserção de oxigênio. Uma demora na manobra das colunas pode permitir a passagem temporária dos compostos que deveriam ser removidos. Para evitar ambos os cenários, pode-se automatizar o processo. Com a inclusão de um instrumento que detecte a presença destes compostos, pode-se detectar a saturação do enchimento da coluna e comandar as válvulas de forma automática. Para isso, as válvulas devem ser motorizadas.

Como o material adsorvente possui limitação em sua regeneração, periodicamente será necessária a substituição (Costa et al., 2020). Para evitar falta do material quando houver a necessidade de troca, deve-se estudar as condições de fornecimento do insumo e manter estoque no local, caso necessário.

Tabela 4.7 - Risco de saturação das colunas de adsorção e consequente falha na remoção de impurezas.

Desvio	Causa do Desvio	Efeito ou Consequência	Severidade	Probabilidade	Risco	Medida de controle	Severidade	Probabilidade	Risco Residual
Coluna de Adsorção									
Alto teor de H ₂ S e siloxanos na saída do processo.	Saturação do material adsorvente.	Corrosão e incrustação em equipamentos mais a frente no processo.	4	3	12	Instalação de duas colunas para operação alternada; Implementação de controle automático do revezamento.	1	2	2

4.1.5 Uso do biogás:

Neste estudo de caso, a etapa de uso do biogás compreende os motogeradores. O principal risco é a incrustação de óxido de silício provocada pelo excesso de siloxanos no biogás. A presença de siloxanos aumenta o risco de uma manutenção corretiva e, portanto, demanda um menor intervalo de manutenções preventivas (Jenbacher®, 2021). Caso contrário, pode haver indisponibilidade dos equipamentos, perdas de geração e receita e elevado custo de manutenção corretiva. O risco é mitigado através do tratamento do biogás, como descrito na Seção 4.1.4.

Outro fator é o excesso de umidade no biogás, que pode provocar perda de eficiência nos motores e aumento da frequência de detonação, podendo provocar desarmes e indisponibilidade. A detonação é um fenômeno que ocorre em motores a combustão de ciclo Otto quando a queima do combustível não

acontece no momento adequado. No caso da umidade, ela retarda a ignição do combustível (WIMMER et al., 2006). Para evitar este risco, recomenda-se seguir a medidas mitigatórias do processo de secagem.

Por fim, pode ocorrer baixa pressão de gás e consequentemente desarme dos geradores. A redução na pressão pode ocorrer, principalmente se o consumo de gás for superior à vazão disponibilizada pelo sistema. Pode-se tratar de um cenário de produção reduzida ou geração excessiva. Para reduzir a probabilidade de uma falha desta natureza, deve haver no local uma equipe de operação capacitada para realizar os ajustes de controle e definir a correta operação dos grupos motogeradores.

Tabela 4.8 - Riscos na etapa de uso do biogás (na usina de geração).

Desvio	Causa do Desvio	Efeito ou Consequência	Severidade	Probabilidade	Risco	Medida de controle	Severidade	Probabilidade	Risco Residual
Uso do Biogás (motogeradores)									
Incrustação de óxido de silício	Teor excessivo de siloxanos no biogás.	Indisponibilidade. Perda de geração e receita. Elevado custo de manutenção.	3	3	9	Redução de intervalo de manutenções preventivas.	3	1	3
Baixa pressão de gás	Produção baixa de biogás; Demanda elétrica excessiva.	Desarme dos geradores. Perda de geração e receita.	3	2	6	Controle adequado de carga dos geradores.	3	1	3
Alto índice de detonação	Excesso de umidade	Aumento de falhas dos motogeradores; perda de geração e receita.	3	2	6	Ver medidas de controle para os secadores	2	1	2

4.2 Riscos Ambientais

Os principais riscos ambientais inerentes a uma instalação de produção de biogás são a emissão de gases poluentes, incêndios nos arredores da instalação e odor. Riscos como ruído são pouco relevantes para a vizinhança da instalação, mas podem ser considerados riscos ocupacionais para a equipe técnica devido à movimentação contínua do maquinário (pás carregadeiras e caminhões) e à operação dos motores elétricos da biorrefinaria.

Por se tratar especificamente de produção de biogás a partir de RSU, existe ainda o risco de infiltração de lixiviado no solo onde o material é depositado (COELHO et al., 2018). Este risco é endereçado pelo correto tratamento das superfícies, de modo que a impermeabilização do solo seja adequada nos locais onde os resíduos são depositados, seja no aterro sanitário, seja no interior do reator, e até mesmo no pátio onde o RSU é depositado e manobrado antes de entrar no reator. No caso do reator, a profundidade do aterro deve ser pelo menos 2 metros menor que o lençol freático, de modo a aumentar a segurança contra contaminação (Figueiredo, 2011). Tanto para o reator quanto para o aterro sanitário, deve-se ainda instalar um sistema de drenagem deste lixiviado, que será coletado e então processado em uma unidade de tratamento de efluentes, que pode estar na própria instalação ou externa.

A emissão de gases poluentes é mitigada pela instalação de *flare*, queimador destinado a realizar a combustão do biogás produzido, transformando o metano em CO₂, que possui muito menor impacto ao

efeito estufa. Este equipamento é instalado em uma derivação da linha de gás, antes da estação de tratamento do biogás. Esta solução faz com que o biogás coletado que não seja utilizado não seja descartado diretamente para a atmosfera. Para o caso de vazamento ao longo do processo, não há como queimar o biogás em *flare*. Para isso, instala-se uma válvula de bloqueio que se fecha quando há vazamento. Com isso, todo o biogás se direciona para o *flare*. Neste caso, no entanto, o tratamento do biogás e geração de energia elétrica são interrompidos. Especificamente para a produção em aterros sanitários, não é possível coletar todo o biogás produzido. Devido a permeabilidade do aterro, mesmo sendo compactado, cerca de 25% do biogás produzido é perdido para a atmosfera (COELHO et al, 2020).

Em relação ao risco de incêndios, em aterros sanitários, o risco pode ser reduzido através da compactação correta do resíduo, de modo que menos ar fique no interior das células. Para incêndios, tanto na instalação quanto nos seus arredores, o risco é evitado através de um estudo de classificação de área. O estudo de classificação deve ser realizado por profissional qualificado e determina os riscos de ignição em atmosferas explosivas. O resultado é um mapa da instalação e seus arredores, onde cada área é classificada quanto ao risco (NBR IEC-60079:2022). Qualquer possível fonte de material combustível, como florestas ou outras vegetações, depósitos de produtos inflamáveis etc. deve estar situada fora da zona de classificação da planta de biogás. Deste modo, caso haja um incêndio na planta, ele não se espalhará para a vizinhança. Para combustíveis gasosos, o estudo de classificação abrange ainda um estudo de dispersão atmosférica dos gases no local pois, caso haja um vazamento, o gás tenderá a se dispersar, podendo impactar nos limites da área classificada.

O risco sonoro na planta de produção e tratamento do biogás não pode de fato ser evitado e deve, portanto, ser mitigado através do uso de EPI (Equipamento de Proteção Individual), conforme preconiza a Norma Regulamentadora nº01 (NR-01). O ruído é proveniente principalmente do maquinário utilizado no transporte e compactação (para o aterro) do RSU, e de motores e compressores presentes nos processos de tratamento

Na central de geração de energia elétrica, o risco sonoro é mais relevante, devido à operação dos grupos motogeradores. Como exemplo, um motogerador a gás JMS 612 da Jenbacher (1.933kW) apresenta ruído de 100dB a 1 metro de distância do equipamento, segundo sua folha de dados. A Caterpillar, por sua vez, aponta que o motogerador G3520C, de potência equivalente, possui ruído de 114,4dB.

Desta forma, se faz necessário um sistema de atenuação de ruídos que pode ser feito de duas formas. A primeira forma é instalar os equipamentos em sala fechada, com revestimento de atenuação acústica nas paredes. Para este caso, pode-se utilizar um motor aberto. Outra forma é instalando motogeradores carenados. Estes podem ser instalados ao tempo e os fabricantes fornecem com diferentes níveis de ruído a depender da aplicação (tipicamente 65dB, 75dB ou 85dB a 1m). Adicionalmente, pode-se instalar

silenciosos nos escapamentos dos motores. Estes equipamentos são atenuadores de ruído e têm como função reduzir a emissão de ruídos provenientes do escapamento (ECOGEN BRASIL, 2022).

Outro risco ambiental para a central de geração é vazamento de óleo lubrificante. Cada motor de porte equivalente aos modelos citados anteriormente possui capacidade de óleo de cerca de 400 litros. A rotina de manutenção tipicamente leva à necessidade de armazenamento de bombonas de óleo (200 litros) para reposição periódica. Dessa forma, tanto a área dos geradores quanto a área de armazenamento das bombonas devem possuir contenção para evitar espalhamento e infiltração no solo (NBR 17505:2022).

Os riscos ambientais são muito regulados, tanto por órgãos nacionais (IBAMA) quanto estaduais e municipais. A Lei 6.838/81 estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente. A Resolução CONAMA 237/97, por sua vez, define o Licenciamento Ambiental, instrumento pelo qual os órgãos avaliam o impacto ambiental e autorizam, ou não, a instalação e operação de um empreendimento com potencial impacto ambiental.

O instrumento é composto por três licenças: Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO) (CONAMA 237/97). A LP solicita, dentre outros documentos, o Estudo de Impacto Ambiental (EIA), onde são avaliados os impactos à qualidade de ar, água etc., definidas as medidas mitigatórias ou compensatórias (para impactos que não podem ser mitigados). Somente após a emissão de LP e da LI, pode-se iniciar a construção do empreendimento.

4.3 Riscos Contratuais

Para uma planta de produção de biogás como a descrita neste estudo de caso, os principais contratos existentes são o de arrendamento do terreno, venda de energia e fornecimento de RSU. Além destes, pode haver outros contratos como de operação e manutenção de equipamentos, caso a gestora da planta não possua equipe especializada própria.

Para esta planta, o contrato de uso do terreno é menos crítico do que para o caso de um aterro sanitário. Um aterro fica em operação por períodos muito longos, com material sendo aterrado por períodos de até 30 anos, com produção de biogás por até um período equivalente. Neste caso, os contratos de uso da terra devem ser muito longos, de modo que a aquisição do terreno faça mais sentido. Já para a produção de biogás em reatores, a produção de metano ocorre de forma mais imediata, uma vez que o resíduo entra no processo, é digerido e então retirado do reator. Para este caso, contratos de arrendamento são opções viáveis.

Os contratos de venda de energia, por sua vez, possuem maior risco envolvido, pois os preços de energia dependem de uma série de conjunturas abrangentes, como regime hidrológico no país. Uma das

alternativas para comercialização da energia elétrica gerada é no mercado livre de energia (ACL, ambiente de contratação livre), instituído pela Lei nº 10.848/2004.

Consumidores no ACL tem liberdade de negociar contratos de montantes de energia diretamente com produtores. Estes contratos podem ser de curto prazo ou até mesmo de longo prazo, até 5 ou 10 anos. Os valores de mercado da energia dependem diretamente de um indicador chamado PLD (Preço da Liquidação das Diferenças). O PLD é um valor de custo de energia, dado em R\$/MWh, ao qual energia excedente dos contratos do ACL é negociada. As transações do valor excedente dos contratos são realizadas no Mercado de Curto Prazo e são apuradas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), conforme estabelecido no Decreto nº 5.177, de agosto de 2004. O valor do PLD depende do custo marginal de geração de energia, ou seja, do custo necessário para gerar um MWh adicional no sistema nacional.

Desta forma, em um cenário de chuva e reservatórios das usinas hidrelétricas altos, a energia adicional no sistema possui custo baixo, pois seria produzida por uma fonte barata, a hídrica. Por outro lado, caso o sistema esteja com grande volume de usinas termelétricas em operação, a produção de um MWh adicional é mais cara, pois a fonte térmica é mais cara. Com isso, o PLD também fica mais alto (CCEE).

Assim, o valor de venda de energia dos contratos de energia do ACL também é alterado, de forma que o produtor de energia deve ter em mente os cenários e perspectivas do mercado de energia para que consiga executar contratos que otimizem a receita e retorno do investimento da unidade produtora. Uma estratégia para minimizar o risco dos contratos de energia é contar com suporte de empresas especializadas em comercialização de energia elétrica.

Outra forma de comercializar a energia, especialmente aplicada para plantas de produção de energia com capacidade instalada de até 5MW, é através da modalidade de geração distribuída. Este tipo de mercado é regulamentado pela Resolução Normativa nº482 da Aneel, de 2012, e pela Lei nº 14.300/2022. Dentro da geração distribuída, existem quatro modalidades de contrato aplicáveis. No Autoconsumo e Autoconsumo remoto, o usuário é o próprio produto. A energia pode também ser comercializada através de cooperativas e consórcios, em que um número de consumidores, que podem ser pessoas físicas ou pessoas jurídicas, firmam um contrato no qual cada um possui uma determinada porcentagem da energia gerada na planta. Estas modalidades, no entanto, se aplicam somente para potências pequenas e não serão profundamente avaliadas neste trabalho.

O último dos principais riscos contratuais refere-se ao fornecimento do RSU que será digerido para produção do biogás. Este fornecimento deve permitir a operação contínua da planta, assim como atender a critérios de qualidade. Por se tratar de um processo de biodigestão, somente a parcela orgânica é digerida. Desta forma, se o RSU possuir volume muito grande de matéria inorgânica e impurezas, o biogás não será produzido no volume adequado.

Além disso, o sistema de tratamento do biogás é dimensionado para a purificação de um biogás com características específicas. A presença de impurezas pode ainda tornar o tratamento ineficiente.

5- Conclusões

A produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) é inevitável na forma como a sociedade vive atualmente. Este resíduo, no entanto, se apresenta como um importante problema socioambiental. O volume elevado e descarte inadequado, principalmente nos países menos desenvolvidos, provoca um grande volume de emissões de gases de efeito estufa (GEE), contaminação de reservas de água, especialmente as subterrâneas, e proliferação de doenças.

Uma das formas de minimizar o impacto do RSU é, além de descartá-lo, realizar o aproveitamento energético dos gases produzidos no processo de decomposição deste material. Esta decomposição, quando na ausência de oxigênio, produz o biogás, gás combustível majoritariamente composto de metano e, portanto, um potencial combustível. O aproveitamento pode ser feito tanto no local, para produção de calor ou energia elétrica, quanto remotamente, através da purificação do biogás e posterior injeção na rede de gás ou como combustível veicular.

A produção de biogás a partir de RSU pode ser realizada em aterros sanitários, onde o resíduo é armazenado, compactado e aterrado, ou em reatores de digestão anaeróbia. Os aterros possuem a vantagem de já serem a forma final de descarte e comportarem um volume de resíduos muito grande, mas apresentam baixo rendimento, uma vez que a eficiência de captação do biogás gerado é de somente cerca de 75% (Coelho S, et al, 2020). Nos reatores, por outro lado, é possível captar todo o biogás produzido. No entanto, a operação é mais complexa, pois é necessário um tratamento prévio do RSU antes que seja submetido à digestão anaeróbia. Além da separação da fração orgânica, em certos tipos de reator é necessária ainda a trituração e diluição do resíduo. O rejeito que sai do reator após a digestão do RSU deve ainda ser descartado de forma correta.

O aproveitamento energético do biogás é um grande potencial ainda pouco explorado. No estado de São Paulo somente, o potencial de produção de biogás, utilizando somente a parcela do RSU que é descartada corretamente em aterros, foi calculada em 1.528.007.602 Nm³/ano em 2017 (Coelho S, et al, 2020). Com este volume, pode-se produzir cerca de 800 milhões de Nm³ de biometano, que poderia efetivamente substituir volume equivalente de gás natural, combustível fóssil e mais poluente. Poder-se-ia ainda produzir 3.120.220 MWh, equivalente a uma usina de 350MW operando a 100% de carga durante todo o ano.

Para que se possa aproveitar o potencial energético do biogás com segurança, no entanto, deve-se realizar um tratamento de purificação. O biogás, ao ser produzido, é saturado de umidade. Além disso, possui compostos de enxofre como o H₂S que, em contato com umidade produz ácido sulfúrico e pode provocar corrosão de equipamentos, tubulações e, se emitido para a atmosfera, provocar chuvas ácidas.

Para certas aplicações, onde o biogás será utilizado como substituto ao gás natural ou outros combustíveis (GLP, GNV), outros tratamentos são necessários, como a remoção de CO₂ para aumentar a concentração de metano e consequentemente o poder calorífico do gás. Quando a aplicação é geração de energia elétrica, este tratamento não é necessário pois, mesmo com o teor de CO₂ maior, a geração continua ocorrendo. Para o caso de resíduos sólidos urbanos, existe ainda uma grande presença de compostos organossilícicos como os siloxanos que quando queimados, produzem óxido de silício, um sal altamente incrustante que provoca danos severos a motores e queimadores. Estes compostos se originam principalmente de produtos cosméticos que compõe parte dos resíduos.

A implementação e operação de plantas de produção de biogás, portanto, deve levar em consideração uma série de fatores, uma vez que existem diversos riscos associados que podem causar danos e prejudicar o retorno destes investimentos, afetando assim o desenvolvimento deste setor com tanto potencial de redução de emissões e tamanho impacto ambiental.

Este trabalho buscou avaliar de forma abrangente os riscos associados a este tipo de projetos, desde riscos legais e contratuais até riscos técnicos em todas as etapas do processo (produção, tratamento e uso do biogás). Os riscos técnicos foram avaliados pela metodologia HAZOP (*Hazard and Operability Study*), que avalia quantitativamente a magnitude de cada risco, propõe medidas de controle e mitigação e então avalia o risco residual. As medidas de controle a ser adotadas dependerão da aceitação ao risco e serão determinadas pelo próprio investidor no projeto que pode optar por medidas mais ou menos restritivas.

Foram estudados dois casos específicos, com produção de biogás a partir de um reator do tipo garagem e produção a partir de aterro sanitário. Para ambos os casos, o sistema de tratamento considerado foi o mesmo, com remoção de H₂S e siloxanos por adsorção com óxido de ferro e remoção de umidade por resfriamento (condensação da umidade) auxiliado por uma unidade resfriadora de água (*chiller*) e trocador de calor. O uso do biogás estudado foi para produção de energia elétrica *in- loco*. O sistema de tratamento aplicado ao biogás foi dimensionado especificamente para esta aplicação que, embora possua exigências, é menos criterioso do que em uma planta de produção de biometano, que deve atender à Resolução 885 da ANP. A definição do sistema foi realizada com base nas tecnologias disponíveis no mercado e nas práticas adotadas pela empresa de geração de energia e utilidades Ecogen Brasil®.

Soluções com apelo ambiental muito forte tem uma tendência de expansão pouco controlada. Outros casos como a energia solar fotovoltaica vivenciaram um aumento muito grande no número de fornecedores, muitas vezes com qualificação insuficiente. O caso de tratamento de resíduos tem menor chance de passar por este processo por se tratar de projetos de maior magnitude e investimento. Um aterro sanitário tipicamente é um projeto grande que atende o descarte de resíduos de grandes centros urbanos ou conjuntos de municípios, muitas vezes em sua totalidade.

Devido ao tamanho dos projetos e à quantidade e complexidade dos riscos envolvidos em todas as etapas, desde o licenciamento ambiental até a operação, projetos de produção de biogás de RSU devem contar com um grupo qualificado de profissionais em diversas disciplinas. Existe uma grande interface com órgãos governamentais, especialmente os ambientais, que demandam conhecimento profundo de legislações e processos. Existem ainda riscos contratuais, especialmente relacionados ao fornecimento dos resíduos e comercialização do produto energético final, que pode ser energia elétrica ou o próprio biogás/biometano. Permeando todas as etapas, existem os riscos técnicos, que devem ser endereçados sob diversas perspectivas, como eficiência, confiabilidade e segurança, tanto patrimonial quanto humana.

Com isso, apesar de haver um grande potencial energético do RSU, o crescimento do setor deve ser bem fundamentado por leis, normas e qualificação técnica de profissionais para atuar no setor. No caso do Brasil, existe a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), bem como o Plano Nacional dos Resíduos Sólidos (Planares). De forma conjunta, estes instrumentos buscam estabelecer o caminho para a otimização e gestão de resíduos incluindo, mas não se limitando à produção de biogás.

O processo passa por conscientização e punição de agentes públicos ou privados que promovam descarte incorreto de resíduos. Além disso, da mesma forma que ocorreu para diferentes setores do ramo de energia, como a solar, eólica e o etanol, desenvolvimento sustentável do setor passa por políticas públicas de incentivo. Estas políticas são essenciais para garantir o interesse de investidores em projetos de aproveitamento energético do potencial do RSU no Brasil.

O Brasil é um país a frente da maioria do mundo no quesito de qualidade da matriz energética (e elétrica). No entanto, o restante do mundo, especialmente a Europa, vem se movimentando intensamente para a descarbonização, especialmente frente ao Acordo de Paris (2015). É importante que o Brasil continue a se movimentar no sentido da descarbonização e sustentabilidade para se consolidar em uma posição de referência. Parte desse compromisso passa pela gestão adequada de resíduos sólidos urbanos.

6- Bibliografia

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 17505:2022

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR IEC-60079:2022

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012;

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016;

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022;

ALVES E, et al. Biodigestores: construção, operação e usos do biogás e do biofertilizante visando a sustentabilidade das propriedades rurais. Simpósio Brasileiro de Agropecuária Sustentável, 2010.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº482. Publicada em 17 de abril de 2012e pela Lei nº 14.300/2022

ANGELIDAKI, I. et al. Biogas Upgrading: Current and Emerging Technologies em Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels (Second Edition) (p.817-843), 2019.

ANP - Agência Nacional do Petróleo. Resolução nº 886 de 29 de setembro de 2022.

BRASIL. Lei Nº 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2004

BRASIL. Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010

BRASIL. Lei Nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2022

BRASIL. Lei Nº 6.838, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1981

BRASKEM. Polyethylene chemical resistance. 2005.

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Conceitos de Preços. Disponível em [https://www.ccee.org.br/precos/conceitos-precos#:~:text=O%20Pre%C3%A7o%20de%20Liquida%C3%A7%C3%A3o%20das%20Diferen%C3%A7as%20\(PLD\)%20%C3%A9%20o%20resultado,%C3%A9%20gerada%20por%20usinas%20hidrel%C3%A9tricas](https://www.ccee.org.br/precos/conceitos-precos#:~:text=O%20Pre%C3%A7o%20de%20Liquida%C3%A7%C3%A3o%20das%20Diferen%C3%A7as%20(PLD)%20%C3%A9%20o%20resultado,%C3%A9%20gerada%20por%20usinas%20hidrel%C3%A9tricas).

COELHO, S et al. Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo – São Paulo: IEE--USP, 2020.

COELHO, Suani Teixeira. (Ed.). Municipal Solid Waste Energy Conversion in Emerging Countries: Technologies, Best Practices, Challenges and Policy. Oxford: Elsevier, 2020. cap.3, p.63-105.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 237. Publicada em 19 de dezembro de 1997.

COSTA C, et al. Hydrogen Sulfide Adsorption by Iron Oxides and Their Polymer Composites: A Case-Study Application to Biogas Purification. Materials 2020, 13, 4725.

CREMONEZ et al. Biodigestão Anaeróbia no Tratamento de Resíduos Lignocelulósicos. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 2, p. 21-35, 2013

ECOGEN BRASIL SOLUÇÕES ENERGÉTICAS. Estudos de análise de risco de planta de produção de biogás a partir de descarte de produção de indústria alimentícia para substituição de GLP em fornos de cocção, 2021.

ECOGEN BRASIL SOLUÇÕES ENERGÉTICAS. Projeto e Implementação de cogeração a biomassa com turbina a vapor em ciclo Rankine, 2022.

ECOGEN BRASIL SOLUÇÕES ENERGÉTICAS. Projeto e Implementação de um motogerador a gás natural em sistema de cogeração em Indústria alimentícia, 2022.

EPA - Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/final-national-recycling-strategy.pdf>

EUROSTAT, European Statistical Office - Extraído de https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasmun/default/table?lang=en

FIGUEIREDO, N. Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso (Dissertação de Mestrado). Orientadora: Suani Teixeira Coelho. São Paulo, 2011.

GARCILASSO V.P. et al. Cogeração de energias térmica e eletromecânica. In: COELHO, S.T. (Org.). Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano. São Paulo, 2018.

GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Agência Alemã de Cooperação Internacional). Diretrizes para o uso seguro da tecnologia de biogás (Traduzido). Freising, 2016.

INNIO JENBACHER® - Technical Instruction TA 1000-0300 – Fuel gas and combustion air requirements. Jenbach Austria, 2021.

KAZA S, et al. What a Waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development Series, World Bank Group. 2018

LEBUHN, M.; BAUER, C.; GRONAUER, A. Probleme der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen im Langzeitbetrieb und molekularbiologische Analytik. VDLUFA-Schriftenreihe 64, p. 118-125, 2008.

LEME, M. M. V. (2010). Avaliação das Opções Tecnológicas para Geração de Energia a Partir dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia da Energia. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2010.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. Norma Regulamentadora nº 1 (NR-01). Atualizada em 09 de março de 2020.

MMA, Ministério do Meio Ambiente – Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), 2022;

NGER – National Greenhouse and Energy Reporting – Australian Government. Disponível em [https://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/About-the-National-Greenhouse-and-Energy-Reporting-scheme/global-warming-potentials#:~:text=Global%20warming%20potentials%20\(GWPs\)%20are,one%20tonne%20of%20carb on%20dioxide.](https://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/About-the-National-Greenhouse-and-Energy-Reporting-scheme/global-warming-potentials#:~:text=Global%20warming%20potentials%20(GWPs)%20are,one%20tonne%20of%20carb on%20dioxide.) 2022

ONU – African Clean City Platform (ACCP) - <https://unhabitat.org/african-clean-cities-africas-waste-problems>. Publicado em 2017.

PETERSSON A, WELLINGER A. Biogas Upgrading Technologies – Development and Innovations. 2009.

PROBIOGÁS. Tecnologias de Digestão Anaeróbia com Relevância para o Brasil – Substratos, Digestores e Uso de Biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Bruno Silveira ... [et al.]. ISBN 978-85-7958-039-0 – Coletânea de publicação do Probiogás – Série Desenvolvimento do Mercado de Biogás. 1ª Edição. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

RAJARAM, V, et al. From Landfill Gas to Energy: Technologies and Challenges. CRC Press. Leiden, 2012.

SCHWEIGKOFER M, NIESSNER R. Removal of siloxanes in biogases. J Hazard Mater 83:183–196, 2001.

SHEN, M. et al. A review on removal of siloxanes from biogas: with a special focus on volatile methylsiloxanes. Springer Nature, 2018.

SILVA, M. S. Biodigestão anaeróbia no saneamento rural. Lavras: UFLA/FAEPE, 71p. (Textos Acadêmicos). 2001.

SULLIVAN P. The Importance of Landfill Gas Capture and Utilization in the U.S. 2010

THERMAL FLUIDS CENTRAL – Heat of Combustion. Disponível em https://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Heat_of_Combustion#References. Publicado em 2011.

VILHENA, A. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado, 4a ed. IPT/CEMPRE. São Paulo, 2018

WEILAND, P.: Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate; VDI-Berichte, nº 1620 “Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven”; p. 19-32; VDI-Verlag 2001.

WELCH, M.A. et al. Correct compaction. Publicado em Waste Today Magazine, 2017.

Wimmer, A, et al. Effects of Humidity and Ambient Temperature on Engine Performance of Lean Burn Natural Gas Engines. ASME 2006 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference (ICEF2006). Sacramento, California, USA. November 5–8, 2006. pp. 421-429

THE WORLD BANK. What a Waste: An Updated Look into the Future of Solid Waste Management. Disponível em <https://www.worldbank.org/en/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>. Publicado em 20 de setembro de 2018.