UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

Gustavo Silva Magalhães Gomes

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS GERADOS NA REGIÃO DE OURO PRETO - MG

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Ouro Preto, janeiro de 2022

Gustavo Silva Magalhães Gomes

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS GERADOS NA REGIÃO DE OURO PRETO - MG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Eduardo Lobo Baêta

Coorientadora: Me. Yasmim Arantes da Fonseca

Ouro Preto, janeiro de 2022

Folha de aprovação

Gustavo Silva Magalhães Gomes

“Avaliação econômica da produção de biogás a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos gerados na região de Ouro Preto - MG”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado no dia 13/01/2022 pela comissão avaliadora constituída por:

Bruno Eduardo Lobo Baêta (Orientador)

Yasmim Arantes da Fonseca (Coorientadora)

Mateus de Souza do Amaral

Hector Javier Luna Wandurraga

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar nessa trajetória.

Aos meus pais Ricardo e Valdineia e minha irmã Bruna, pelo carinho e suporte para que eu me dedicasse ao máximo aos estudos.

À Alice, por estar ao meu lado durante todo esse período, por acreditar em mim e me apoiar em todos os momentos.

Ao professor Dr. Bruno Eduardo Lobo Baeta e à Me. Yasmim Arantes da Fonseca, pela orientação, incentivo, confiança e parceria nesta e em outras pesquisas.

Ao Programa de Educação Tutorial da Engenharia Ambiental (PET), pelo desenvolvimento pessoal e profissional e pelas diversas amizades criadas e momentos únicos. Também agradeço ao Dr. José Francisco do Prado Filho e ao Dr. Aníbal da Fonseca Santiago pela orientação e amizade no PET.

Aos amigos e colegas da engenharia ambiental e do PET, por tornarem os dias mais descontraídos.

À CAINT, ao programa *Living Lab Biobased Brazil* e à *HZ University of Applied Sciences*, por tornarem real o meu sonho de estudar na Holanda. Sou grato também ao Dr. Hans Cappon, Maria Van Schaik e Iarima Silva Mendonça na Holanda e ao Dr. Guilherme José Cunha Gomes no Brasil pela orientação durante minha pesquisa no exterior.

À Fundação Gorceix, por oferecer diversos cursos de qualificação profissional, bem como bolsas de mérito acadêmico, as quais foram fundamentais para a realização do meu intercâmbio.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas pelo ensino gratuito e de qualidade.

RESUMO

A viabilidade econômica da geração e aproveitamento do biogás, por meio da digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) de Ouro Preto – MG, foi avaliada sob diferentes condições de contorno. Neste sentido, os cenários 1 e 2 compararam a lagoa anaeróbia e os digestores CSTR como sistemas para o tratamento da FORSU no município. Nos cenários 3 e 4 foi avaliada a influência da venda de créditos de descarbonização (CBIOs), no âmbito do Renovabio, e nos cenários 5 e 6 foi estudada a formação de um consórcio entre os municípios de Ouro Preto, Mariana e Itabirito, visando aumentar a escala do projeto. Os resultados indicaram que os digestores CSTR não foram viáveis para as condições estudadas. Já em relação às lagoas anaeróbias, verificou-se a viabilidade econômica ao realizar a venda de CBIOs e ao aumentar a escala do projeto. Por fim, o cenário 5 apresentou a maior taxa interna de retorno (TIR) - 17,26% e o menor tempo de retorno do investimento - 6,63 anos.

Palavras chaves: FORSU, Biogás, CBIO, Avaliação Econômica.

ABSTRACT

The economic feasibility of generating and using biogas, through the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste (FORSU) from Ouro Preto – MG, was evaluated under different boundary conditions. In this sense, scenarios 1 and 2 compared the anaerobic lagoon and the CSTR digesters as systems for the treatment of the OFMSW in the city. Scenarios 3 and 4 evaluated the influence of selling decarbonization credits (CBIOs) within the scope of Renovabio, and scenarios 5 and 6 studied a consortium between the cities of Ouro Preto, Mariana and Itabirito, aiming to increase the scale of the project. The results indicated that CSTR digesters were not feasible in the studied conditions. In relation to the anaerobic lagoons, the economic feasibility was verified by selling CBIOs or by increasing the scale of the project. Finally, scenario 5 had the highest internal rate of return (IRR) - 17.26% and the shortest payback time - 6.63 years.

Keywords: OFMSW, Biogas, CBIO, Economic Feasibility.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

B3 – Brasil, Bolsa, Balcão

CAPEX – Despesas em Bens de Capital

CBIO – Crédito de Descarbonização

CHP – Cogeração de Energia Térmica e Elétrica

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

COV – Carga Orgânica Volumétrica

COVs – Compostos Orgânicos Voláteis

CSTR – Reator Tanque Agitado Contínuo

FORSU – Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GNV – Gás Natural Veicular

INPC – Índice Nacional de Preço ao Consumidor

OPEX – Despesas Operacionais

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PNMA - Política Nacional do Meio Ambiente

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

VPL – Valor Presente Líquido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução histórica das publicações relacionadas a FORSU e biogás.....16
Figura 2 - Autores com mais de 5 publicações sobre o assunto.....17
Figura 3 - Rede de colaboração das pesquisas de biogás utilizando FORSU.....18
Figura 4 - Ilustração das etapas da digestão anaeróbia.....26
Figura 5 - Biodigestor de lagoa anaeróbia.....29
Figura 6 - Biodigestor CSTR.....31
Figura 7 – Tratamento, purificação e uso do biogás.....34
Figura 8 - Estrutura esquemática da cogeração.....37
Figura 9 - Cenários estudados para geração e aproveitamento econômico do biogás.....43
Figura 10 - Localização do município de Ouro Preto e municípios mais próximos.....44
Figura 11 - Fluxograma de processo da usina.....47
Figura 12 - Localização do aterro controlado de Ouro Preto.....51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos.....28
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens da Lagoa Anaeróbia.....30
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens do CSTR.....32
Tabela 4 - Composição do biogás de aterro e biodigestores.....33
Tabela 5 – Cenários avaliados no estudo.....42
Tabela 6 - Dados de entrada técnicos utilizados na ferramenta *Biogas Tool*.....49
Tabela 7 - Dados de entrada econômicos utilizados na ferramenta *Biogas Tool*.....53
Tabela 8 - Dados de entrada utilizados na ferramenta RenovaCalc.....55
Tabela 9 - Geração de FORSU nos municípios de Ouro Preto, Mariana e Itabirito...…...56
Tabela 10 - Equipamentos e custos relacionados ao cenário 1.....58
Tabela 11 - Equipamentos e custos relacionados ao cenário 2.....59
Tabela 12 - Custos operacionais dos cenários 1 e 2.....60
Tabela 13 - Receitas e poupanças dos cenários 1 e 2.....61
Tabela 14 - Análise financeira do cenário 1.....62
Tabela 15 - Cálculo dos indicadores financeiros do cenário 1.....63
Tabela 16 - Resumo do CAPEX, OPEX e receitas dos cenários 1 e 2.....64
Tabela 17 - Receita com a venda de CBIOS para a lagoa e CSTR.....65
Tabela 18 - Redução da emissão de CO_2 estimada pelo *Biogas Tool*.....65
Tabela 19 - Análise financeira do cenário 3.....66
Tabela 20 - Cálculo dos indicadores financeiros do cenário 3.....67
Tabela 21 - Equipamentos e custos relacionados ao cenário 5.....68
Tabela 22 - Equipamentos e custos relacionados ao cenário 6 69
Tabela 23 - Equipamentos e custos relacionados ao cenário 6.....70
Tabela 24 - Receitas e poupanças dos cenários 5 e 6.....71
Tabela 25 - Análise financeira do cenário 5.....72
Tabela 26 - Cálculo dos indicadores financeiros do cenário 5.....73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 12
1.1. Introdução 12
1.2. Objetivos 14
1.2.1. Objetivos Gerais 14
1.2.2. Objetivos Específicos 14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
2.1. Análise bibliométrica e relevância da produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos 15
2.2. Resíduos sólidos urbanos 18
2.3. Legislação 19
2.3.1. RSU e consórcios 19
2.3.2. Biocombustíveis e energia elétrica 21
2.4. Pré-tratamento dos RSU 23
2.5. Digestão anaeróbia 25
2.6. Tecnologias de digestão anaeróbia e aspectos operacionais 26
2.6.1. Lagoa anaeróbia 29
2.6.2. CSTR 30
2.7. Tratamentos complementares 32
2.7.1. Tratamento do biogás 32
2.7.2. Tratamento do digestato 35
2.8. Geração, comercialização e incentivos da energia elétrica 36
2.9. Biogás no mundo 39
2.10. Viabilidade de projetos 40
3. METODOLOGIA 42
3.1. *Biogas Tool* 43
3.2. Área de estudo 44
3.2.1. Ouro Preto - MG 44
3.2.2. Itabirito - MG 45
3.2.3. Mariana - MG 46
3.3. Usina de produção de biogás 47

3.4. Cenários 1 e 2: Usina de biogás utilizando Lagoa anaeróbia ou CSTR 48
3.5. Cenários 3 e 4: Influência da venda de CBIOs 53
3.6. Cenários 5 e 6: Influência da criação de um consórcio municipal 55
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 58
4.1. Cenários 1 e 2 58
4.2. Cenários 3 e 4 64
4.3. Cenários 5 e 6 67
5. CONCLUSÕES 75
6. RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS 77
7. REFERÊNCIAS 78

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Introdução

A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) ainda é um desafio em grande parte do Brasil. A Lei 12.305/2010, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), proibiu o lançamento de RSU in natura a céu aberto. No entanto, o Brasil ainda destina inadequadamente 40,5% dos resíduos gerados no país, sendo que 17,9% são encaminhados para lixões e 23,6% para aterros controlados (ABRELPE, 2020). Essas estruturas possuem alto potencial de gerar impactos ambientais, uma vez que podem causar a contaminação das águas, do ar e do solo, bem como podem favorecer a proliferação de vetores de doenças (GONÇALVES FERREIRA, 2017).

Até 2050, projeta-se um aumento de quase 50% no montante de RSU, em comparação ao ano base de 2019, enquanto o crescimento populacional esperado é de 12% (ABRELPE, 2020). Considerando a baixa disponibilidade de área para a construção de aterros sanitários nos grandes centros urbanos e os altos custos associados à essas obras, a PNRS incentiva iniciativas relacionadas a não geração, redução, reutilização, reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético, a fim de que seja disposto em aterros apenas o rejeito, ou seja, a fração do resíduo que não é passível de tratamento ou recuperação com tecnologia disponível e economicamente viável (BRASIL, 2010).

Apenas em 2020 foram gerados 79,6 milhões de toneladas de RSU no Brasil, sendo que 45,3% eram orgânicos (ABRELPE, 2020). Esses resíduos, mesmo quando são dispostos de forma adequada, podem reduzir significativamente a vida útil de aterros sanitários (PEREIRA; MAIA, 2012). Torna-se evidente, então, a necessidade de implementar tecnologias de aproveitamento desses resíduos orgânicos. Dentre essas formas de tratamento destaca-se a digestão anaeróbia, que está sendo cada vez mais utilizada, porque possibilita o aproveitamento energético do biogás produzido durante a degradação (REIS, 2012).

O biogás é uma fonte de energia renovável resultante da ação de bactérias anaeróbias, as quais decompõem os resíduos em condições controladas. A digestão anaeróbia da fração

orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) está alinhada com os objetivos do desenvolvimento sustentável e com o conceito de economia circular, já que possibilita a utilização do digestato como biofertilizante, bem como o aproveitamento energético do biogás, agregando valor econômico aos resíduos orgânicos, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa, aumentando a vida útil de aterros e auxiliando na diversificação da matriz energética brasileira (BRASIL, 2020a).

Em países desenvolvidos o aproveitamento do biogás é mais difundido, variando de país a país, de acordo com as práticas econômicas, direcionamento das políticas de apoio a este mercado e estrutura da indústria. Enquanto na Alemanha, que domina o mercado de biogás, o foco é voltado para plantas de biodigestão, no Reino Unido há mais iniciativas de coleta e tratamento do biogás proveniente dos aterros sanitários (CARVALHO *et al.*, 2019).

No Brasil ainda existem poucas plantas de produção de biogás quando comparado com países da Europa e da Ásia. O aproveitamento do biogás da FORSU no país depende de vários fatores. Entre eles, um dos maiores gargalos é a segregação dos resíduos sólidos na fonte, pois a instalação de uma etapa de pré-tratamento para a separação adequada pode onerar o negócio, inviabilizando alguns projetos de menor porte (ABIOGÁS, 2020). Também é fundamental a escolha da tecnologia de tratamento da FORSU com maior viabilidade para o local, seja por reatores tanque agitado contínuo (CSTR) ou lagoas anaeróbias. A captação do biogás gerado nos aterros sanitários já instalados também é uma solução possível. Outro aspecto importante para o aproveitamento do biogás são os incentivos econômicos existentes, como por exemplo a venda de crédito de descarbonização (CBIO), que é um dos instrumentos adotados pelo Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) para aumentar a participação de bioenergia na matriz energética brasileira (B3, 2021). Por fim, a regionalização dos serviços de saneamento, incentivada pela Lei nº 14.026/2020, que atualiza o marco do saneamento, é outro fator importante para a viabilidade técnica e econômico-financeira dos projetos de biogás, já que há um aumento de escala e de eficiência (BRASIL, 2020b).

Em consonância com o cenário geral brasileiro, a cidade de Ouro Preto - MG também não destina os resíduos sólidos urbanos orgânicos para a geração de biogás. São gerados anualmente cerca de 22 mil toneladas de RSU no município de Ouro Preto, sendo que mais de

50% é material orgânico (SNIS, 2019). A coleta seletiva na cidade tem baixa adesão da população, sendo grande parte dos RSU destinados a um aterro controlado, que atualmente passa por problemas relacionados à operação (PIMENTA; DIAS, 2018). De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico de Ouro Preto, elaborado em 2013, estão entre as sugestões de ações a serem realizadas imediatamente: a educação ambiental sobre a coleta seletiva e a contratação de uma empresa especializada em elaborar estudo técnico de viabilidade econômico-financeira para a implantação usina de geração de energia a partir dos resíduos. Diante do exposto, a pesquisa buscou avaliar diferentes cenários tecnológicos e econômicos visando o aproveitamento do biogás a partir da FORSU gerada no município de Ouro Preto - MG.

1.2. Objetivos

O conteúdo dessa pesquisa terá como pilares os seguintes objetivos:

1.2.1. Objetivos Gerais

- ✓ Avaliar a viabilidade do aproveitamento de biogás obtido a partir da FORSU gerada na região de Ouro Preto - MG.

1.2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Comparar as alternativas tecnológicas de lagoa anaeróbia e reator tanque agitado contínuo (CSTR) para produção de biogás a partir da FORSU gerada em Ouro Preto - MG;
- ✓ Avaliar a influência da venda de créditos de descarbonização (CBIO) na viabilidade econômica do aproveitamento do biogás;
- ✓ Avaliar a influência da criação de um consórcio municipal na viabilidade econômica do aproveitamento do biogás.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Análise bibliométrica e relevância da produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos

A análise bibliométrica tem o potencial de "introduzir um processo de revisão sistemática, transparente e reproduzível, com base na medição estatística da ciência, dos cientistas ou da atividade científica" (ARIA; CUCCURULLO, 2017). Ou seja, o grande diferencial da análise bibliométrica é a possibilidade de tratar um grande volume de dados de forma estruturada e organizada, facilitando a identificação de documentos, palavras-chave e autores mais importantes, assim como as tendências apontadas pela literatura (COBO, 2011).

Nesse sentido, foi realizada uma breve análise da literatura em relação à produção de biogás a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, a partir da base referencial *Web of Science* e da ferramenta bibliometrix, que é uma biblioteca criada por Aria e Cuccurullo (2017) para ser utilizada dentro do software RStudio. A equação de busca foi inserida no sistema no dia 19 de outubro de 2021. A pesquisa foi estruturada considerando as palavras-chave: "*biogas*" e "*OFMSW*" (ou FORSU) no título, resumo, palavras-chave do autor e *Keywords Plus* (termos de índice gerados automaticamente a partir dos títulos de artigos citados). Os documentos foram refinados entre artigos e capítulos de livro, entre os anos 1980 a 2021.

A busca na base de dados retornou 345 publicações desde o ano de 1992 até o fim de outubro de 2021. Dessa forma, foram extraídos e analisados 29 anos de publicações científicas relacionadas ao biogás produzido a partir da FORSU. Pela Figura 1 é possível notar que antes de 2000 a média era de 1,5 publicações por ano. A partir do ano de 2015 houve um aumento relevante na média anual de publicações, saindo de 5,5 para 32,9. Ademais, nota-se que, apenas no ano de 2020, houve mais publicações que nos primeiros 16 anos de pesquisa. Diante do exposto, é notável que a produção de biogás a partir da FORSU, foco do presente trabalho, é um tema de pesquisa relevante e se mostra como uma tendência da literatura para os próximos anos.

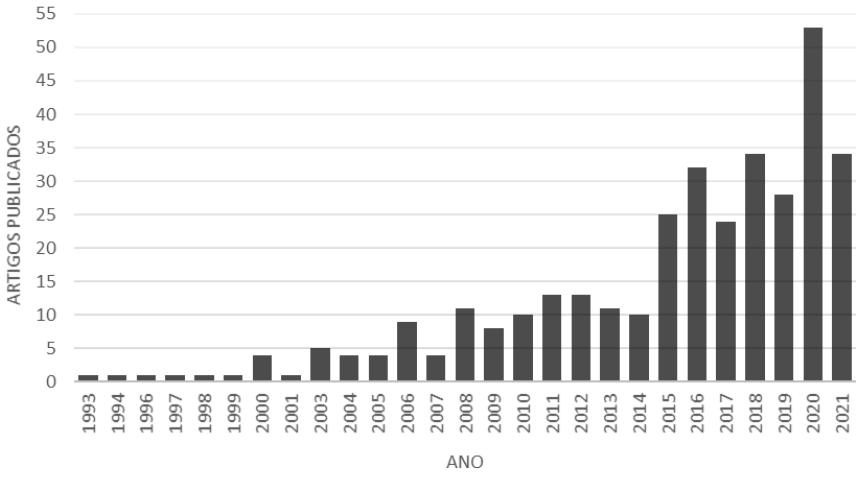

Figura 1 – Evolução histórica das publicações relacionadas a FORSU e biogás (Autor).

Como já citado, os primeiros artigos datam de 1992. O artigo intitulado "*Comparison between thermophilic and mesophilic anaerobic-digestion of sewage-sludge coming from urban waste-water treatment plants*", de Cechi *et al*. (1992), apesar do título destacar apenas o lodo de estações de tratamento de esgoto, retrata que o aumento da produção de biogás na digestão termofílica da FORSU compensa o consumo de energia para o aquecimento inicial do resíduo.

O segundo artigo publicado em 1992, com o título "*Anaerobic biodegradability of the organic-components of Municipal Solid-Wastes (OFMSW)*", de Peres *et al*. (1992), investigou a digestão anaeróbia da FORSU em CSTR operado a 35ºC, uma retenção hidráulica de 20 dias e cargas orgânicas de 1,0; 2,7 e 3,8 g SV L^{-1} d^{-1}. Os autores concluíram que, em relação à eficiência de conversão em biogás, a celulose foi o componente mais importante da FORSU.

Analisando o artigo mais citado (587 citações), intitulado "*Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste*", de Lay *et al.* (1999), é possível notar que a FORSU também tem potencial de ser utilizada para a geração biológica de hidrogênio. Já o segundo mais citado (542 citações), com o título "*Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste*", de Li *et al.* (2011), é um artigo de revisão que compara as digestões em estado sólido e líquido, bem como a necessidade de pré-tratamento, parâmetros operacionais e diferentes configurações de reatores para a biodigestão da FORSU.

Os autores com mais de 5 publicações sobre o assunto estão apresentados na Figura 2. Com 15 artigos publicados desde 2003, David Bolzonella, da Universidade de Verona, é o autor com o maior número de publicações sobre o assunto. Já Paolo Pavan (Universidade de Veneza) e Franco Cecchi (Universidade de Verona), segundo e terceiro que mais publicaram, pesquisam sobre biogás da FORSU desde 1992.

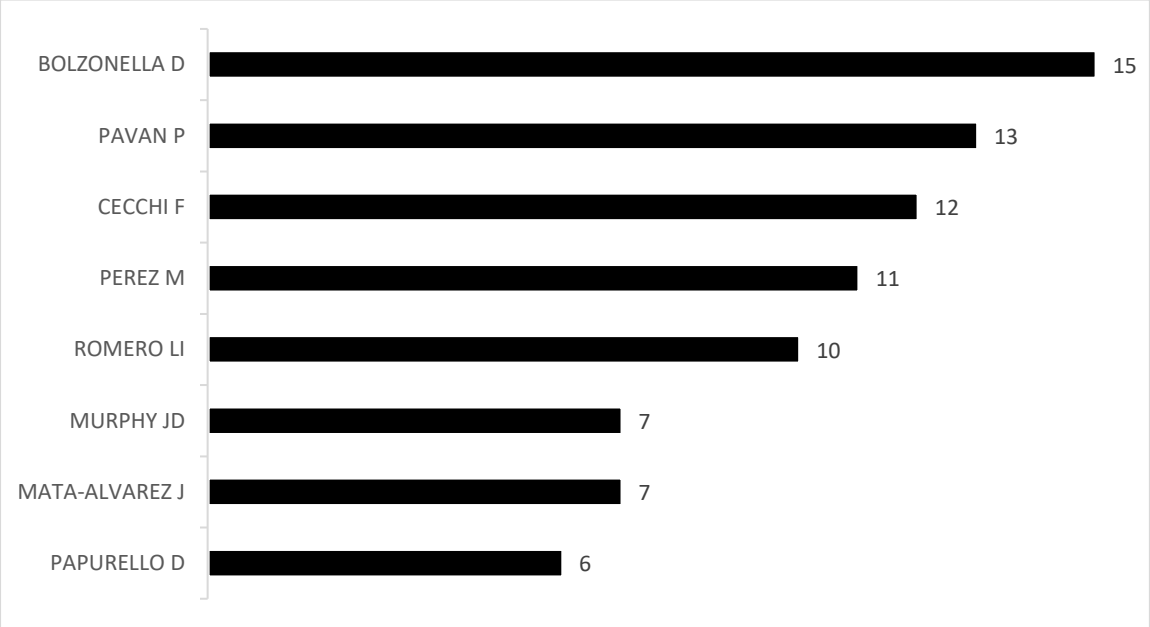

Figura 2 – Autores com mais de 5 publicações sobre o assunto (Autor).

Observa-se, ainda, que a maior parte das publicações (83 de 345 ou 24%) tem autores italianos. A Espanha aparece em segundo lugar, com 40 publicações (12%) e a Índia em terceiro, com 29 publicações (8%). A China é o quarto, com 22 publicações (6%) e a Polônia é o quinto, com 14 publicações (4%). O Brasil é o décimo neste ranking, com 9 publicações (ou 3%) de autores brasileiros.

Além da baixa porcentagem de publicações brasileiras sobre a produção de biogás a partir de FORSU, a Figura 3 ilustra que o Brasil necessita melhorar a internacionalização das suas pesquisas nesse campo, uma vez que não há redes de colaboração entre cientistas brasileiros e de outras nacionalidades. Nesse sentido, ressalta-se a importância de reforçar o desenvolvimento de pesquisas sobre esse tópico no país, devido às particularidades técnicas,

climáticas, sociais e políticas que podem influenciar a implantação de empreendimentos dessa natureza em território brasileiro.

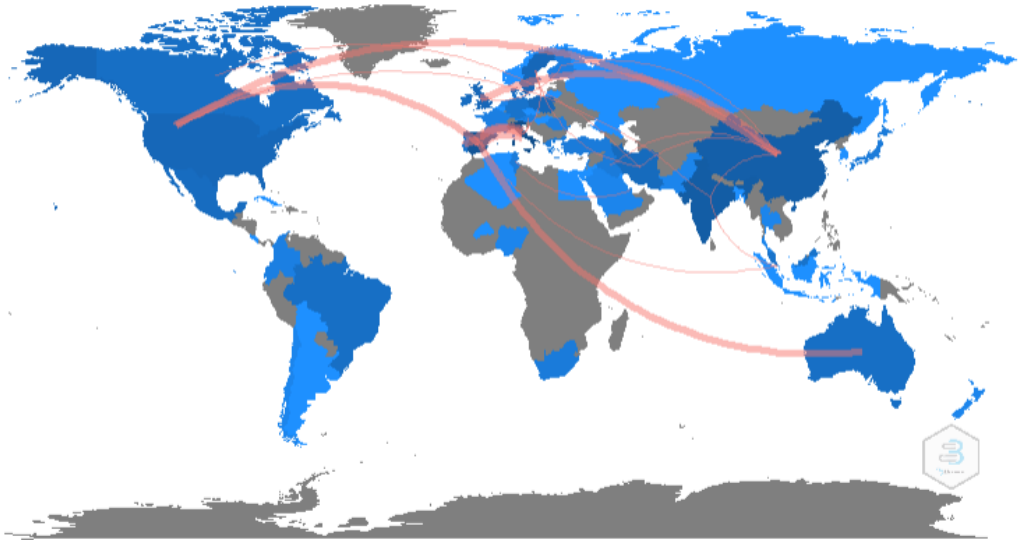

Figura 3 – Rede de colaboração das pesquisas de biogás utilizando FORSU (Autor).

2.2. Resíduos sólidos urbanos

De acordo com a PNRS, os RSU podem ser classificados quanto à origem como domiciliares, originários de atividades domésticas em residências urbanas, e de limpeza urbana, provenientes da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (BRASIL, 2010). A composição dos RSU depende de vários fatores como número de habitantes, poder aquisitivo, nível educacional, hábitos e costumes da população; condições climáticas e sazonais e mudanças na política econômica de um país (DRZ GESTÃO AMBIENTAL, 2013).

Estima-se que a geração de RSU no Brasil aumentará em 50% até 2050, enquanto o esperado para o crescimento populacional é de 12% (ABRELPE, 2020). A gestão integrada desses resíduos gerados nos municípios é de competência do poder público local e deve seguir a seguinte ordem de prioridade: “Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”

(BRASIL, 2010). As destinações ambientalmente adequadas são: “a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes”, enquanto a disposição ambientalmente adequada é a “distribuição ordenada de rejeitos em aterros” (BRASIL, 2010).

A gestão adequada dos RSU é um desafio em grande parte do Brasil. Apesar das regulamentações quanto às destinações ambientalmente adequadas, 17,9% dos RSU gerados no Brasil são encaminhados para lixões e 23,6% para aterros controlados (ABRELPE, 2020). Essas disposições inadequadas geram diversos impactos ambientais, como por exemplo a contaminação das águas, do ar e do solo e a proliferação de vetores causadores de doenças (GONÇALVES FERREIRA, 2017).

No ano de 2020 foram gerados 79,6 milhões de toneladas de RSU no Brasil (ABRELPE, 2020). A disposição direta dessa quantidade de RSU em aterros sanitários pode reduzir significativamente a vida útil dessas obras (PEREIRA; MAIA, 2012). É neste sentido que a PNRS incentiva iniciativas de destinação ambientalmente adequadas anteriores à disposição em aterro. Além disso, as características dos RSU nas cidades brasileiras apresentam grande potencialidade de transformação em novos produtos ou insumos antes de sua disposição final, principalmente pelo uso de técnicas como biodigestão (aeróbia ou anaeróbia) e reciclagem, uma vez que a composição gravimétrica dos RSU produzidos é constituída majoritariamente de matéria orgânica (45,3%) e de materiais recicláveis (32,2%; dos quais 2,3% são metais, 10,4% papéis, 16,8% plásticos e 2,7% vidros) (ABRELPE, 2020).

2.3. Legislação

2.3.1. RSU e consórcios

A legislação ambiental brasileira pode ser considerada robusta, uma vez que engloba princípios estabelecidos em acordos internacionais multilaterais e declarações sobre o meio ambiente. No entanto, mesmo sendo moderna e abrangente, apenas a legislação não é suficiente para a preservação ambiental, sendo necessária a aplicação prática do direito (SALEK, 2006).

Inicialmente, a preocupação com a problemática dos RSU era observada somente em legislações relacionadas à saúde pública. Um exemplo disso é a Lei Federal 2.312 de 1954, que diz que "a coleta, o transporte e o destino final do lixo deverão processar-se em condições que não tragam inconveniente à saúde e ao bem-estar público". Sete anos depois, esta regulamentação foi baixada por meio do decreto 49.974-A, sob denominação de Código Nacional de Saúde, e, posteriormente, foi contemplada pela Portaria do Ministério do Interior Nº 53, de 1979, que dispõe sobre os problemas oriundos da disposição inadequada dos resíduos sólidos (SALEK, 2006). Desde 1979, o item X da Portaria 053/79 proibia a disposição de RSU a céu aberto, mas na prática continuaram a existir diversos lixões, causando impactos ambientais e sociais no Brasil (SALEK, 2006).

Em 1981, foi instituída a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), através da Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. Embora seja considerada um dos maiores avanços da legislação ambiental brasileira, os resíduos só começaram a ser tratados de forma especial após a promulgação da Constituição Federal de 1988 (SILVA; MATOS; FISCILETTI, 2017). A partir daí, os municípios passaram a ser os detentores da titularidade dos serviços de limpeza urbana e, consequentemente, a gestão dos resíduos sólidos tornou- se sua responsabilidade. A Constituição Federal de 1988 também esclareceu que cabia à União instituir diretrizes para o desenvolvimento urbano, inclusive habitação, saneamento básico e transporte urbano (SALEK, 2006).

A Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB) foi instituída através da Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007, que estabelece as diretrizes para o saneamento básico. A PNSB define limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos como sendo, conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final do lixo doméstico e do lixo originário de varrição e limpeza de logradouros e vias públicas (SILVA; MATOS; FISCILETTI, 2017).

No dia 2 de agosto de 2010 foi instituída a Lei nº 12.305, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), sendo considerada um marco na área de resíduos sólidos no Brasil (RAUBER, 2011). Essa política dispõe sobre os princípios, objetivos, instrumentos, além de diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, aborda também

responsabilidades dos geradores e do poder público e os instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010). Um desses instrumentos da PNRS é o incentivo à adoção de consórcios ou de outras formas de cooperação entre os entes federados, sendo priorizados no acesso aos recursos da União os Municípios que optarem por soluções consorciadas intermunicipais para a gestão dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

Além da PNRS, a Lei nº 14.026/2020 ou marco do saneamento, visando universalizar o acesso aos serviços de saneamento e alcançar as metas da PNRS, também incentiva a regionalização da prestação desses serviços, de modo a contribuir para a viabilidade técnica e econômico-financeira e a criação de ganhos de escala e de eficiência (BRASIL, 2020b). O sistema de consórcios é regulamentado pela Lei nº 11.795, de 8 de outubro de 2008, enquanto a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005 trata da contratação de consórcios públicos para a realização de objetivos de interesse comum. Entre as vantagens da regionalização por meio de consórcio público estão o financiamento público; maior capacidade de financiamento; especialização administrativa e estrutura dedicada; compartilhamento de infraestrutura; ganho de escala. Já a principal desvantagem é a burocracia e entraves políticos (FUNDAÇÃO GORCEIX, 2020).

2.3.2. Biocombustíveis e energia elétrica

Como já foi citado, a PNRS incentiva iniciativas relacionadas ao tratamento e aproveitamento energético de resíduos. Dentre essas formas de tratamento destaca-se a digestão anaeróbia, que está sendo cada vez mais utilizada, porque possibilita o aproveitamento energético do biogás (REIS, 2012). Aliado a isso, a seguir são apresentadas, em ordem cronológica, as principais normas referentes aos biocombustíveis e a geração de energia elétrica no âmbito federal nos últimos dez anos.

- Lei nº 12.490, 16 de setembro de 2011 – dispõem sobre a política e a fiscalização das atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis.
- Resolução normativa ANEEL nº 482, 17 de abril de 2012 - Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

- Resolução ANP nº 8, 30 de janeiro de 2015 - Estabelece a especificação do biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015, parte integrante desta Resolução.
- Portaria MME nº 44, 10 de março de 2015 – Define as diretrizes para os agentes de distribuição de energia elétrica realizarem chamada pública para incentivo à geração própria de unidades consumidoras.
- Resolução ANEEL nº687, 24 de novembro de 2015 - Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.
- Portaria MME nº538, 15 de dezembro de 2015 – Cria o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica – ProGD.
- Resolução ANP nº 685, 29 de junho de 2017 - Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional.
- Lei nº 13.576, 26 de dezembro de 2017 - Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências.
- Resolução ANP nº 758/2018 - Regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis de que trata o art. 18 da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e o credenciamento de firmas inspetoras.
- Resolução ANP nº 791/2019 - Dispõe sobre a individualização das metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis, no âmbito da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio).
- Decreto nº 9.888/2019 - Dispõe sobre a definição das metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis de que trata a Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e institui o Comitê da Política Nacional de Biocombustíveis - Comitê RenovaBio.
- Resolução ANP nº 802/2019 - Estabelece os procedimentos para geração de lastro necessário para emissão primária de Créditos de Descarbonização, de que trata o art. 14 da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e altera a Resolução ANP nº 758, de 23 de novembro de 2018.

- Portaria MME nº 419/2019 - Estabelece normas referentes à escrituração, registro, negociação e aposentadoria de Créditos de Descarbonização.
- Portaria MME nº 122/2020 - Altera itens da Portaria MME nº 419/2020.
- Resolução CNPE nº 8/2020 - Define as metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis.
- Resolução ANP nº 829/2020 - Altera o Anexo II da Resolução ANP nº 802, de 5 de dezembro de 2019.
- Resolução ANP nº 843, de 21 de maio de 2021 - Altera a Resolução ANP nº 791/2019, para incluir hipótese de redução das metas prevista no art. 3º da Resolução CNPE nº 8/2020.

2.4. Pré-tratamento dos RSU

O resíduo sólido urbano precisa passar por processos de pré-tratamento antes de serem enviados aos biodigestores. A coleta seletiva consiste na coleta dos resíduos previamente separados pelos próprios moradores. Na ausência de uma coleta seletiva eficiente é necessária a instalação de uma etapa de triagem e separação adequada dos resíduos, o que pode onerar o negócio, inviabilizando alguns projetos de menor porte (ABIOGÁS, 2020). Essa separação correta, além de ser importante para o aproveitamento do material orgânico, também é fundamental para a implementação da logística reversa e da reciclagem, que são instrumentos da PNRS para incentivar o retorno do resíduo para um novo ciclo de aproveitamento (ABRELPE, 2020).

De 2010 a 2019, houve um aumento de 3152 para 4070 municípios com coleta seletiva no Brasil. No entanto, como em Ouro Preto, a coleta seletiva em muitos desses municípios não abrange a totalidade da área urbana do município (ABRELPE, 2020). Embora tenha se consolidado, grande parte da coleta seletiva no Brasil ainda é feita de maneira informal, muitas vezes por indivíduos em situação de risco social. Aliado a isso, procedimentos inadequados de triagem geram perdas econômicas que chegam próximo a R$ 8 bilhões, o que equivale a quase 70% do que a reciclagem movimenta no país (CARVALHO *et al.*, 2019). De acordo com Carvalho *et al*. (2019), quanto melhor a infraestrutura existente de coleta, triagem e transporte de resíduos, mais numerosas serão as escolhas disponíveis aos gestores do resíduo urbano e mais fácil será aproveitar o biogás. Ainda segundo o mesmo autor, diversos países europeus

adotaram políticas para evitar o descarte de material biodegradável em aterros sanitários. Um exemplo de sucesso é a Alemanha, que não destina material biodegradável para os aterros. No cenário brasileiro, o autor cita que deve ser observada uma tendência positiva no Sul e no Sudeste do Brasil quanto à separação dos resíduos úmidos (orgânicos) e secos diretamente na fonte (residências, instalações comerciais, CEASAs, feiras, etc.).

Um dos desafios para a implantação da coleta seletiva é o baixo engajamento da população. Pelo princípio da responsabilidade compartilhada, destacado na PNRS, a população é parte fundamental na implementação de boas práticas de gestão dos RSU. Além da redução na geração e da correta separação na fonte, os cidadãos brasileiros são importantes por pressionarem governos a oferecerem soluções adequadas, bem como os meios para financiá-las (CARVALHO *et al.*, 2019). De acordo com Santana (2013), em um estudo realizado em Ouro Preto, Mariana e Itabirito, o baixo envolvimento da população desses municípios com o gerenciamento dos RSU pode estar ligado ao baixo grau de satisfação e credibilidade dos moradores em relação à gestão de RSU ou motivos individuais específicos. O autor sugere que a participação poderia ser incentivada pela educação ambiental em torno dos fatores que motivam ou desestimulam o comportamento para reciclagem, bem como com a divulgação de informações conforme demanda verificada nos municípios e, talvez, aplicação de multas para aqueles que não participarem.

Além da coleta seletiva, no pré-tratamento pode ser necessário retirar partículas grandes ou inertes, triturar, ajustar pH, aquecer e misturar os resíduos antes da digestão anaeróbia (DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH, 2019). A separação de partículas evita a entrada de materiais inertes no biodigestor e a obstrução e acúmulo no sistema. Essa separação facilita a degradação e estabilização da matéria orgânica nos processos posteriores, favorecendo a produção de biogás. A trituração e a agitação visam aumentar a área de contato e homogeneizar os resíduos, de forma a obter um material uniforme e mais facilmente acessado e digerido pelos microrganismos (CIBIOGÁS, 2020). O ajuste de pH e da temperatura tem como objetivo fornecer as melhores condições para o desenvolvimento dos microrganismos anaeróbios, permitindo uma maior eficiência na produção do biogás a partir da digestão anaeróbia.

2.5. Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico em que ocorre a conversão de matéria orgânica na ausência de oxigênio, tendo o biogás como um dos produtos. A geração de biogás pode ser dividida em quatro fases sequenciais (Figura 4). Na hidrólise, materiais complexos são convertidos em compostos mais simples de menor massa molecular por meio de bactérias fermentativas e água. Proteínas são convertidas em aminoácidos, lipídios solúveis em ácidos graxos e carboidratos em açúcares simples (GOMES, 2010).

Após a hidrólise ocorre a acidogênese, na qual os compostos solúveis gerados são assimilados pelas bactérias e metabolizados, gerando principalmente ácidos graxos voláteis e, em menor proporção, álcoois, ácido lático, gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio e novas células bacterianas (CARVALHO *et al*., 2019).

Na acetogênese, os compostos gerados na acidogênese são oxidados e transformados em hidrogênio, dióxido de carbono e acetato, formando um substrato adequado para o desenvolvimento das bactérias metanogênicas. Por fim, na metanogênese, as bactérias acetoclásticas, que metabolizam ácido acético e outros compostos, e as bactérias hidrogenotróficas, que utilizam hidrogênio e dióxido de carbono, convertem os compostos gerados na acetogênese em biogás (GOMES, 2010).

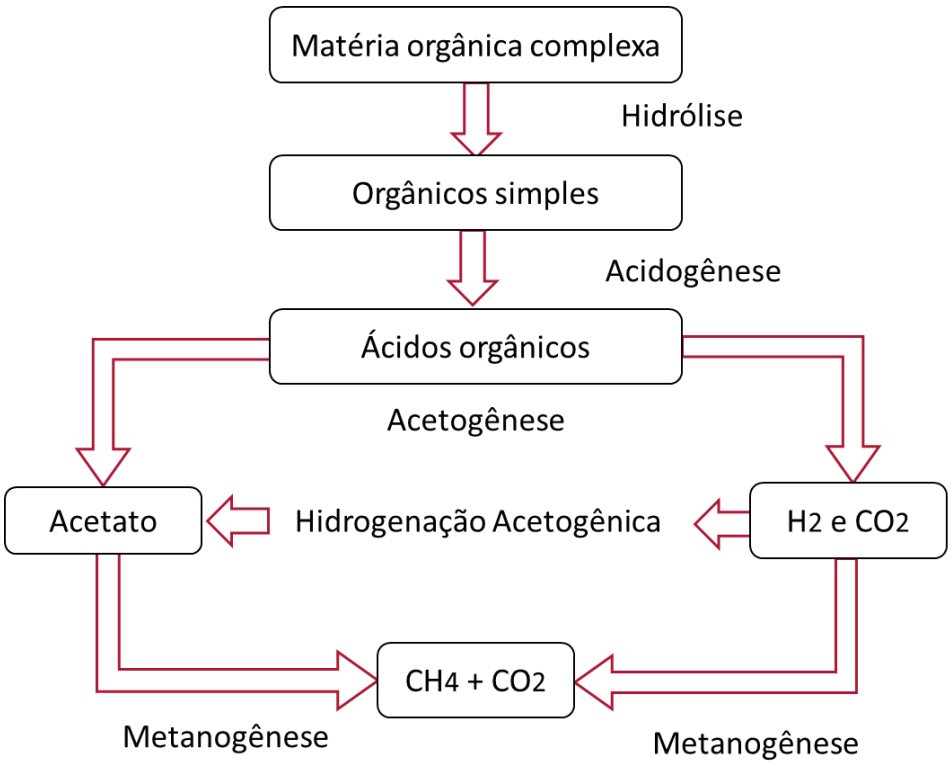

Figura 4 – Ilustração das etapas da digestão anaeróbia (Adaptado de AMARAL, 2017).

O uso da digestão anaeróbia para o tratamento do RSU é relativamente recente, sendo que seu estudo e disseminação foi retomado com mais intensidade nos últimos 20 anos (CARVALHO *et al*., 2019). Entre as principais vantagens da utilização da digestão anaeróbia está a produção do biogás, o qual é uma fonte de energia renovável, podendo ser utilizado na geração de energia elétrica, térmica ou como combustível para veículos (CIBIOGÁS, 2020).

A utilização da digestão anaeróbia da FORSU está alinhada com os objetivos do desenvolvimento sustentável e com a economia circular, já que gera o biogás, que, se processado, agrega valor econômico aos resíduos orgânicos e mitiga impactos ambientais. São exemplos das vantagens da utilização da digestão anaeróbia da FORSU e do aproveitamento do biogás: 1) A redução da disposição em aterros e lixões; 2) A redução da necessidade da mineração ao produzir biofertilizantes; 3) A redução das emissões de gases de efeito estufa e 4) A diversificação da matriz energética brasileira com uma fonte renovável (BRASIL, 2020a).

2.6. Tecnologias de digestão anaeróbia e aspectos operacionais

Aterros sanitários e biodigestores produzem biogás por meio da decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos. Uma das principais vantagens do biodigestor é o controle do processo e otimização do tempo de degradação. Biodigestores de RSU, apesar de ainda apresentarem algumas dificuldades operacionais, necessitarem de maior investimentos e mão de obra qualificada, são processos mais eficientes, controlados e conseguem garantir um fluxo maior e mais estável de biogás em comparação com aterros sanitários (CARVALHO *et al.*, 2019). Nesses digestores é possível, por exemplo, gerar em 18 dias o equivalente à metade do que seria gerado, por uma mesma quantidade de resíduo, em um aterro sanitário ao longo de 80 anos (EPE, 2014). Além disso, quando se origina de aterros sanitários, o biogás contém uma proporção de metano de em média 50%, enquanto ao ser gerado em reatores anaeróbios pode chegar a 65% (CENBIO, 2001).

Diante do exposto, mesmo com algumas limitações a serem superadas, os biodigestores constituem o futuro do tratamento do resíduo orgânico brasileiro (CARVALHO *et al*., 2019). No país, há uma variedade de opções de biodigestores no mercado, sendo distinguidos por: 1) teor de sólidos; 2) tempo de detenção hidráulica; 3) temperatura dos processos; e 4) quantidade de estágios de processamento (CARVALHO *et al*., 2019).

A biodigestão de RSU por via úmida requer adição grande quantidade de água ou efluente, atingindo um teor de sólidos totais de até 15 %, embora a maioria das plantas opere com teores entre 3 % e 7 % (GOMES, 2010). Essa maior umidade é uma vantagem para a digestão de resíduos com alto teor de plásticos, que flutuam e são removidos antes da digestão. Como desvantagem da digestão úmida, há uma maior perda de sólidos voláteis, reduzindo a quantidade de biogás produzido. Além disso, a via úmida também requer uma maior quantidade de energia elétrica para operar, consumindo cerca de 50 % do total gerado após a queima do biogás (KELLEHER, 2007).

Por outro lado, a digestão anaeróbia seca opera com teores de sólidos totais superiores a 15 % e, portanto, requer uma menor quantidade de água, minimizando também a geração de efluentes líquidos (GOMES, 2010; GOMES; AQUINO; COLTURATO, 2012). Esse processo consome menos energia elétrica, cerca de 20 a 30 % do total gerado após queima do biogás,

mas necessita de equipamentos mais potentes, além de uma etapa de acondicionamento do resíduo para inoculação e homogeneização (CARVALHO *et al.*, 2019).

O tempo de detenção hidráulica é inversamente proporcional à taxa de degradação da matéria orgânica, que, por sua vez, depende de vários fatores como o teor de sólidos, temperatura, inóculo e tipo de biodigestor. Sendo assim, digestores que operam com uma menor taxa de degradação necessitam de mais tempo e, consequentemente, de maiores volumes para a degradação do resíduo. A temperatura também influencia nas propriedades físico-químicas do substrato, bem como na velocidade de crescimento e metabolismo dos microrganismos, e com isso a dinâmica populacional em um biodigestor (CIBIOGÁS, 2020). Os biodigestores mesofílicos operam entre 20ºC e 40ºC, com uma temperatura ótima entre 30ºC e 35ºC. Já os termofílicos operam entre 50ºC e 60ºC, gerando mais biogás, reduzindo o tempo de detenção dos resíduos e necessidade de espaço, mas ao mesmo tempo é uma tecnologia mais complexa e com maiores gastos de energia (CARVALHO *et al*., 2019).

Os biodigestores também podem ser operados em dois estágios, uma vez que as etapas de acidogênese e metanogênese necessitam de condições de operação distintas. A Tabela 1 apresenta os requisitos ambientais dos microrganismos mesofílicos nas fases de hidrólise/acidogênese e metanogênese.

Parâmetros	Hidrólise/Acidogênese	Metanogênese
Temperatura (ºC)	25 - 35	32 - 42
pH	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
Relação C:N	10 - 45	20 - 30
Concentração de matéria seca (%)	< 40	< 30
Potencial Redox (mV)	+400 até -300	< -200
Relação C:N:P:S necessária	500:15:5:3	600:15:5:3
Elementos traços	-	Essencial: Ni, Co, Mo, Se

Tabela 1 – Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos (EMBRAPA; SBERA, 2019; WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013).

O ponto principal de um sistema de tratamento anaeróbio é o tipo de biodigestor utilizado. Por isso, é importante adaptar os projetos de acordo com o tipo de substrato a ser tratado, o nível de investimento e as condições ambientais (EMBRAPA; SBERA, 2019). Dessa

forma, a seguir são apresentados dois biodigestores utilizados em grande escala para resíduos com alto teor de sólidos.

2.6.1. Lagoa anaeróbia

O biodigestor de lagoa anaeróbia ou lagoa coberta é formado por um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com material geossintético para acúmulo do biogás. A geometria da lagoa é de base retangular e seção trapezoidal. A inclinação do talude depende das características do solo (Figura 5) (EMBRAPA; SBERA, 2019).

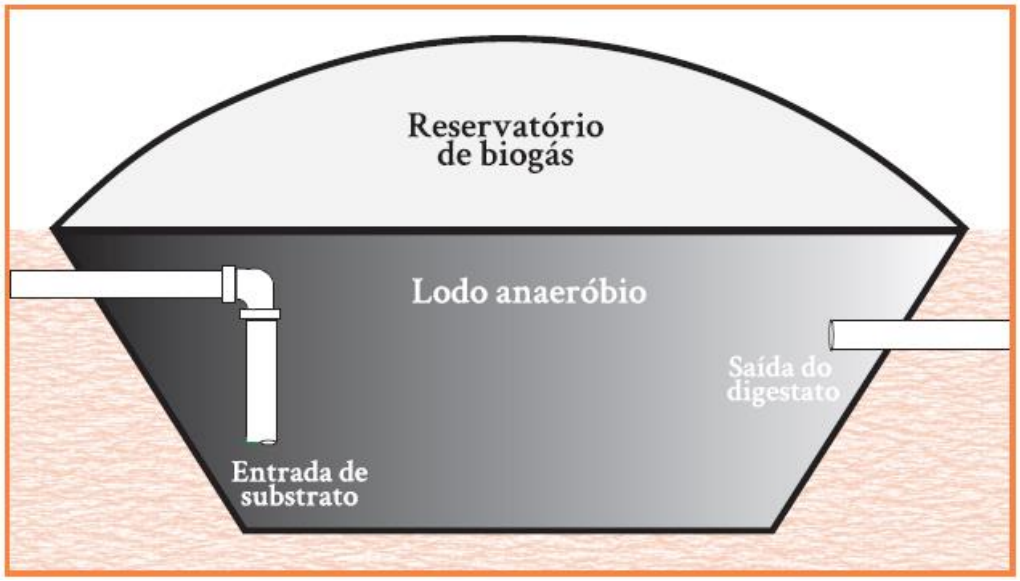

Figura 5 – Biodigestor de lagoa anaeróbia (EMBRAPA; SBERA, 2019).

Os biodigestores de lagoa coberta são mantidos a temperatura ambiente e são parcialmente misturados. Aliado a isso, esses reatores podem ser considerados de baixa taxa de degradação, o que aumenta o tempo de retenção, que é de no mínimo 30 dias, e a área das lagoas. A altura pode variar entre 2,4 e 6 metros, sendo recomendadas alturas maiores do que 5 metros. Maiores alturas permitem uma redução da área das lagoas e auxilia na manutenção da temperatura durante a digestão (EMBRAPA; SBERA, 2019).

A carga orgânica típica é entre 0,04 e 0,3 $kg_{DQO}/m^3.d$, dependendo da temperatura do substrato. O tempo de detenção hidráulica geralmente encontra-se entre 40 e 60 dias, também dependendo da temperatura do resíduo. Frequentemente, a área das lagoas varia de 2000 até

8000 m². Além dos parâmetros mencionados, a operação das lagoas depende do pH e da temperatura. A melhor temperatura do substrato é entre 25 e 35ºC e o pH ótimo fica entre 6,6 e 7,6 (DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH, 2019).

Vantagens	Desvantagens
Baixo investimento; Operação simples e de baixo custo; Baixo custo operacional para estabilização razoável de resíduos orgânicos complexos; Não necessita de energia para aquecimento e mistura;	Produção de biogás variável e muitas vezes em baixas vazões; Requer grandes áreas superficiais; Operação fortemente impactada pelas condições ambientais do meio; Remoção de sedimentos pode ser difícil.

Tabela 2 –Vantagens e desvantagens da Lagoa Anaeróbia (Adaptado de DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH, 2019).

O cálculo do volume nominal (V_n) da lagoa, demonstrado pela Equação 1, é realizado com base na vazão do afluente (Q), da concentração do afluente (S_0) e da carga orgânica volumétrica (COV) (EMBRAPA; SBERA, 2019).

$$V_n = \frac{(Q x S_0)}{COV} \quad (1)$$

Já o tempo de detenção hidráulica (TDH) pode ser calculado pela Equação 2 (EMBRAPA; SBERA, 2019).

$$TDH = \frac{V_t}{Q} \quad (2)$$

Algumas propriedades devem ser respeitadas no dimensionamento dessas lagoas, como: relação comprimento x largura de no mínimo 2x1, inclinação do talude de 45º, variando em função do solo (EMBRAPA; SBERA, 2019) e profundidade de 2,4 a 6 metros (DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH, 2019).

2.6.2. CSTR

O CSTR apresenta um alto nível tecnológico, com sistema de aquecimento, isolamento, agitador, controladores de temperatura e um sistema de controle de outros parâmetros físicos, químicos e biológicos (Figura 6).

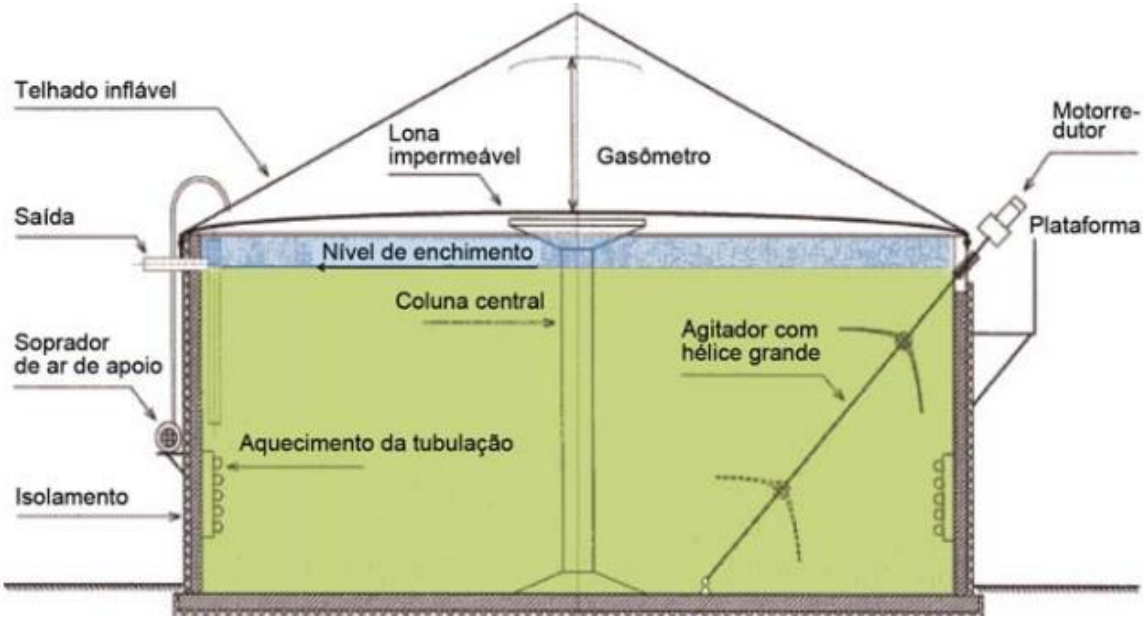

Figura 6 – Biodigestor CSTR (BMELV, 2010).

Os biodigestores CSTR suportam elevadas cargas orgânicas volumétricas e apresentam maior capacidade de produção de biogás, já que o controle de temperatura e o sistema de agitação colaboram com a estabilização do reator e a manutenção dos microrganismos (EMBRAPA; SBERA, 2019). O CSTR opera com uma quantidade de sólidos totais abaixo de 15%, uma carga orgânica de 1 a 6 kgsv/m³.d e um tempo de retenção entre 15 e 30 dias. Estes reatores podem ser mesofílicos ou termofílicos, ou seja, a temperatura de operação normalmente varia entre 30 e 60 ºC, dependendo do tipo de substrato a ser tratado. O aquecimento do CSTR pode ser realizado utilizando o calor gerado pela tecnologia *Combined Heat & Power Systems* (CHP) ou por caldeiras, especialmente no início da operação. Por fim, há três maneiras de realizar a mistura nesses reatores: ar comprimido, agitação mecânica ou sistema de mistura hidráulica. O volume do reator e o tempo de detenção hidráulica podem ser calculados de acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente, ambas descrita no item 2.6.1 deste trabalho.

Vantagens	Desvantagens
Alta eficiência de digestão anaeróbia e produção de biogás; Operação contínua ou em batelada; Bom controle de temperatura e outros parâmetros de processo; Boa homogeneização; Performance previsível e modelável; Adequado para várias matérias primas.	Maiores investimentos e custos operacionais que a lagoa anaeróbia; Alta tensão de cisalhamento no caso de agitadores mecânicos; Requer mão de obra especializada para dimensionamento, construção e operação; Consome energia para aquecimento e mistura no reator.

Tabela 3 –Vantagens e desvantagens do CSTR (Adaptado de *DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH*, 2019).

Independentemente do tipo de reator utilizado, a purificação do biogás é uma etapa recomendada para um melhor aproveitamento energético, uma vez que a pureza e a concentração de metano são os principais fatores a serem considerados em termos de potencial calorífico do biocombustível.

2.7. Tratamentos complementares

2.7.1. Tratamento do biogás

O biogás, tanto proveniente de aterros sanitários quanto de biodigestores, é composto principalmente por dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) (SANTOS; LIMA, 2016). O teor de metano no biogás está diretamente relacionado com o poder calorífico da mistura gasosa, indicando também a pureza do biogás (CASSINI, 2003; SUZUKI *et al*., 2011). Ao ser comparado ao gás natural, o qual possui de 85% a 90% de metano em sua composição, verifica-se que o biogás, com até 75% de metano, apresenta menor valor de poder calorífero inferior (CENBIO, 2001). Também são encontrados em menores proporções o oxigênio, nitrogênio e água, além de vestígios de outros gases, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), compostos orgânicos voláteis (COVs) e siloxanos, todos esses com potencial de gerar impactos negativos no poder calorífico do gás, na operação de equipamentos e na saúde dos trabalhadores (CARVALHO et al., 2019). Na Tabela 4 são apresentadas as composições típicas do biogás de aterro e biogás de biodigestores.

Parâmetros	Unidades	Biogás de aterro	Biogás de biodigestor
CH_4	% mol	35 – 60	60 – 70
H_2	% mol	0 – 3	0
CO_2	% mol	15 – 40	30 – 40
H_2O	% mol	1 – 5	1 – 5
N_2	% mol	15	0,2
O_2	% mol	1	0
H_2S	PPM	0 – 100	0 – 1000
NH_3	PPM	5	0 – 100

Tabela 4 – Composição do biogás de aterro e biodigestores (Adaptado de SUN *et al.*, 2015).

A presença do CO_2 interfere no potencial energético do biogás por ser inerte em termos de combustão e ocupar volume. A água, quando não é removida, pode acumular nos dutos via processos de condensação, resultando em problemas de corrosão e entupimento em caso de congelamento (EMBRAPA; SBERA, 2019). Os COVs, em longos períodos de exposição, podem afetar a saúde dos operários. Já o H_2S é corrosivo, podendo danificar o equipamento, enquanto os siloxanos, quando levados à combustão, geram depósitos de sílica nas partes internas do motor, como válvulas, cilindros e cabeças do pistão (SEVIMOĜLU; TANSEL, 2013).

Segundo a resolução ANP nº 685/2017, o tratamento e a purificação do biogás resultam no biometano, o qual deve atender diversos critérios para poder ser destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, comerciais e industriais. As etapas desse tratamento têm como objetivos: ajuste do poder calorífico; remoção de contaminantes que impactam na qualidade do biogás e na vida útil de equipamentos; purificação do biogás e a concentração do biometano para a inserção em linhas de transmissão e transporte de biogás (EMBRAPA; SBERA, 2019) (Figura 7).

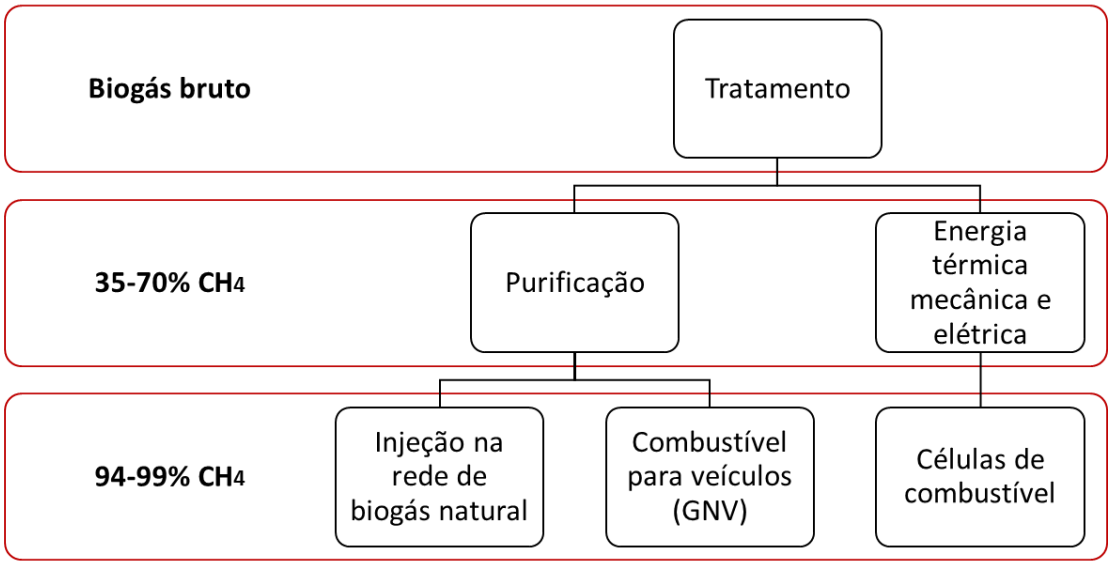

Figura 7 – Tratamento, purificação e uso do biogás (Adaptado de EMBRAPA; SBERA, 2019).

Dentre os métodos mais utilizados para a remoção da água estão a adsorção, absorção, refrigeração e condensação. Os processos mais comuns de dessulfurização incluem a dosagem de oxigênio ou a adição de ferro durante a digestão anaeróbia e a adsorção, absorção, remoção por membranas ou por processos biológicos após a biodigestão. O dióxido de carbono pode ser removido durante ou após processos de dessulfurização, com a utilização da lavagem do gás com água ou reagentes químicos. Também podem ser utilizadas as membranas seletivas para a remoção de CO_2 e outros contaminantes como o NH_3 e o H_2S (EMBRAPA; SBERA, 2019).

A decisão pela tecnologia de tratamento depende da vazão, composição e nível de purificação pretendido do biogás. Sistemas mais complexos apresentam maiores custos de implantação e operação, mas permitem alcançar altos níveis de purificação. Entretanto, o tratamento complexo e o alto grau de purificação nem sempre são necessários. A escolha da técnica mais apropriada a ser utilizada deve considerar os níveis máximos de contaminantes permitidos na composição do biometano, além de fatores como: os custos de implantação e manutenção, o grau de complexidade do sistema e a disponibilidade de peças e/ou assistência técnica (EMBRAPA; SBERA, 2019).

2.7.2. Tratamento do digestato

Quando a digestão anaeróbia ocorre em biodigestores, há um processo de reciclagem e recuperação dos compostos, que produz, além do biogás, uma parte líquida digerida com propriedades fertilizantes, conhecida como digestato. O digestato é o efluente do digestor e, comumente, é pobre em matéria orgânica biodegradável, mas, por outro lado, é um efluente com alto teor de nitrogênio e fósforo (EMBRAPA; SBERA, 2019). Pelo alto potencial de impacto ambiental desses elementos, o digestato precisa atender padrões de concentração de nitrogênio e fósforo estabelecidos na Resolução CONAMA nº430/2011 para ser descartado ao final do tratamento (CIBIOGÁS, 2020).

Os processos mais comuns para a remoção de nitrogênio do digestato são: a nitrificação-desnitrificação, conhecido como processo convencional; nitrificação parcial; Anammox, que consiste na oxidação anaeróbia do íon amônio; e processos combinados de desamonificação, que visam combinar os dois últimos processos em um único reator (EMBRAPA; SBERA, 2019). Já em relação aos processos para remoção de fósforo, observa-se que grande parte das tecnologias são baseadas na conversão em fração sólida. As tecnologias mais comuns são a cristalização do fósforo em cal ou estruvita e o tratamento biológico avançado (EMBRAPA; SBERA, 2019).

O digestato, após ser higienizado, também pode ser aplicado no solo, possibilitando o aproveitamento da fração rica em nitrogênio, fósforo e potássio. Bachmann et al. (2016), compararam a utilização do digestato e fertilizante comercial em relação a absorção de fósforo e notaram que houve uma maior absorção de fósforo pelas plantas quando o digestato foi utilizado. A desvantagem da utilização do digestato líquido seria o custo do transporte desses efluentes até o seu uso (EMBRAPA; SBERA, 2019). Aliado a isso, a conversão do fósforo e nitrogênio em uma forma sólida, por meio de processos de sedimentação ou desidratação, reduz o volume a ser transportado (DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH, 2019). Após essa separação física, a parte líquida é destinada para lagoas de tratamento/estabilização, podendo ser re-inserida no processo, como por exemplo, para ajuste do teor de sólidos do substrato a ser digerido (CIBIOGÁS, 2020).

O biofertilizante é caracterizado por não possuir odores desagradáveis, ser isento de micro-organismos patogênicos, favorecer a multiplicação de bactérias que fixam o nitrogênio e apresentar uma faixa de pH de 7,0 a 8,5, corrigindo a acidez do solo e contribuindo para o aumento da produtividade das culturas (SGANZERLA, 1983). A aplicação desse biofertilizante no solo visa suprir a demanda de nutrientes das culturas agrícolas (CIBIOGÁS, 2020).

2.8. Geração, comercialização e incentivos da energia elétrica

O poder calorífico do biogás é utilizado para determinar o potencial energético teórico contido no gás e depende da composição química, dos compostos voláteis, da umidade e cinzas presentes no biocombustível. A transformação do biogás em energia é realizada por meio da conversão da energia química das moléculas em energia mecânica, em uma combustão controlada (COELHO *et al.*, 2006). Durante a combustão há a geração de gases quentes, possibilitando o aproveitamento do calor dos gases de exaustão para aquecimento do ar de combustão (SANTOS; LIMA, 2016). A cogeração (CHP) é a geração simultânea de eletricidade e calor. Além da tecnologia de CHP baseada em motores (Figura 8), são exemplos de outras tecnologias para aproveitamento do biogás: as microturbinas a gás, as células de combustível e o uso do gás para suprir a demanda local de combustível (BMELV, 2010).

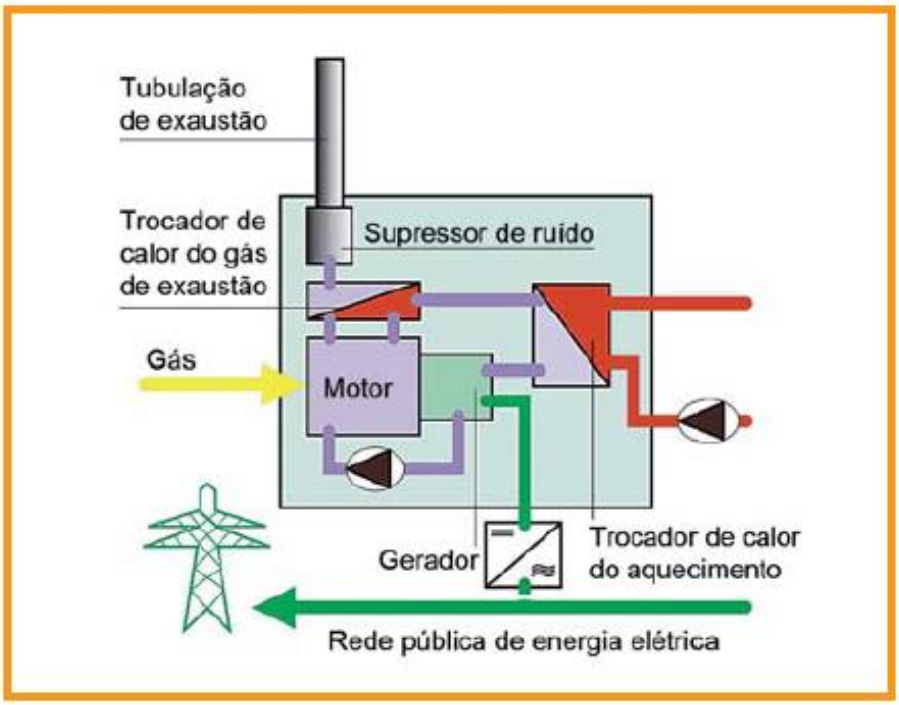

Figura 8 – Estrutura esquemática da cogeração (ASUE, 2001).

De acordo com a Resolução normativa ANEEL nº 482, 17 de abril de 2012, a energia gerada com a utilização do biogás por microgeração ou minigeração distribuída pode ser cedida gratuitamente à distribuidora local, atribuindo ao gerador um crédito no montante da energia injetada no sistema elétrico.

Além da compensação da energia elétrica, os incentivos de políticas públicas e os incentivos econômicos são de extrema importância para o aproveitamento do biogás da FORSU. Em Minas Gerais, por exemplo, a Lei nº 20.824 de 1º de agosto de 2013 concede por 10 anos uma isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) na utilização de fontes renováveis de energia, incluindo o biogás gerado utilizando resíduos urbanos. Outras iniciativas fomentam projetos de aproveitamento do biogás proveniente de RSU por meio da redução de tarifas de uso dos sistemas elétricos de distribuição e de transmissão. Além disso, o Regime Especial de Incentivos para Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI) contempla, entre outros setores, a energia e o saneamento básico. Esse regime estabelece incentivos fiscais, suspendendo o PIS/Pasep (Programa de Integração Social e de Formação da Seguridade Social) e Cofins (Contribuição para Financiamento da

Seguridade Social) na aquisição de bens, serviços e locações incorporadas em novas obras de infraestrutura (CARVALHO *et al*., 2019).

Ressalta-se ainda a importância da Lei nº13.576, de 26 de dezembro de 2017, que trata da Política Nacional de Biocombustíveis - RenovaBio, no incentivo à projetos sustentáveis, circulares e que promovam a descarbonização, como por exemplo o uso da FORSU para geração de biogás. Entre os objetivos do Renovabio estão: o atendimento aos compromissos do Brasil no âmbito do Acordo de Paris, valorização da biomassa e aumento da participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional. Para alcançar esses objetivos foram criados instrumentos, entre os quais se destacam: o estabelecimento de metas de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa, os créditos de descarbonização (CBIO), a certificação de biocombustíveis e os incentivos fiscais, financeiros e creditícios.

Em destaque neste estudo, a comercialização de CBIOs pode ser um instrumento de extrema importância para viabilizar projetos de utilização de biogás da FORSU. Um CBIO equivale a uma tonelada de CO_2 e a emissão dos CBIOs é feita pelos produtores de biocombustível, após serem habilitados e certificados pela Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), sendo disponibilizados conforme a eficiência energética da geração do biocombustível. Cabe ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) a definição da meta que as distribuidoras devem atingir com a compra desses créditos. Dessa forma, essas são “obrigadas” a comprar CBIOs, os quais são comercializados na bolsa de valores do Brasil (B3) (SILVA, 2021). Para o ano de 2021, o CNPE estabeleceu a meta de redução de emissões equivalente a 24,86 milhões de CBIOs.

Por fim, como forma de aumentar a escala e facilitar a implementação dos projetos de aproveitamento do biogás de RSU, as políticas públicas também incentivam a criação de consórcios municipais, dando a estes a prioridade no acesso aos recursos da união (BRASIL, 2010). Além disso, essa implementação também pode ser facilitada com financiamentos, como por exemplo: por meio da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep); do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES); do CT-Energia; do Financiamento à Infraestrutura e ao Saneamento (Finisa) da Caixa Econômica Federal; do Fundo Nacional de Meio Ambiente (FNMA); do Banco Internacional de Desenvolvimento; do Banco do Brasil;

do Global Environment Facility (GEF) e do Sustainable Energy Finance Initiative (SEFI) (CARVALHO *et al.*, 2019).

2.9. Biogás no mundo

As fontes renováveis de energia se inserem como uma solução importante para as preocupações ambientais e a segurança energética, já que auxiliam na diversificação na matriz energética, garantem o fornecimento energético sustentável a longo prazo, mitigam as emissões atmosféricas e geram novos empregos (GOLDEMBERG; COELHO, 2004). A matriz energética mundial ainda depende de fontes fósseis, principalmente petróleo (31%) e carvão (27%). As fontes renováveis representam 14% da produção total de energia, sendo que a biomassa é responsável por 67% desse total (WBA, 2020).

Observa-se que 92% de toda a bioenergia é usada para gerar calor, sendo 5% usados em transportes e 3% para gerar eletricidade. Além disso, quanto à biomassa, nota-se que há uma predominância florestal, responsável por 88% do total de energia, seguida pela biomassa da agricultura, representando 9% do total. Os RSU orgânicos contribuem com apenas 3% (WBA, 2016).

O aproveitamento do biogás é mais difundido na Ásia e na Europa, correspondendo a 73% de toda a produção de bioenergia no mundo, variando de país a país, de acordo com as práticas econômicas, direcionamento das políticas de apoio a este mercado e estrutura da indústria. Enquanto na Alemanha, que domina o mercado de biogás, o foco é voltado para plantas de biodigestão, no Reino Unido há mais iniciativas de coleta e tratamento do biogás proveniente dos aterros sanitários (CARVALHO *et al.*, 2019; WBA, 2020). Comparado a Alemanha, o mercado chinês é menos estruturado. Apesar da grande quantidade de projetos e incentivos governamentais, nota-se que as empresas são de menor porte e voltadas principalmente ao mercado interno. Aliado a isso, essas empresas possuem pequenas margens de lucro e necessitam de grandes investimentos (CARVALHO *et al*., 2019; WALLACE; WU; WANG, 2004).

No Brasil existem 675 plantas de produção de biogás, as quais geraram, em 2020, 1,83 bilhão de Nm^3 de biogás. O estado de Minas Gerais aparece em destaque com 225 plantas (35%

do total do país). Os substratos utilizados são provenientes dos aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto e da agropecuária. Do volume gerado, 73% são utilizados para a geração de energia elétrica, 8% para energia térmica, 19% como GNV/biometano e 0,4% como energia mecânica. Observa-se que o setor de biogás vem crescendo no Brasil, apresentando uma tendência de alta exponencial na quantidade de plantas. Apenas em 2020, o número de plantas de produção de biogás apresentou um crescimento de 22% em relação à 2019 (CIBIOGÁS, 2021). Tendo em vista o crescimento citado e as oportunidades oferecidas pelo setor de biogás no Brasil, os estudos de viabilidade técnico-econômica e ambiental são de suma importância para a tomada de decisão sobre a implantação de projetos nessa esfera (RIBEIRO, 2020).

2.10. Viabilidade de projetos

Na análise da viabilidade econômica, faz-se necessária a consideração de todos os detalhes do projeto, mesmo se os recursos forem de terceiros (GUIDUCCI; FILHO; MOTA, 2012). De acordo com Lapponi (2007), após o início da execução do projeto tem-se o investimento, que ocorre quando o dinheiro é comprometido com prazo definido, gerando um fluxo de retornos para compensar o investidor. Além do investimento inicial, a viabilidade econômica deve incluir custos com operação e manutenção, bem como os benefícios obtidos por meio da economia da energia excedente e de biofertilizantes (RIBEIRO, 2020).

Um dos instrumentos mais utilizados para a análise da viabilidade de investimento é o fluxo de caixa, que se refere às operações financeiras que envolvem pagamentos e recebimentos (MACEDO; CORBARI, 2014). Aliado a isso, a seguir são apresentados os principais conceitos relacionados à análise do fluxo de caixa.

- Taxa Mínima de Atratividade (TMA): é uma taxa mínima de retorno pretendida por um investidor sobre o investimento realizado. Essa taxa varia conforme o investidor e as expectativas quanto ao retorno do dinheiro aplicado. Uma forma de definir a TMA é utilizando a taxa de juros praticada pelo mercado, como a Taxa Referencial (TR), Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP) ou a Taxa do Sistema Especial de Liquidação e Custódia (SELIC) (ANDRICH *et al*., 2014).

- Valor Presente Líquido (VPL): é uma metodologia para avaliar o valor presente dos fluxos de caixa gerados por um projeto ao longo de sua execução, descontado o custo de oportunidade do capital, menos o investimento inicial. O VPL, portanto, fornece o valor atual do projeto. Quando o VPL apresenta valores positivos, indica que a alternativa analisada é viável economicamente, caso contrário, o projeto é inviável (GITMAN, 2012; SAMANEZ, 2007). A equação do VPL está apresentada na equação 3 (JACOBOWSKI, 2018).

$$VPL = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{FC_t}{(1+i)^n} \quad (3)$$

Em que: FC_t é o fluxo de caixa; t é o ano de análise; i é a taxa de juros; n é a vida útil do projeto.

- Taxa Interna de Retorno (TIR): é a taxa que representa o valor anual que o investidor obtém sobre o investimento, enquanto esse valor é recuperado gradativamente, ou seja, a TIR é utilizada para determinar a taxa de rentabilidade mínima que torna um projeto viável. Matematicamente, a TIR é a taxa interna do projeto que resulta em um VPL nulo (Equação 4) (MENDES, 2017).

$$VPL = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{FC_t}{(1+TIR)^n} \rightarrow 0 \quad (4)$$

Se TIR > i, o projeto é viável;
Se TIR < i, o projeto é desfavorável;
Se TIR = i, é indiferente aceitar ou não o projeto (MENDES, 2017).

3. METODOLOGIA

O primeiro passo para alcançar os objetivos desta pesquisa foi a realização da revisão bibliográfica sobre o tema, contemplando a análise bibliométrica; os resíduos sólidos urbanos; legislações; pré-tratamentos; digestão anaeróbia; tratamentos complementares; geração, comercialização e incentivos da energia elétrica; situação do biogás no mundo e viabilidade de projetos. Depois foi realizado um levantamento de dados da literatura referentes à geração dos resíduos nas cidades de Ouro Preto, Mariana e Itabirito, além dos dados econômicos relacionados ao aproveitamento do biogás. Os valores encontrados foram utilizados como uma base de dados de entrada na ferramenta *Biogas Tool* (*DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH*, 2018), a qual foi utilizada como referência neste trabalho e está detalhada do item 3.1. Com o auxílio desta ferramenta foi possível avaliar diferentes cenários (Tabela 5) para a geração de biogás a partir da FORSU gerada no município de Ouro Preto.

Cenários 1 e 2 Tecnologia	Cenários 3 e 4 Venda de CBIOs	Cenários 5 e 6 Consórcio Municipal
Avaliação econômica da utilização de lagoa anaeróbia (1) e CSTR (2) para a geração de biogás em Ouro Preto.	Avaliação econômica da venda de créditos de carbono (CBIOs) utilizando lagoa anaeróbia (3) e CSTR (4) para a geração de biogás em Ouro Preto.	Avaliação econômica da criação de um consórcio municipal utilizando lagoa anaeróbia (5) e CSTR (6) para a geração de biogás em Ouro Preto.

Tabela 5 – Cenários avaliados no estudo (Autor).

A avaliação dos cenários 1 e 2 contempla a comparação das tecnologias de lagoa anaeróbia e CSTR respectivamente. Nos cenários 3 e 4 foi avaliada a influência da venda de créditos de carbono (CBIOs) na viabilidade econômica da lagoa anaeróbia (cenário 3) e do CSTR (cenário 4). Por fim, avaliou-se a criação de um consórcio para o tratamento da FORSU com o objetivo de ganhar escala de produção de biogás utilizando lagoa anaeróbia (cenário 5) e CSTR (cenário 6). A Figura 9 foi elaborada a fim de detalhar e facilitar a compreensão dos cenários avaliados nesta pesquisa.

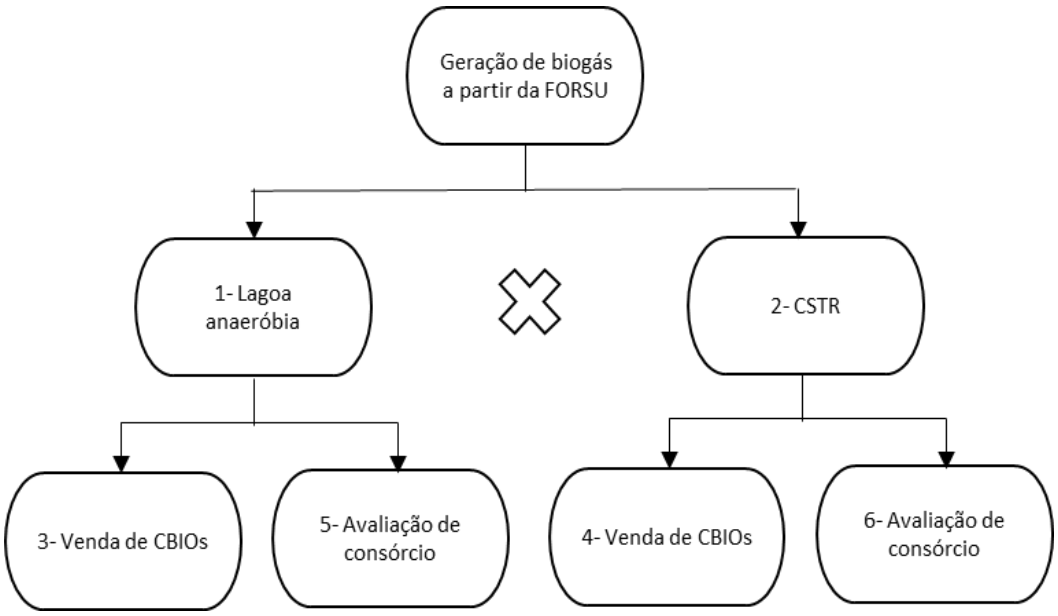

Figura 9 – Cenários estudados para geração e aproveitamento econômico do biogás (Autor).

3.1. *Biogas Tool*

O *Biogas Tool* é uma ferramenta desenvolvida no software *Microsoft Excel* pela "*Danish Energy Agency*", "*EA Energy Analyses*" e "*IB Tech*" para auxiliar na avaliação técnica e econômica preliminar da geração e uso do biogás.

A ferramenta utiliza uma base de dados interna para a construção de modelos visando estimar custos. Esses modelos foram construídos considerando condições econômicas mexicanas e devem ser aplicados apenas para uma avaliação inicial da viabilidade da geração e do aproveitamento do biogás. Os resultados podem ser utilizados para decidir se é viável fazer avaliações técnicas completas e detalhadas. *(*DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH, 2019).

Após introduzir os dados de produção anual e características da FORSU, a tecnologia de digestão anaeróbia e o uso do biogás pretendido foram escolhidos. Em uma segunda etapa, os dados econômicos, como custos de energia, preço dos CBIOs, custos de reagentes, custos de terras, transporte e descarte de resíduos sólidos, preço dos fertilizantes, valores para o tempo de avaliação do projeto, taxa de juros e inflação anual, período de retorno mínimo e taxa mínima de retorno aceitável, foram adicionados ao *Biogas Tool*. A partir dessas informações,

a ferramenta calcula o rendimento anual de biogás, a geração de biomassa e digestato, a possível geração de eletricidade e os benefícios econômicos relacionados ao uso do biogás. Também são estimados os benefícios ambientais, como por exemplo a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) e a produção de biofertilizante (*DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH*, 2019).

3.2. Área de estudo

3.2.1. Ouro Preto - MG

O município de Ouro Preto, pertencente ao estado de Minas Gerais, está localizado nas coordenadas geográficas 20º 28’ 80’’ Sul e 43º 50’ 80’’ Oeste. Ouro Preto faz divisa com Catas Altas da Noruega, Itaverava, Pitanga, Ouro Branco, Congonhas, Belo Vale, Moeda, Mariana, Itabirito e Santa Bárbara (IBGE, 2012). A Figura 10 apresenta a localização geográfica de Ouro Preto e os municípios em torno.

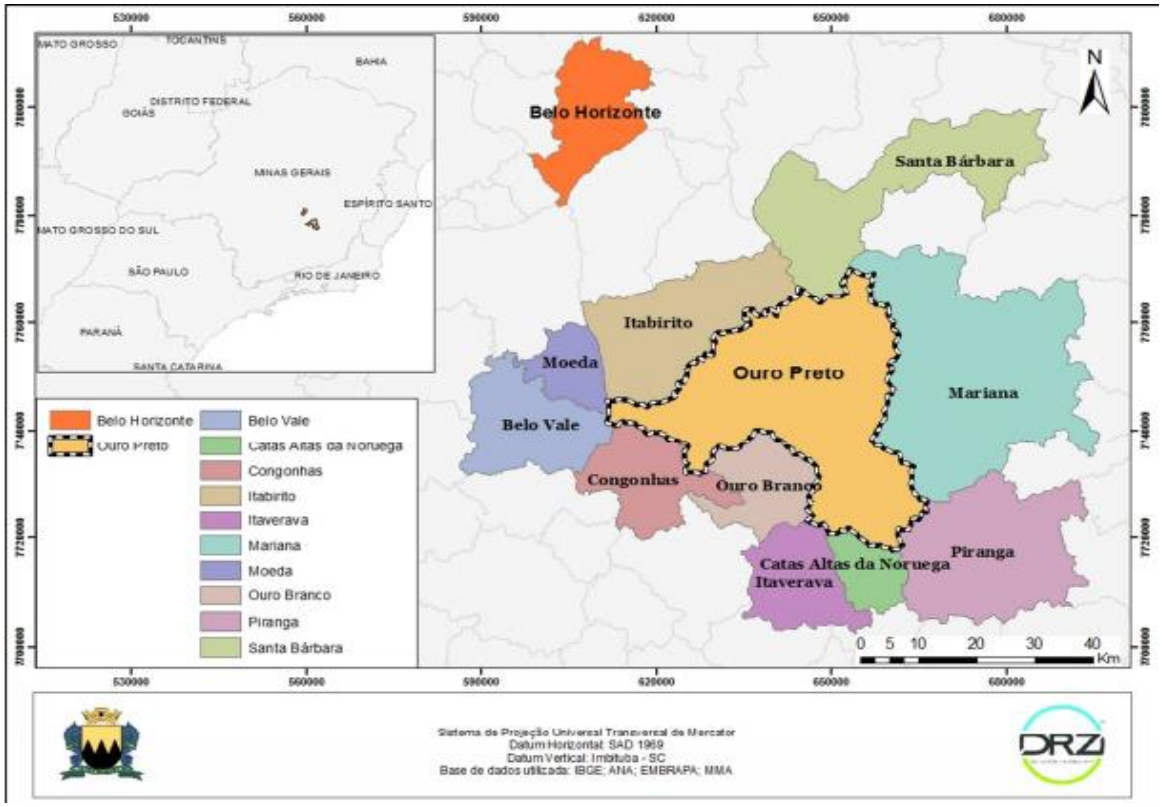

Figura 10 – Localização do município de Ouro Preto e municípios mais próximos (DRZ Gestão Ambiental, 2013).

Com uma população estimada de 74.558 habitantes e uma densidade populacional de 56,81 hab/km^2 (IBGE, 2020), Ouro Preto é formado pela sede e 12 distritos, são eles: Amarantina, Antônio Pereira, Cachoeira do Campo, Engenheiro Correia, Glaura, Lavras Novas, Miguel Burnier, Rodrigo Silva, Santa Rita de Ouro Preto, Santo Antônio do Leite, Santo Antônio do Salto e São Bartolomeu (IBGE, 2012).

Em Ouro Preto - MG são gerados anualmente 21.960 toneladas de RSU no município de Ouro Preto, que equivale a 0,81 kg/hab.dia, sendo que a fração orgânica corresponde a 52,59% ou 11.548,76 toneladas (PIMENTA; DIAS, 2018; SNIS, 2019). A coleta seletiva na cidade tem baixa adesão da população, sendo grande parte dos RSU destinados a um aterro controlado, que atualmente passa por problemas relacionados à operação (PIMENTA; DIAS, 2018).

Como em diversos outros municípios, os serviços relacionados aos resíduos sólidos em Ouro Preto não são autossustentáveis financeiramente. De acordo com a FUNDAÇÃO GORCEIX, 2020, o município arrecada R$ 6.573.600,00 por ano e tem uma despesa anual de R$ 14.417.203,75, ou seja, o déficit dos serviços de manejo dos RSU em Ouro Preto é de R$ 7.843.603,75.

3.2.2. Itabirito - MG

Itabirito está localizado nas coordenadas 20º15’11’’ Sul e 43º47’21’’ Oeste, entre a capital mineira Belo Horizonte e a cidade histórica de Ouro Preto. De acordo com a prefeitura, Itabirito é composto pelos distritos: São Gonçalo do Bação, São Gonçalo do Monte e Acuruí e pelas comunidades: Barrinha, Bonsucesso, Bota Cabral, Cachoeirinha, Calado, Capanema, Córrego do Bação, Grota da Mina, Jaguara, Macedo, Mata, Medeiros, Palmital, Perobas, Pico, Ribeirão do Eixo, Saboeiro e Teixeiras (ITABIRITO, 2021).

A população estimada de Itabirito é de 52.446 habitantes, enquanto a densidade demográfica é de 83,76 hab/km² (IBGE, 2020). O município gera 10.848,5 ton/ano de RSU, que equivale a 0,57 kg/hab.dia, sendo que 48%, ou 5.207,28 ton/ano, são orgânicos (FUNDAÇÃO GORCEIX, 2020; SNIS, 2019).

A coleta de resíduos domiciliares, parte da limpeza pública e da coleta seletiva, a coleta convencional e a operação do aterro sanitário são realizadas por uma empresa terceirizada, a

qual atende a totalidade da área urbana e rural. A Associação dos Catadores de Materiais Recicláveis de Itabirito (ASCITO) também realiza a coleta seletiva, que atinge 1,24 toneladas de material coletado por dia. A destinação final dos resíduos sólidos domésticos gerados no município é realizada no Aterro Sanitário Municipal de Itabirito (DRZ GESTÃO AMBIENTAL, 2014).

De acordo com Santana (2013), a aprovação dos moradores de Itabirito em relação à eficiência do gerenciamento de RSU é maior quando comparada à Mariana e Ouro Preto, o que, segundo o autor, se refletiu no grau de satisfação da população e credibilidade individual quanto ao gerenciamento municipal de RSU, que também foram maiores em Itabirito.

Apesar de uma destinação mais ambientalmente adequada segundo a PNRS, Itabirito apresenta um déficit de R$ 3.954.903,38 no manejo dos RSU, já que arrecada R$ 227.075,00 e tem uma despesa anual de R$ 4.181.978,38 (FUNDAÇÃO GORCEIX, 2020).

3.2.3. Mariana - MG

O município de Mariana localiza-se na latitude 20,37º Sul e longitude 43,41º Oeste. Mariana é composta por nove distritos, são eles: Águas Claras, Santa Rita Durão, Monsenhor Horta, Camargos, Bandeirantes (Ribeirão do Carmo), Padre Viegas (Sumidouro), Cláudio Manoel, Furquim, Passagem de Mariana, Cachoeira do Brumado (MARIANA, 2021; SANTANA, 2013).

Com uma população estimada de 61288 habitantes e uma densidade populacional de 45,40 hab/km^2 (IBGE, 2020), Mariana gera 18.172,3 ton/ano de RSU, que equivale a 0,81 kg/hab.dia, sendo a fração orgânica equivalente a 45% do total, ou 8177,54 ton/ano (MARIANA, 2015; SNIS, 2019).

No município existe um programa de coleta seletiva, o qual é executado pela associação de catadores – CAMAR e é responsável pela coleta de cerca de 1.080 toneladas por ano de resíduos recicláveis. Os RSU de Mariana eram encaminhados para um aterro controlado, o qual foi desativado em 2009 e se encontra coberto desde então, sem, contudo, estar devidamente recuperado. Após 2009, iniciou-se a operação do aterro sanitário, com Licença de Operação válida até 2015 (TRACTEBEL; FUNDAÇÃO RENOVA, 2019).

Assim como Itabirito e Ouro Preto, Mariana também apresenta um déficit financeiro no manejo de RSU. A arrecadação anual do município com resíduos sólidos urbanos é de R$ 732.844,57 e as despesas anuais são de R$ 11.895.422,40, ou seja, há um déficit de R$ 11.162.577,83 (FUNDAÇÃO GORCEIX, 2020).

3.3. Usina de produção de biogás

A usina de biogás estudada envolve as etapas de pré-tratamento, digestão anaeróbia, tratamento do biogás, geração de energia e tratamento do digestato. A Figura 11 apresenta de forma simplificada estas etapas, sem detalhar os rejeitos gerados no processo.

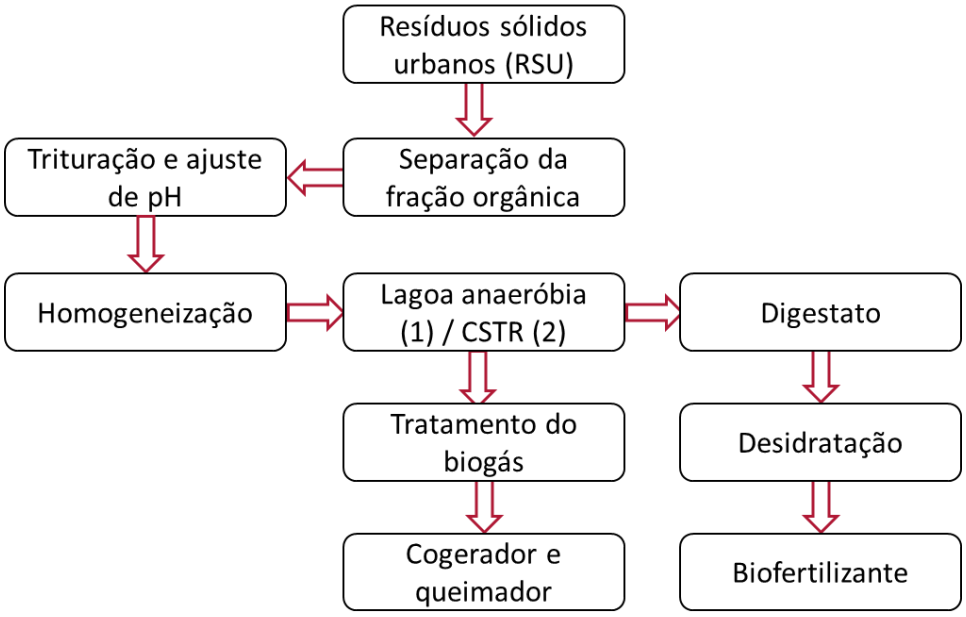

Figura 11 – Fluxograma de processo da usina (Adaptado de DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH, 2018).

Os custos estimados pelo *Biogas Tool* contemplam todos os acessórios necessários em cada equipamento, bem como as obras civis, mecânicas e elétricas a serem realizadas.

A etapa de pré-tratamento inclui separação dos sólidos por meio da coleta seletiva, seguida pela trituração, ajuste de pH e homogeneização do substrato. Os custos para a tecnologia de lagoa anaeróbia incluem aspectos relacionados à construção, como escavação, geomembrana e cobertura para coleta de biogás. Já para o CSTR, além das obras e

instrumentação necessária, também foram considerados os custos do reator, trocador de calor e caldeira.

Em relação ao manejo do lodo, a lagoa de sedimentação e a centrífuga de lodos foram consideradas para a tecnologia de lagoa anaeróbia, enquanto para o CSTR apenas a centrífuga foi utilizada. O custo estimado também inclui o sistema de bombeamento de lodo, o recipiente para acondicionamento dos sólidos e um compressor de ar.

O manejo do biogás e geração de energia foi igual para as duas tecnologias em estudo. Para o tratamento do biogás foram considerados o *gas holder* (armazenamento), o queimador de biogás e o sistema de dessulfurização (filtro de óxido de ferro) e todos os acessórios necessários para cada um desses equipamentos. Para a geração de energia elétrica e aproveitamento do calor gerado utilizou-se o motor CHP de combustão interna.

3.4. Cenários 1 e 2: Usina de biogás utilizando Lagoa anaeróbia ou CSTR

Como citado anteriormente, os cenários 1 e 2 objetivam comparar as tecnologias de lagoa anaeróbia e CSTR, respectivamente, para a FORSU de Ouro Preto.

Em 2019, o município de Ouro Preto destinou ao aterro controlado 21.960 ton/ano de resíduos sólidos urbanos (SNIS,2019). A fração orgânica desses RSU equivale a 52,59% do total gerado (PIMENTA; DIAS, 2018), ou seja, 11.548,76 ton/ano em 2019. É importante que ao menos a fração úmida (orgânica) seja separada na fonte, pois a instalação de uma etapa de pré-tratamento para a separação adequada pode onerar o negócio, inviabilizando alguns projetos de menor porte (ABIOGÁS, 2020).

Segundo Carvalho *et al.* (2019), diversos países europeus adotaram políticas para evitar o descarte de material biodegradável em aterros sanitários. Um exemplo de sucesso é a Alemanha, que não envia nenhum material biodegradável para os aterros. Aliado a isso, o autor cita que deve ser observada uma tendência positiva no Sul e no Sudeste do Brasil quanto a separação dos resíduos úmidos e secos diretamente da fonte (residências, instalações comerciais, CEASAs, feiras, etc.). No presente estudo foi considerado que a FORSU do município de Ouro Preto seria separada na fonte e encaminhada para a usina de produção de

biogás. Como demonstrado por outros países, esse cenário é possível com o auxílio de políticas públicas e cooperação da população.

A caracterização dos RSU é influenciada por diversos fatores como: número de habitantes, poder aquisitivo, nível educacional, hábitos e costumes da população; condições climáticas e sazonais e mudanças na política econômica de um país (DRZ GESTÃO AMBIENTAL, 2013). Observou-se que não há dados disponíveis na literatura sobre as características da FORSU de Ouro Preto. Aliado a isso, considerando as semelhanças econômicas e climáticas entre o Brasil e o México e que os dados técnicos da ferramenta estavam de acordo com os valores relatados por outras referências, como o CIBiogás, optou-se por utilizar os valores sugeridos pelo *Biogas Tool*, os quais estão apresentados na Tabela 6.

Dados de entrada	Quantidade	Unidade	Referência
FORSU em Ouro Preto	11.548,76	ton/ano	Adaptado de (SNIS, 2019; PIMENTA; DIAS, 2018)
Sólidos totais (ST)	29,70	%	(*DEA et al*., 2018)*
Sólidos voláteis (SV)	0,75	SV/ST	(*DEA et al*., 2018)*
Volume biogás	0,40	$m^3CH_4/kgSV$	(*DEA et al*., 2018)*
Volume biogás	0,09	m^3CH_4/kg Substrato	(*DEA et al*., 2018)*
Densidade	1,00	ton/m^3	(*DEA et al*., 2018)*
Potencial do metano	14,40	GJ/ton	(*DEA et al*., 2018)*
Concentração de CH4 no biogás	65,00	%	(*DEA et al*., 2018)*
Concentração de lipídeos	17,50	% dos ST	(*DEA et al*., 2018)*
COV (Lagoa anaeróbia)	2,50	$kgSV/m^3/d$	(*DEA et al*., 2018)*
COV (CSTR)	6,00	$kgSV/m^3/d$	(*DEA et al*., 2018)*
Temperatura do substrato	25,00	ºC	(*DEA et al*., 2018)*
Temperatura média verão	23,00	ºC	(EMBRAPA, 2021)
Temperatura média inverno	19,60	ºC	(EMBRAPA, 2021)
Pressão atmosférica	0,86	atm	(Engineering ToolBox, 2003)

Tabela 6: Dados de entrada técnicos utilizados na ferramenta *Biogas Tool* (Autor).
**DEA et al. = DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH*, 2018.

Os dados econômicos introduzidos na ferramenta foram convertidos para o dólar. Aliado a isso, utilizou-se o câmbio real-dólar do dia 26/10/2021, em que 1 dólar equivalia a 5,58 reais (Banco Central do Brasil, 2021).

O valor da tarifa de energia adotado foi de R$ 628,33/MWh (US$ 112,60/MWh), que corresponde a soma da tarifa de uso dos sistemas elétricos de distribuição (TUSD-Convencional) e a tarifa de energia (TE-Convencional), ambas aplicadas pela distribuidora Cemig, antes de impostos ICMS, PIS/PASEP E COFINS (ANEEL, 2020).

Os preços dos reagentes foram encontrados no site *Mercado Livre* em outubro de 2021 e comparados com os valores sugeridos pelo *Biogas Tool*. Nesse sentido, o preço sugerido para a soda cáustica era de R$ 7,90/Kg (US$ 1,42/Kg), enquanto o valor sugerido pelo *Biogas Tool* é de US$ 0,95/Kg. Como coagulante foi considerado o sulfato de alumínio, que custava R$ 6,50/Kg (US$ 1,17/Kg), enquanto o valor sugerido pela ferramenta foi de US$ 0,95/Kg. Por fim, o preço para a limalha de ferro, utilizada como adsorvente no tratamento do biogás, era de R$ 18,10/Kg (US$ 3,24/Kg), valor um pouco superior aos US$ 3,00/Kg sugerido pelo *Biogas Tool*.

Para calcular os benefícios da venda de fertilizantes, a ferramenta faz uma conversão do fluxo mássico de sólidos (ST) em nitrogênio (N), em que 1 ton_{ST} equivale a 5,40 Kg_N. Posteriormente, o fluxo mássico de N é convertido em fluxo mássico de uréia equivalente, em que 1 Kg de ureia equivale a 0,47 Kg de N. Por fim, a pureza do fertilizante, considerada de 44%, é utilizada para converter a uréia equivalente em fluxo mássico de fertilizante.

De acordo com o Instituto de Economia Agrícola (IEA) de São Paulo, o valor de 1 ton de ureia em agosto de 2021 era de R$ 3.395,05. Como a pureza utilizada é de 44%, o preço de 1 ton de fertilizante é igual ao preço de 0,44 ton de uréia equivalente, ou seja, R$ 1.493,82 (US$ 267,71/ton).

O *Biogas Tool* também avalia a geração de calor, e, aliado a isso, o preço do combustível a ser substituído pelo biogás também é um dado de entrada para a ferramenta. Dessa forma, adotou-se o valor de R$ 8,08/kg (US$ 1,44/kg), o qual representa o preço médio de venda do gás liquefeito de petróleo (GLP) em agosto de 2021 para a cidade de Belo Horizonte (ANP, 2021).

Neste estudo foi considerado que a usina de biogás seria instalada ao lado do aterro controlado do município de Ouro Preto, localizado na Estrada Rancharia, MG-129, entre Ouro

Preto e Ouro Branco. É importante ressaltar que, como esta pesquisa é uma avaliação preliminar da viabilidade econômica da geração de biogás, não foram realizados estudos específicos para definir se o local, apresentado na Figura 12, é o mais apropriado para receber uma usina de geração de biogás no município.

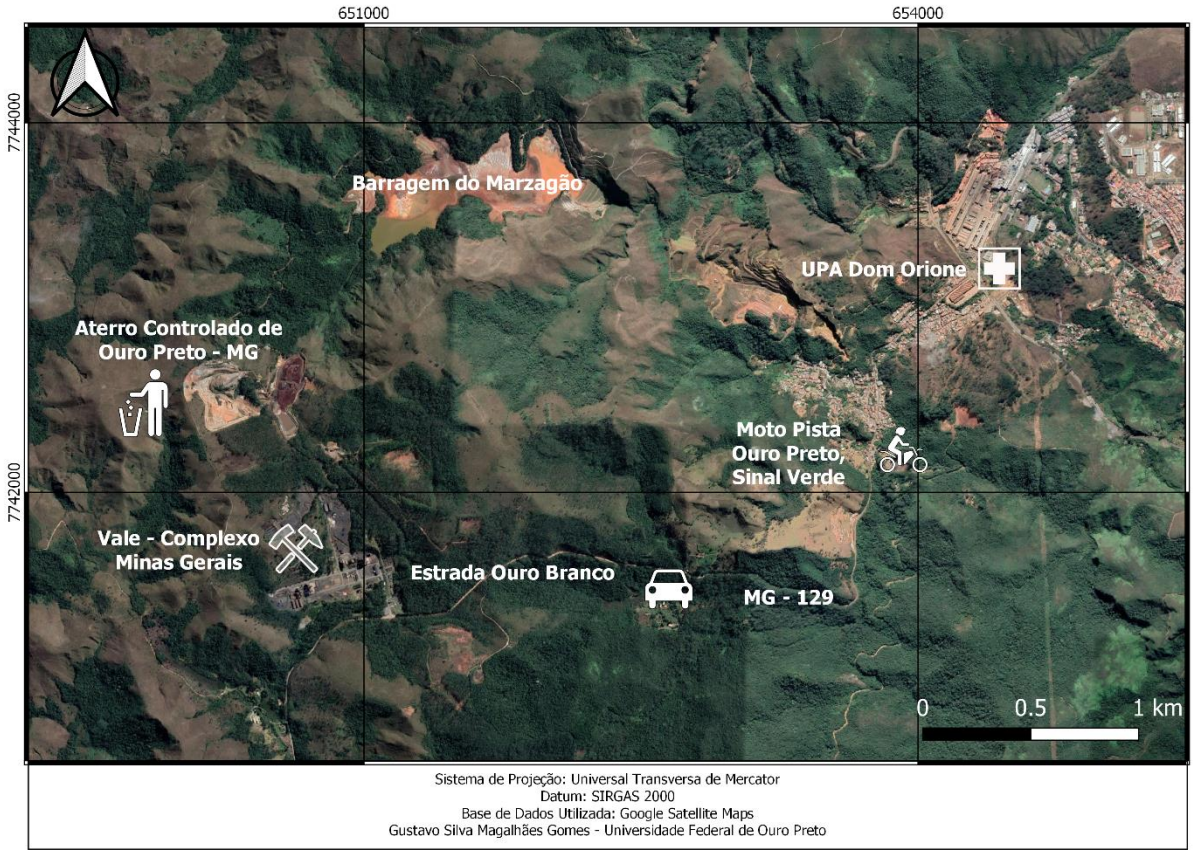

Figura 12: Localização do aterro controlado de Ouro Preto (Autor).

Para encontrar o valor do terreno foi consultada a Lei Municipal nº 1069 de 15 de dezembro de 2017. De acordo com essa lei, o preço do metro quadrado para essa localização estava em R$ 63,75/m² em 2017. Conforme recomendado pela lei, o valor encontrado foi corrigido utilizando o Índice Nacional de Preço ao Consumidor (INPC), resultando em um preço de R$ 78,09/m² (US$ 13,99/m²) para setembro de 2021.

A área considerada para a lagoa anaeróbia foi aproximada pela divisão do volume da lagoa calculado pelo *Biogas Tool* (2.819,16 m^3) pela profundidade de 5 metros, obtendo uma área de 563,83 m^2. Aliado a isso, fixou-se 20%, ou 112,77 m^2, dessa área para outras

construções da usina de biogás. O mesmo cálculo foi realizado para o CSTR, ou seja, dividiu-se o volume encontrado pelo *Biogas Tool* (1.174,65 m^3) pela profundidade de 5 metros, obtendo uma área de 234,93 m^2, a qual foi somada aos mesmos 20%, ou 112,77 m^2, fixados anteriormente para a lagoa.

Paiva estimou os custos para o transporte de RSU no município de Ouro Preto incluindo mão de obra e combustível, obtendo um valor de R$ 176.088,92 para 2018. Esse valor foi atualizado pelo INPC para R$ 208.275,93 em setembro de 2021. Por fim, dividiu-se o valor encontrado pela geração de resíduos, resultando em um gasto de R$ 9,48/m^3 (US$ 1,70/m^3).

Os gastos referentes a disposição de RSU foram obtidos através de conversas com a secretaria de meio ambiente do município. Segundo a equipe técnica, os gastos com a operação do aterro incluem a contratação de empresa para fornecimento de 3 caminhões basculantes, 1 trator de esteira e 1 escavadeira hidráulica e a manutenção do reator anaeróbio de fluxo ascendente que trata o chorume gerado, totalizando R$ 1.004.289,20 por ano (OURO PRETO, 2021). Esse valor pode ser dividido pela quantidade de RSU gerados, obtendo um custo final de R$ 45,79/ton (US$ 8,21/ton).

Para a avaliação econômica do projeto foi considerada a taxa mínima de atratividade de 15%, o tempo de avaliação de projeto de 10 anos e 10 anos como período máximo de retorno. Para a obtenção da taxa da poupança (2,25% a.a) e da inflação (10,29% a.a) foram considerados os valores acumulados no período de outubro de 2020 até setembro de 2021. Por fim, segundo o BNDES em outubro de 2021, o valor para a taxa de juros de longo prazo (TJLP) era de 5,32%. O empréstimo seria pago por um período de 10 anos.

A Tabela 7 apresenta os dados de entrada econômicos utilizados na ferramenta *Biogas Tool*.

Dados de entrada	Valor	Unidade	Referência
Tarifa de fornecimento de energia	112,60	US$/MWh	(ANEEL, 2020)
Soda cáustica	1,42	US$/Kg	(MERCADO LIVRE, 2021a)
Coagulante (Sulfato de alumínio)	1,17	US$/Kg	(MERCADO LIVRE, 2021b)
Limalha de Ferro	3,24	US$/Kg	(MERCADO LIVRE, 2021c)
Fertilizantes	267,71	US$/ton	(IEA, 2021)
Gás liquefeito de petróleo	1,44	US$/kg	(ANP, 2021)
Valor do terreno	13,99	US$/m²	Adaptado de (OURO PRETO, 2017)
Área da usina (lagoa anaeróbia)	676,60	m²	Estimado
Área da usina (CSTR)	347,70	m²	Estimado
Transporte de RSU	1,70	US$/m³	Adaptado de (PAIVA, 2018)
Disposição (por tonelada)	8,21	US$/ton	Adaptado de (OURO PRETO, 2021)
Tempo de avaliação de projeto	10,00	Ano	Adotado
Anos que a dívida é paga	10,00	Ano	Adotado
Máximo período de retorno	10,00	Ano	Adotado
Taxa de retorno mínima aceitável	15,00	%	Adotado
Inflação	10,29	%	Adaptado de (BANCO CENTRAL DO BRASIL; IBGE, 2021)
Juros bancários sobre a poupança	2,25	%	Adaptado de (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2021)
Juros bancários sobre empréstimos	5,32	%	Adaptado de (BNDES, 2021)

Tabela 7: Dados de entrada econômicos utilizados na ferramenta *Biogas Tool* (Autor).

3.5. Cenários 3 e 4: Influência da venda de CBIOs

Para os cenários 3 e 4 foi avaliada a influência da comercialização de crédito de descarbonização (CBIO), no âmbito do Programa Nacional de Biocombustível – RenovaBio, na viabilidade da implantação de uma usina de geração de biogás a partir da FORSU de Ouro Preto. A emissão dos CBIOs é feita pelos produtores de biocombustíveis, após serem habilitados e certificados pela ANP, sendo disponibilizados conforme a eficiência energética da geração do biocombustível.

Para essa análise utilizou-se a tecnologia de lagoa anaeróbia (cenário 3) e CSTR (cenário 4), e, além disso, todos os dados técnicos da Tabela 6 e os dados econômicos da Tabela 7 foram mantidos. Os cálculos das emissões equivalentes de CO_2 foram realizados de acordo com a ferramenta "RenovaCalc_Biometano_Aberta (v.7)" (BRASIL, 2021), disponibilizada pelo

RenovaBio para a rota de produção de biometano, considerando o processo de aproveitamento de biogás de aterro.

A utilização de RSU para a geração de biogás, por definição, é isento de carga ambiental. Na análise de ciclo de vida são consideradas apenas as emissões ocorridas após a geração do resíduo, como nas etapas de recolhimento e transporte (MATSUURA *et al.*, 2018). Nesta pesquisa adotou-se que a usina seria ao lado do aterro controlado já existente no município, ou seja, não haveria aumento na emissão de carbono no transporte dos resíduos, já que a distância de transporte seria a mesma com ou sem usina de geração de biogás.

A partir dos dados de entrada, adaptados do *Biogas Tool* e apresentados na Tabela 8, a RenovaCalc calcula a intensidade de carbono (gCO_2equivalente/MJbiometano) do processo. Vale ressaltar que, como a principal fonte de energia elétrica brasileira é hidráulica, o consumo energético da planta foi considerado como proveniente de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Esse valor é então subtraído da intensidade de carbono de referência (86,70 gCO_2eq/MJ), que segundo a RenovaCalc, é uma média entre a utilização de gasolina, diesel e GNV. A partir dessa subtração é obtida a nota de eficiência energética-ambiental, que multiplicada pelo potencial global de geração energética, resulta na mitigação de CO_2 equivalente emitido por ano. Esses cálculos podem ser visualizados nas Equações 5 e 6:

$$NEE = IC - ICR \quad (5)$$

$$RE = NEE \, x \, PE \quad (6)$$

Em que: NEE é a nota de eficiência energética; IC é a intensidade de carbono do biocombustível segundo a RenovaCalc; ICR é a intensidade de carbono de referência (86,70 gCO_2eq/MJ); RE representa a redução das emissões e PE é o potencial global energético da usina de biogás.

Os ganhos econômicos são calculados com base na quantidade de CBIOs emitidas por ano (1 CBIO = 1 ton de CO_2). De acordo com a bolsa de valores do Brasil (B3) o preço médio do CBIO no dia 25/10/2021 foi de R$ 42,90/CBIO (US$ 7,69/CBIO).

Dados de entrada (RenovaCalc)	Lagoa anaeróbia	CSTR	Unidade
Biomassa	11.548,76	11.548,76	ton/ano
Distância de transporte	0	0	Km
Produção de metano	926.096,25	1.131.894,20	m³/ano
Potencial energético	33.246.855,40	40.635.001,80	MJ/ano
Produção de eletricidade	2.971.221,66	3.631.493,15	kWh/ano
CH4 no biogás	65	65	%
PCI do metano	35,90	35,90	MJ/m³
Consumo de eletricidade	146,14	1.011,24	MWh/ano
Fonte de energia	PCH	PCH	---------
Preço CBIO	7,69	7,69	US$/CBIO

Tabela 8: Dados de entrada utilizados na ferramenta RenovaCalc (Autor).

3.6. Cenários 5 e 6: Influência da criação de um consórcio municipal

A criação de consórcios municipais para gerir os resíduos é um fator a ser considerado para aumentar a sustentabilidade econômica da reciclagem e do tratamento dos RSU. Nesse sentido, tanto a Lei nº 12.305/2010, que trata da PNRS, quanto a Lei nº 14.026/2020, que atualiza o marco do saneamento, incentivam a regionalização da prestação desses serviços, de modo a contribuir para a viabilidade técnica e econômico-financeira e a criação de ganhos de escala e de eficiência (BRASIL, 2010, 2020b).

Aliado a isso, nos cenários 5 e 6 foi avaliada a criação de um consórcio municipal para o tratamento da FORSU. Para essa análise utilizou-se a tecnologia de lagoa anaeróbia (cenário 5) e CSTR (cenário 6), e, além disso, os dados técnicos da Tabela 6 e os dados econômicos da Tabela 7 foram mantidos, com exceção aos valores de geração de resíduos, custo para o transporte dos resíduos e a área da usina, os quais foram recalculados e estão demonstrados a seguir.

Os municípios de Ouro Preto, Itabirito e Mariana fazem parte do Consórcio Intermunicipal Multissetorial do Vale do Piranga (CIMVALPI), o qual, em seu Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PIGIRS), sugeriu que Ouro Preto,

Mariana, Itabirito e Desterro de Entre-Rios formassem uma região para melhor aproveitamento dos RSU (FUNDAÇÃO GORCEIX, 2020). Neste estudo, devido ao afastamento territorial de Desterro de Entre-Rios, apenas os municípios de Ouro Preto, Mariana e Itabirito foram considerados para o tratamento conjunto da FORSU.

A Tabela 9 apresenta as gerações de RSU e as frações orgânicas consideradas para os municípios de Ouro Preto, Mariana e Itabirito. A geração de resíduos orgânicos total (24.933,60 ton/ano) foi utilizada como dado de entrada na ferramenta *Biogas Tool.*

Geração de resíduos	RSU	Orgânico	
Ouro Preto	21.960,00	52,59%	11.548,76 ton/ano
Mariana	18.172,30	45,00%	8.177,54 ton/ano
Itabirito	10.848,50	48,00%	5.207,28 ton/ano
TOTAL	50.980,80	-	24.933,6 ton/ano

Tabela 9: Geração de FORSU nos municípios de Ouro Preto, Mariana e Itabirito (Autor).

Como citado no item 3.4 deste estudo, estimou-se o valor de US$ 1,70/m³ para o transporte dos resíduos em Ouro Preto. A distância média do centro do município até o aterro (mesma localização da usina) corresponde a 9,0 km (GOOGLE MAPS, 2021). Logo, US$ 0,19/m³.km foi o custo unitário encontrado em Ouro Preto e utilizado para determinar o preço do transporte de Mariana e Itabirito até a localização hipotética da usina.

A distância do centro de Mariana e de Itabirito até o aterro de Ouro Preto é de 21,6 km e 46,0 km, respectivamente (GOOGLE MAPS, 2021). Aplicando esses valores, foi possível encontrar um custo unitário de US$ 4,10/m³ para Mariana e US$ 8,74/m³ de Itabirito à Ouro Preto. Por fim, a média ponderada pela geração de resíduos orgânicos foi calculada, resultando em um custo final de transporte de US$ 4,05/m³ para o consórcio entre Ouro Preto, Mariana e Itabirito.

A área considerada para a lagoa anaeróbia foi aproximada pela divisão do volume da lagoa calculado pelo *Biogas Tool* (6.086,53 m^3) pela profundidade de 5 metros, obtendo uma área de 1217,31 m^2. Aliado a isso, fixou-se 20%, ou 243,46 m^2, dessa área para outras construções da usina de biogás. O mesmo cálculo foi realizado para o CSTR, ou seja, dividiu-se o volume encontrado pelo *Biogas Tool* (2.536,05 m^3) pela profundidade de 5 metros,

obtendo uma área de 507,21 m^2, a qual foi somada aos mesmos 20%, ou 243,46 m^2, fixados anteriormente para a lagoa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Cenários 1 e 2

Nos cenários 1 e 2 foram avaliadas as tecnologias de lagoa anaeróbia e CSTR, respectivamente, para o tratamento da FORSU e geração de biogás em Ouro Preto. Um ponto importante para a análise de viabilidade é o investimento inicial necessário (CAPEX). Dessa forma, as Tabelas 10 e 11 apresentam os equipamentos e custos envolvidos com as duas tecnologias avaliadas neste estudo.

Processo	Incluso	Capacidade				Custo (US$)
Trituração	Obra civil e mecânica.	1.318,3	Kg/h	-	-	24.100,34
Neutralização	Obra civil e mecânica.	2,6	m^3	1,3	m^3/h	10.574,58
Lagoa anaeróbia	Escavação, revestimento, geomembrana e coberta para recolher o biogás.	2.819,2	m^3	89,1	Dias	273.566,52
Armazenamento do biogás (Gas holder)	Capas externas e internas, membrana e placa de interface hermética e conexões.	500,0	m^3	2,0	Horas	129.425,00
Queimador de biogás	Sistema de alívio de pressão com supressor de chamas, válvulas de retenção e armadilha de condensado.	162,6	m^3/h	-	-	169.089,63
Dessulfurização (Filtro de óxido de ferro)	Obra civil e mecânica.	3,7	kgH_2S/dia	-	-	30.340,88
Lagoa de sedimentação	Escavação, revestimento, geomembrana e coberta para coleta de biogás.	63,3	m^3	2,0	Dias	47.263,34
Centrífuga de lodo	Bomba de purga anaeróbia, recipiente de lodo e compressor de ar.	11,9	m^3/h	-	-	355.134,25
CHP de combustão interna	Obra civil e mecânica.	370,0	kWatt	3.565.466,0	kW-h/y	732.752,87
Engenharia	Elaboração e gestão de projetos	-	-	-	-	70.889,90
Serviço	Iniciar os serviços	-	-	-	-	15.420,20
Terreno	Custo para aquisição do terreno	676,6	m^2	-	-	9.465,63
	SUBTOTAL					**1.868.023,14**

Tabela 10: Equipamentos e custos relacionados ao cenário 1 (Autor).

Processo	Incluso	Capacidade				Custo (US$)
Trituração	Obra civil e mecânica.	1.318,3	Kg/h	-	-	24.100,34
Neutralização	Obra civil e mecânica.	2,6	m^3	1,3	m^3/h	10.574,58
CSTR	Obra civil, mecânica e elétrica, instrumentação e controle, assim como equipes.	1.174,6	m^3	37,1	Dias	920.209,71
Caldeira	Obra civil e mecânica.	2,0	BHP	-	-	49.522,83
Trocador de calor	Obra civil e mecânica.	20,2	kW	-	-	28.031,16
Armazenamento do biogás (Gas holder)	Capas externas e internas, membrana e placa de interface hermética e conexões.	500,0	m^3	2,0	Horas	129.425,00
Queimador de biogás	Sistema de alívio de pressão com supressor de chamas, válvulas de retenção e armadilha de condensado.	198,8	m^3/h	-	-	188.247,53
Dessulfurização (Filtro de óxido de ferro)	Obra civil e mecânica.	4,4	kg_2H_2S/ dia	-	-	38.541,23
Centrífuga de lodo	Bomba de purga anaeróbia, recipiente de lodo e compressor de ar.	7,9	m^3/h	-	-	260.523,74
CHP de combustão interna	Obra civil e mecânica.	452,2	kWatt	4.181.097,2	kW-h/y	912.909,98
Engenharia	Elaboração e gestão de projetos	-	-	-	-	179.346,03
Serviço	Iniciar os serviços	-	-	-	-	15.420,20
Terreno	Custo para aquisição do terreno	347,7	m^2	-	-	4.864,32
	SUBTOTAL					**2.761.716,66**

Tabela 11: Equipamentos e custos relacionados ao cenário 2 (Autor).

Por ser um biodigestor com agitação e aquecimento, a COV aplicada no CSTR é superior à lagoa anaeróbia, ou seja, a lagoa requer mais tempo e volume para tratar a mesma quantidade de afluente. No entanto, por apresentar um alto nível tecnológico, o investimento para a instalação de uma usina de biogás foi maior quando os biodigestores CSTR foram utilizados.

Outro fator importante para a viabilidade é o custo de operação (OPEX). Nesse contexto, a Tabela 12 apresenta o OPEX estimado pelo *Biogas Tool* para as duas tecnologias.

Conceito	Lagoa Anaeróbia (Cenário 1)		CSTR (Cenário 2)	
	Quantidade	Custo (US$/ano)	Quantidade	Custo (US$/ano)
Mão de obra	-	20.868,24	-	44.223,48
Telefone	-	9.000,00	-	9.000,00
Limpeza	-	1.200,00	-	1.200,00
Segurança	-	900,00	-	900,00
Veículos	-	2.400,00	-	2.400,00
Edifícios	-	664,56	-	614,88
Estruturas e tanques de concreto	-	5.316,72	-	4.919,16
Estruturas e tanques de aço	-	2.946,36	-	2.690,16
Oleodutos	-	505,08	-	461,16
Equipe elétrica	-	2.126,64	-	4.483,68
Equipe eletromecânica	-	14.178,00	-	23.699,28
Laboratório certificado	-	900,00	-	900,00
Planta de reativos e materiais de laboratório	-	1.200,00	-	1.200,00
Bicarbonato de sódio	281,7 kg/mês	4.799,52	281,7 kg/mês	4.799,52
Coagulante	11.008,2 kg/mês	154.555,20	25.347,8 kg/mês	355.883,64
Esponja de ferro	25,8 kg/mês	1.003,32	30,5 kg/mês	1.186,56
Transporte de resíduos	451,1 m^3/mês	9.155,40	1.038,6 m^3/mês	21.081,36
Disposição de resíduos	478,5 ton/mês	69.534,24	1.101,8 ton/mês	160.111,92
Energia elétrica	12.178,3 kWh/mês	16.455,36	84.269,7 kWh/mês	113.865,24
Filtro de óxido de ferro	-	7.985,83	-	9.723,39
SUBTOTAL	**-**	**325.694,50**	**-**	**763.343,38**

Tabela 12: Custos operacionais dos cenários 1 e 2 (Autor).

Assim como para os investimentos iniciais, os custos de operação do CSTR foram significativamente maiores quando comparados à lagoa anaeróbia. Isso porque os biodigestores CSTR necessitam de mão de obra mais especializada, geram mais lodos e consomem mais energia elétrica do que as lagoas. Apesar da maior demanda de área das lagoas anaeróbias, os custos considerados para a obtenção do terreno não foram significativos quando comparados ao investimento necessário para a usina.

Para finalizar a comparação entre as duas tecnologias, a Tabela 13 apresenta as receitas e poupanças para os cenários utilizando lagoa anaeróbia e CSTR.

Receita/poupança	1- Lagoa (US$/ano)	2- CSTR (US$/ano)
Crédito de energia elétrica	334.559,56	408.906,13
Poupança com a geração de calor	41.798,92	51.087,57
Poupança com o transporte	19.632,89	19.632,89
Poupança com a disposição em aterros	94.815,32	94.815,32
Venda do digestato (uréia equivalente)	24.148,53	24.148,53
-SUBTOTAL	**514.955,22**	**598.590,44**

Tabela 13: Receitas e poupanças dos cenários 1 e 2 (Autor).

É possível notar que as receitas do biodigestor CSTR não suprem os gastos operacionais, ou seja, o cenário 2 não foi considerado viável economicamente para a geração de biogás utilizando a FORSU de Ouro Preto – MG. Por esse motivo, prosseguiu-se com a análise do cenário 1, com a utilização da lagoa, enquanto o cenário 2, utilizando o CSTR, foi descartado.

As receitas do cenário 1 superaram o OPEX. No entanto, para uma análise financeira, é preciso considerar não apenas os investimentos, gastos operacionais e receitas apresentadas neste tópico, mas também a inflação, rendimento da poupança, juros sobre empréstimo bancário e anos em que o financiamento é pago. Dessa forma, a Tabela 14 demonstra a análise financeira da lagoa anaeróbia e a Tabela 15 apresenta o cálculo dos indicadores relacionados à essa análise.

Poupança vs. Juros do financiamento							
Ano	Receitas/ Poupança (US$)	OPEX (US$)	Juros bancários (US$)	Saldo anual (US$)	Saldo acumulado (US$)	CAPEX (US$)	Saldo do financiamento (US$)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.868.023,14	1.868.023,14
1	567.944,11	359.208,47	99.378,83	109.356,81	109.356,81	0,00	1.681.220,83
2	626.385,56	396.171,02	89.440,95	140.773,60	252.590,94	0,00	1.494.418,51
3	690.840,64	436.937,02	79.503,06	174.400,56	432.674,79	0,00	1.307.616,20
4	761.928,14	481.897,84	69.565,18	210.465,12	652.875,09	0,00	1.120.813,89
5	840.330,55	531.485,12	59.627,30	249.218,12	916.782,91	0,00	934.011,57
6	926.800,56	586.174,94	49.689,42	290.936,20	1.228.346,72	0,00	747.209,26
7	1.022.168,34	646.492,34	39.751,53	335.924,46	1.591.908,98	0,00	560.406,94
8	1.127.349,46	713.016,41	29.813,65	384.519,40	2.012.246,33	0,00	373.604,63
9	1.243.353,72	786.385,80	19.875,77	437.092,15	2.494.614,03	0,00	186.802,31
10	1.371.294,81	867.304,89	9.937,88	494.052,04	3.044.794,88	0,00	0,00
11	1.512.401,05	956.550,57	0,00	555.850,48	3.669.153,25	0,00	0,00
12	1.668.027,12	1.054.979,62	0,00	613.047,50	4.364.756,70	0,00	0,00
13	1.839.667,11	1.163.537,02	0,00	676.130,09	5.139.093,81	0,00	0,00
14	2.028.968,85	1.283.264,98	0,00	745.703,87	6.000.427,29	0,00	0,00
15	2.237.749,75	1.415.312,95	0,00	822.436,80	6.957.873,70	0,00	0,00
Tempo em que se recupera o investimento						**7,66**	**anos**
Iteração da taxa interna					**0,1395**		

Tabela 14: Análise financeira do cenário 1 (Autor).

Ano	Fluxo de caixa (-Capex + poupança -OPEX) (US$)	VPL (Taxa i) (US$)	VPL (TIR) (US$)
0	-1.868.023,14	-1.868.023,14	-1.868.023,14
1	109.356,81	106.950,43	95.968,50
2	140.773,60	134.646,35	108.414,38
3	174.400,56	163.139,04	117.868,14
4	210.465,12	192.542,62	124.827,86
5	249.218,12	222.978,52	129.716,10
6	290.936,20	254.576,24	132.890,78
7	335.924,46	287.473,89	134.654,72
8	384.519,40	321.819,03	135.263,64
9	437.092,15	357.769,37	134.933,15
10	494.052,04	395.493,66	133.844,71
11	555.850,48	435.172,56	132.150,66
12	613.047,50	469.390,53	127.905,24
13	676.130,09	506.299,09	123.796,20
14	745.703,87	546.109,79	119.819,17
15	822.436,80	589.050,85	115.969,90
Valor Presente Líquido		**3.115.388,83**	**0,00**
Índice de rentabilidade (10 anos)		**30%**	
Índice de rentabilidade (15 anos)		**167%**	

Tabela 15: Cálculo dos indicadores financeiros do cenário 1 (Autor).

Observa-se que a taxa interna de retorno (TIR) dessa usina foi de 13,95%, ou seja, menor que a taxa mínima de atratividade (TMA), que foi estabelecida como 15%. Dessa forma, o cenário 1 também não foi atrativo economicamente, já que há um custo de oportunidade ao deixar de aplicar o mesmo dinheiro em outros investimentos que podem apresentar maior rentabilidade.

Por outro lado, mesmo inicialmente não superando a TMA, há a possibilidade de aumentar essa TIR ao reduzir custos com a isenção de ICMS e outros impostos em Minas Gerais, obter subsídios, financiamentos com menores taxas de juros e negociar créditos de descarbonização. Além disso, o retorno do investimento inicial ocorreria em 7,66 anos. Após 10 anos, haveria uma rentabilidade de 30% e, após 15 anos, 167%. Essa usina também apresenta alta viabilidade ambiental, já que possibilita o reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos; reduz emissões de carbono; diversifica a matriz energética; aumenta a vida útil de aterros sanitários; reduz a contaminação de solos e recursos hídricos, a proliferação de vetores e odores e pode impulsionar a coleta seletiva municipal dos resíduos orgânicos.

Por fim, destaca-se também o ganho social, ao promover novos empregos e ao aumentar a disponibilidade local de energia no município. Para exemplificar este impacto energético da usina de biogás, estimou-se a população brasileira em 218.859.514 habitantes (IBGE, 2021) e o consumo de energia elétrica residencial de 142.781 GWh (EPE, 2020), ou seja, calcula-se um consumo de 0,64 MWh por habitante por ano. Dessa forma, sabendo que seriam gerados 2.971,22 MWh/ano, a usina teria o potencial de fornecer energia elétrica para 4642 habitantes ou 6,2% da população de Ouro Preto - MG, ou seja, supriria a demanda energética de qualquer distrito de Ouro Preto - MG, com exceção à Cachoeira do Campo.

4.2. Cenários 3 e 4

Nos cenários 3 e 4 visou-se avaliar a influência da venda de créditos de descarbonização (CBIO) na viabilidade da utilização da Lagoa Anaeróbia (cenário 3) e do CSTR (cenário 4). Para isso, todos os dados anteriores (cenários 1 e 2) foram mantidos e a receita da venda dos CBIOs foi adicionada.

	Lagoa (US$/ano)	CSTR (US$/ano)
CAPEX	1.868.023,14	2.761.716,66
OPEX	325.694,50	763.343,38
Receitas/poupança (sem CBIO)	514.955,22	598.590,44

Tabela 16: Resumo do CAPEX, OPEX e receitas dos cenários 1 e 2 (Autor).

A intensidade de carbono (gCO_2equivalente/MJbiometano) de ambas as tecnologias foi calculada pela ferramenta "RenovaCalc_Biometano_Aberta (v.7)" (BRASIL, 2021), no âmbito do RenovaBio. Como já destacado, essa intensidade é subtraída da intensidade de carbono de referência (86,70 gCO_2eq/MJ). A partir dessa subtração foi obtida a nota de eficiência energética-ambiental, que multiplicada pelo potencial global de geração energética, resultou na mitigação de CO_2 equivalente emitido por ano. A Tabela 17 demonstra a intensidade de carbono para a lagoa e para o CSTR, bem como a nota de eficiência, potencial global de geração de energia, redução das emissões de CO_2 e o ganho econômico obtido pela comercialização dos CBIOs.

	Potencial global de geração energética (MJ/ano)	Intensidade de carbono (gCO2eq/MJ)	Nota de Eficiência (gCO2eq/MJ)	Redução de emissões de CO_2 (tonCO2/ano)	Receita com a venda de CBIOs (US$/ano)
Lagoa anaeróbia	33.246.855,40	3,56	83,14	2.764,14	21.256,26
CSTR	40.635.001,80	3,63	83,07	3.375,55	25.957,98

Tabela 17: Receita com a venda de CBIOS para a lagoa e CSTR (Autor).

Nota-se que tanto a lagoa quanto o CSTR apresentaram aproximadamente 96% de redução nas emissões de CO_2 quando comparados à intensidade de carbono de referência. Aliado a isso, as receitas anuais dos cenários 3 (lagoa) e 4 (CSTR) aumentaram para US$ 536.211,48 e US$ 624.548,42, respectivamente.

É importante ressaltar que a metodologia adotada pelo Renovabio não considera a utilização de biodigestores e leva em conta apenas a redução de emissões de CO_2 ao substituir um combustível fóssil por um renovável. No entanto, o *Biogas Tool* estima essa mitigação considerando também a quantidade de gases que não são emitidos ao não dispor a FORSU em aterros sanitários. Esse cálculo permite analisar o real impacto ambiental da usina, e, apesar de não ser o foco deste estudo, também seria possível negociar créditos de carbono emitidos através de outros programas como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), criado pelo protocolo de Kyoto. Neste sentido, a Tabela 18 apresenta a estimativa das reduções nas emissões de CO_2 calculadas pelo *Biogas Tool*.

	Redução ao não dispor FORSU em aterros ($tonCO_2$/ano)	Redução ao gerar energia limpa ($tonCO_2$/ano)	Total ($tonCO_2$/ano)
Lagoa anaeróbia	31.116,8	1.729,3	32.845,3
CSTR	38.031,6	2.113,5	40.145,2

Tabela 18: Redução da emissão de CO_2 estimada pelo *Biogas Tool* (Autor).

Considerando a negociação de CBIOs no âmbito do Renovabio, nota-se que os custos operacionais do cenário 4 continuaram maiores que as receitas. Dessa forma, o cenário 4 não foi viável e as análises econômicas complementares foram realizadas apenas para o cenário 3, utilizando a lagoa anaeróbia.

Para realizar a análise econômica do cenário 3, foram adicionadas à avaliação: a inflação, rendimento da poupança, juros sobre empréstimo bancário e anos em que o financiamento é

pago. Nesse sentido, a Tabela 19 apresenta a análise financeira da lagoa anaeróbia e a Tabela 20 demonstra o cálculo dos indicadores relacionados à essa análise.

Poupança vs. Juros do financiamento							
Ano	Receitas/ Poupança (US$)	OPEX (US$)	Juros bancários (US$)	Saldo anual (US$)	Saldo acumulado (US$)	CAPEX (US$)	Saldo do financiamento (US$)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.868.023,14	1.868.023,14
1	591.387,65	359.208,47	99.378,83	132.800,35	132.800,35	0,00	1.681.220,83
2	652.241,44	396.171,02	89.440,95	166.629,47	302.417,82	0,00	1.494.418,51
3	719.357,08	436.937,02	79.503,06	202.917,00	512.139,22	0,00	1.307.616,20
4	793.378,92	481.897,84	69.565,18	241.915,91	765.578,26	0,00	1.120.813,89
5	875.017,62	531.485,12	59.627,30	283.905,19	1.066.708,97	0,00	934.011,57
6	965.056,93	586.174,94	49.689,42	329.192,57	1.419.902,49	0,00	747.209,26
7	1.064.361,29	646.492,34	39.751,53	378.117,41	1.829.967,70	0,00	560.406,94
8	1.173.884,06	713.016,41	29.813,65	431.054,01	2.302.195,98	0,00	373.604,63
9	1.294.676,73	786.385,80	19.875,77	488.415,17	2.842.410,56	0,00	186.802,31
10	1.427.898,97	867.304,89	9.937,88	550.656,19	3.457.020,99	0,00	0,00
11	1.574.829,77	956.550,57	0,00	618.279,20	4.153.083,16	0,00	0,00
12	1.736.879,76	1.054.979,62	0,00	681.900,13	4.928.427,67	0,00	0,00
13	1.915.604,68	1.163.537,02	0,00	752.067,66	5.791.384,95	0,00	0,00
14	2.112.720,40	1.283.264,98	0,00	829.455,42	6.751.146,53	0,00	0,00
15	2.330.119,33	1.415.312,95	0,00	914.806,38	7.817.853,71	0,00	0,00
Tempo em que se recupera o investimento						**7,08**	**anos**
Iteração da taxa i					**0,1576**		

Tabela 19: Análise financeira do cenário 3 (Autor).

Ano	Fluxo de caixa (-Capex + poupança -OPEX) (US$)	VPL (Taxa i) (US$)	VPL (TIR) (US$)
0	-1.868.023,14	-1.868.023,14	-1.868.023,14
1	132.800,35	129.878,09	144.720,56
2	166.629,47	159.376,83	124.347,16
3	202.917,00	189.814,10	130.811,08
4	241.915,91	221.315,16	134.720,16
5	183.905,19	254.013,47	136.578,87
6	329.192,57	288.051,49	136.805,09
7	378.117,41	323.581,33	135.744,09
8	431.054,01	360.765,63	133.680,48
9	488.415,17	399.778,37	130.848,12
10	550.656,19	440.805,86	127.438,57
11	618.279,20	484.047,69	123.608,14
12	681.900,13	522.108,76	117.767,44
13	752.067,66	563.162,59	112.202,73
14	829.455,42	607.444,52	106.900,95
15	914.806,38	655.208,37	101.849,70
Valor Presente Líquido		**3.731.329,11**	**0,00**
Índice de rentabilidade (10 anos)		**48%**	
Índice de rentabilidade (15 anos)		**200%**	

Tabela 20: Cálculo dos indicadores financeiros do cenário 3 (Autor).

Para o cenário 3, utilizando a lagoa anaeróbia para tratar a FORSU de Ouro Preto e comercializando CBIOs, obteve-se uma TIR de 15,76%, ou seja, o projeto foi considerado como economicamente viável, já que a TIR foi maior que a TMA de 15%. Além disso, o projeto apresentou rentabilidades de 48% em 10 anos e 200% em 15 anos. Ao comparar os cenários 1 e 3, observa-se que a venda de CBIOs tornou o projeto viável, demonstrando a importância desse incentivo econômico na implantação de projetos que visam reduzir emissões de carbono e que estão alinhados ao desenvolvimento sustentável.

Assim como o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) foi um marco para o desenvolvimento econômico e social brasileiro, aumentando a participação do etanol e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (CORTEZ, 2018), novos incentivos, como os créditos de descarbonização, são fundamentais para uma transição energética com maior utilização de biocombustíveis como o biogás.

4.3. Cenários 5 e 6

Nos cenários 5 e 6 foram avaliadas as tecnologias de lagoa anaeróbia e CSTR, respectivamente, para o tratamento da FORSU e geração de biogás em um possível consórcio entre Ouro Preto, Mariana e Itabirito. Nesse sentido, o CAPEX e o OPEX foram novamente calculados e estão apresentados nas Tabelas 21, 22 e 23.

Processo	Incluso	Capacidade				Custo (US$)
Trituração	Obra civil e mecânica.	2.846,3	Kg/h	-	-	32.445,81
Neutralização	Obra civil e mecânica.	5,7	m^3	2,9	m^3/h	11.550,09
Lagoa anaeróbia	Escavação, revestimento, geomembrana e coberta para recolher o biogás.	6.086,5	m^3	89,1	Dias	543.642,28
Armazenamento do biogás (Gas holder)	Capas externas e internas, membrana e placa de interface hermética e conexões.	1.000,0	m^3	2,0	Horas	150.313,00
Queimador de biogás	Sistema de alívio de pressão com supressor de chamas, válvulas de retenção e armadilha de condensado.	351,2	m^3/h	-	-	256.699,88
Dessulfurização (Filtro biológico)	Obra civil e mecânica.	8,1	kg_2HS /dia	-	-	284.623,29
Lagoa de sedimentação	Escavação, revestimento, geomembrana e coberta para coleta de biogás.	136,6	m^3	2,0	Dias	53.268,19
Centrífuga de lodo	Bomba de purga anaeróbia, recipiente de lodo e compressor de ar.	25,7	m^3/h	-	-	533.316,28
CHP de combustão interna	Obra civil e mecânica.	798,9	kWatt	7.697.787,7	kW-h/y	1.708.217,90
Engenharia	Elaboração e gestão de projetos	-	-	-	-	142.963,07
Serviço	Iniciar os serviços	-	-	-	-	15.420,20
Terreno	Custo para aquisição do terreno	1.460,8	m^2	-	-	20.436,17
	SUBTOTAL					**3.752.896,16**

Tabela 21: Equipamentos e custos relacionados ao cenário 5 (Autor).

Processo	Incluso	Capacidade				Custo (US$)
Trituração	Obra civil e mecânica.	2.846,3	Kg/h	-	-	32.445,81
Neutralização	Obra civil e mecânica.	5,7	m^3	2,9	m^3/h	11.550,09
CSTR	Obra civil, mecânica e elétrica, instrumentação e controle, assim como equipes.	2.536,1	m^3	37,1	Dias	1.637.285,49
Caldeira	Obra civil e mecânica.	4,4	BHP	-	-	51.802,16
Trocador de calor	Obra civil e mecânica.	43,5	kW	-	-	28.031,16
Armazenamento do biogás (Gas holder)	Capas externas e internas, membrana e placa de interface hermética e conexões.	1.000,0	m^3	2,0	Horas	150.313,00
Queimador de biogás	Sistema de alívio de pressão com supressor de chamas, válvulas de retenção e armadilha de condensado.	429,2	m^3/h	-	-	284.055,01
Dessulfurização (Filtro biológico)	Obra civil e mecânica.	9,6	kg_2HS /dia	-	-	287.514,79
Centrífuga de lodo	Bomba de purga anaeróbia, recipiente de lodo e compressor de ar.	17,1	m^3/h	-	-	438.705,77
CHP de combustão interna	Obra civil e mecânica.	976,4	kWatt	9.026.926,2	kW-h/y	2.137.996,84
Engenharia	Elaboração e gestão de projetos	-	-	-	-	354.179,01
Serviço	Iniciar os serviços	-	-	-	-	15.420,20
Terreno	Custo para aquisição do terreno	750,7	m^2	-	-	10.501,87
	SUBTOTAL					**5.439.801,19**

Tabela 22: Equipamentos e custos relacionados ao cenário 6 (Autor).

Conceito	Lagoa Anaeróbia (Cenário 5)		CSTR (Cenário 6)	
	Quantidade	Custo (US$/ano)	Quantidade	Custo (US$/ano)
Mão de obra	-	24.991,47	-	47.105,40
Telefone	-	9.000,00	-	9.000,00
Limpeza	-	1.200,00	-	1.200,00
Segurança	-	900,00	-	900,00
Veículos	-	2.400,00	-	2.400,00
Edifícios	-	1340,28	-	1.290,24
Estruturas e tanques de concreto	-	10.722,24	-	10.321,80
Estruturas e tanques de aço	-	5.941,92	-	6.198,12
Oleodutos	-	1.018,56	-	1.062,48
Equipe elétrica	-	4.288,92	-	7.589,52
Equipe eletromecânica	-	28.592,64	-	49.332,12
Laboratório certificado	-	900,00	-	900,00
Planta de reativos e materiais de laboratório	-	1.200,00	-	1.200,00
Bicarbonato de sódio	608,1 kg/mês	10.362,00	608,1 kg/mês	10.362,00
Coagulante	23.766,5 kg/mês	333.682,32	54.725,6 kg/mês	768.347,40
Transporte de resíduos	973,8 m^3/mês	19.766,28	2.242,4 m^3/mês	45.514,44
Disposição de resíduos	1.033,1 ton/mês	150.123,48	2.378,7 ton/mês	345.679,08
Energia elétrica	16.544,4 kWh/mês	22.354,80	114.481,7 kWh/mês	154.687,68
Filtro de biológico	-	23.054,11	-	23.355,75
SUBTOTAL	**-**	**651.838,98**	**-**	**1.486.446,08**

Tabela 23: Custos operacionais dos cenários 5 e 6 (Autor).

Ao estabelecer um consórcio nos cenários 5 e 6 notou-se um aumento de 116% na disponibilidade de FORSU quando comparados aos cenários anteriores. Por outro lado, o CAPEX e o OPEX do cenário 5 em relação ao 1 e do cenário 6 em relação ao 2 aumentaram em aproximadamente 100%. Isso demonstra que a quantidade de FORSU tratada cresce a uma taxa maior que o investimento inicial e que os custos operacionais, o que, apesar de depender de diversos outros fatores, pode indicar que projetos maiores tendem a apresentar menores custos proporcionais.

Mais uma vez, os investimentos iniciais e os custos de operação do CSTR foram significativamente maiores quando comparados à lagoa anaeróbia. Apesar do CSTR não

apresentar viabilidade econômica nos cenários estudados, a utilização desses reatores pode ser interessante em outras situações, como ao utilizar diferentes resíduos com menores teores de sólidos, maiores escalas de projeto, bem como quando a obtenção de grandes áreas, com aptidão geotécnica e com baixos custos, para a instalação de lagoas anaeróbias for um empecilho.

Prosseguindo com a análise de viabilidade, foram analisadas as receitas e poupanças para os cenários 5 e 6 (Tabela 24).

Receita/poupança	5- Lagoa (US$/ano)	6- CSTR (US$/ano)
Crédito de energia elétrica	722.309,08	882.822,21
Poupança com a geração de calor	90.243,24	110.297,30
Poupança com o transporte	42.387,12	42.387,12
Poupança com a disposição em aterros	204.704,86	204.704,86
Venda do digestato (uréia equivalente)	52.136,32	52.136,32
SUBTOTAL	**1.111.780,62**	**1.292.347,80**

Tabela 24: Receitas e poupanças dos cenários 5 e 6 (Autor).

Observa-se que, mesmo com a formação de um consórcio para aumentar a disponibilidade de FORSU, as receitas do biodigestor CSTR continuaram não superando os gastos operacionais, ou seja, o cenário 6 não foi viável economicamente. Por esse motivo, prosseguiu-se apenas com a análise do cenário 5.

Para finalizar a análise financeira, adicionou-se a inflação, rendimento da poupança, juros sobre empréstimo bancário e anos em que o financiamento é pago. Nesse sentido, a Tabela 25 apresenta a análise financeira da lagoa anaeróbia e a Tabela 26 apresenta o cálculo dos indicadores relacionados à essa análise.

Poupança vs. Juros do financiamento							
Ano	Receitas/ Poupança (US$)	OPEX (US$)	Juros bancários (US$)	Saldo anual (US$)	Saldo acumulado (US$)	CAPEX (US$)	Saldo do financiamento (US$)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3.752.896,16	3.752.896,16
1	1.226.182,84	718.913,21	199.654,08	307.615,56	307.615,56	0,00	3377606,54
2	1.352.357,06	792.889,38	179.688,67	379.779,01	694.315,92	0,00	3.002.316,93
3	1.491.514,60	874.477,69	159.723,26	457.313,64	1.167.251,67	0,00	2.627.027,31
4	1.644.991,45	964.461,45	139.757,85	540.772,15	1.734.286,99	0,00	2.251.737,70
5	1.814.261,07	1.063.704,53	119.792,45	630.764,09	2.404.072,54	0,00	1.876.448,08
6	2.000.948,53	1.173.159,73	99.827,04	727.961,77	3.186.125,94	0,00	1.501.158,46
7	2.206.846,14	1.293.877,86	79.861,63	833.106,65	4.090.920,42	0,00	1.125.868,85
8	2.433.930,61	1.427.017,90	59.896,22	947.016,49	5.129.982,62	0,00	750.579,23
9	2.684.382,07	1.573.858,04	39.930,82	1.070.593,21	6.316.000,44	0,00	375.289,62
10	2.960.604,98	1.735.808,03	19.965,41	1.204.831,54	7.662.941,99	0,00	0,00
11	3.265.251,23	1.914.422,67	0,00	1.350.828,56	9.186.186,75	0,00	0,00
12	3.601.245,58	2.111.416,77	0,00	1.489.828,82	10.882.704,76	0,00	0,00
13	3.971.813,76	2.328.681,55	0,00	1.643.132,20	12.770.697,82	0,00	0,00
14	4.380.513,39	2.568.302,89	0,00	1.812.210,51	14.870.249,03	0,00	0,00
15	4.831.268,22	2.832.581,25	0,00	1.998.686,97	17.203.516,60	0,00	0,00
Tempo em que se recupera o investimento						**6,63**	**Anos**
Iteração da taxa interna					**0,1726**		

Tabela 25: Análise financeira do cenário 5 (Autor).

Ano	Fluxo de caixa (-Capex + poupança -OPEX) (US$)	VPL (Taxa i) (US$)	VPL (TIR) (US$)
0	-3.752.896,16	-3.752.896,16	-3.752.896,16
1	307.615,56	300.846,51	262.341,91
2	379.779,01	363.248,92	276.216,57
3	457.313,64	427.783,68	283.656,22
4	540.772,15	494.721,80	286.056,52
5	630.764,09	564.352,40	284.553,47
6	727.961,77	636.984,22	280.068,90
7	833.106,65	712.947,22	273.348,25
8	947.016,49	792.594,41	264.991,91
9	1.070.593,21	876.303,68	255.481,20
10	1.204.831,54	964.479,86	245.199,84
11	1.350.828,56	1.057.556,92	234.451,74
12	1.489.828,82	1.140.713,47	220.520,51
13	1.643.132,20	1.230.408,69	207.417,08
14	1.812.210,51	1.327.156,72	195.092,26
15	1.998.686,97	1.431.512,12	183.499,78
Valor Presente Líquido		**8.568.714,47**	**0,00**
Índice de rentabilidade (10 anos)		**63%**	
Índice de rentabilidade (15 anos)		**228%**	

Tabela 26: Cálculo dos indicadores financeiros do cenário 5 (Autor).

A taxa interna de retorno (TIR) dessa usina foi de 17,26%, ou seja, maior que a taxa mínima de atratividade (TMA) de 15%. Aliado a isso, em termos econômicos, o cenário 5 foi o mais atrativo deste estudo. Apesar de não ter sido tópico desta pesquisa, a venda de créditos de carbono somada ao cenário 5 seria uma situação ainda mais atrativa economicamente.

Ainda em relação a análise econômica, verifica-se que haveria uma rentabilidade de 63% após 10 anos e 228% após 15 anos. O retorno do investimento inicial ocorreria em 6,63 anos. Além da viabilidade econômica, esse projeto apresenta um alto apelo ambiental, reduzindo diversos impactos já citados, bem como atendendo às recomendações das legislações relacionadas ao saneamento no Brasil. Neste contexto, destaca-se que o cenário 5 teria prioridade para o acesso de recursos da união, já que se trata de uma solução consorciada intermunicipal para a gestão de resíduos sólidos, a qual é incentivada pela PNRS (BRASIL, 2010).

É importante ressaltar que, apesar dessa regionalização ser incentivada pela PNRS e pelo marco do saneamento e essa solução inicialmente apresentar uma viabilidade ambiental,

para cada projeto pode ser necessário um estudo dos impactos ambientais, incluindo uma análise das distâncias, impactos do ganho de escala na viabilidade e emissões de carbono, de forma que os impactos negativos da regionalização e do transporte desses resíduos não sejam superiores aos impactos positivos da usina.

Por fim, a usina de biogás de FORSU apresenta também um significativo impacto social, já que promoveria novos empregos e aumentaria a disponibilidade local de energia. Como forma de estimar esse impacto energético estimou-se novamente um consumo de 0,64 MWh por habitante por ano. Dessa forma, sabendo que seriam gerados 6.414,82 MWh/ano, a usina teria o potencial de fornecer energia elétrica para 10.023 habitantes, ou 13,4% da população de Ouro Preto - MG, o que poderia suprir a demanda energética de qualquer um dos distritos do Município.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foi avaliada economicamente a geração e aproveitamento do biogás resultante da digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) em Ouro Preto – MG sob diferentes cenários. Os cenários com números ímpares (1,3 e 5) consideraram a utilização da lagoa anaeróbia, enquanto os números pares (2,4 e 6) representaram a utilização dos digestores CSTR.

Os cenários 2, 4 e 6, com a utilização dos digestores CSTR, foram considerados inviáveis para as condições estudadas, já que o investimento e os custos de operação foram significativamente maiores que as receitas obtidas. Isso ocorre porque os biodigestores CSTR, apesar da maior geração de biogás, necessitam de mão de obra mais especializada, geram mais lodos e consomem mais energia elétrica do que as lagoas anaeróbias.

Ao analisar a utilização da lagoa anaeróbia, observou-se que o cenário 1 também não foi viável, pois apresentou uma taxa interna de retorno (TIR) de 13,95%, menor que a taxa mínima de atratividade (TMA), fixada em 15%. Já no cenário 3, ao adicionar a comercialização de créditos de descarbonização (CBIOs) no âmbito do Renovabio, a TIR aumentou para 15,76%, confirmando a importância desse incentivo econômico na viabilidade de projetos que tratem resíduos orgânicos e reduzam as emissões de carbono. Por fim, o cenário 5, considerando o tratamento da FORSU em um consórcio entre Ouro Preto, Mariana e Itabirito, apresentou uma TIR de 17,26%. É importante citar que soluções consorciadas são incentivadas pelas legislações de saneamento brasileiras, tendo prioridade no acesso de recursos da união. Apesar de não ter sido tópico desta pesquisa, a venda de CBIOs somada ao cenário de consórcio poderia ser uma situação ainda mais atrativa economicamente.

Por fim, é importante destacar que os cenários com a utilização da lagoa também apresentaram viabilidade ambiental, pois reaproveitam a FORSU; reduzem emissões de carbono; diversificam a matriz energética; aumentam a vida útil de aterros sanitários; reduzem a contaminação de solos e recursos hídricos, a proliferação de vetores e odores e podem impulsionar a coleta seletiva municipal dos resíduos orgânicos. Além disso, também haveria

um ganho social ao promover novos empregos e ao fornecer energia elétrica para algo em torno de 4642 habitantes nos cenários 1 e 3 e 10.023 habitantes no cenário 5.

6. RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Caracterizar, realizar testes de potencial bioquímico de metano (BMP) para a FORSU gerada no município de Ouro Preto – MG e utilizar os dados encontrados para uma avaliação econômica no *Biogas Tool*.

Realizar uma análise técnica, ambiental e econômica de áreas susceptíveis para a instalação de uma usina de biogás em Ouro Preto.

Analisar um cenário com a formação de consórcio aliada a venda de créditos de descarbonização e outros incentivos econômicos.

Realizar uma análise de sensibilidade econômica alterando parâmetros como: os custos com transporte; a quantidade de FORSU tratada; os preços da energia elétrica, CBIOs e insumos necessários e as taxas de juros e inflação consideradas.

Elaborar uma planilha de avaliação econômica para a geração de biogás considerando o cenário brasileiro.

Realizar uma avaliação econômica da utilização da FORSU para a compostagem e comparar as taxas internas de retorno, os benefícios ambientais e sociais gerados, com o objetivo de comparar as duas tecnologias de tratamento de resíduos (digestão anaeróbia e compostagem).

7. REFERÊNCIAS

ABIOGÁS - Associação Brasileira do Biogás. **O potencial brasileiro de biogás**. 2020. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2020/11/NOTA-TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf>.

ABRELPE - Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos no Brasil 2020.** São Paulo, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>.

AMARAL, A. C. DO. **Digestão anaeróbia de dejeto suíno: potencial bioquímico de metano e a influência de estratégias operacionais**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

ANDRICH, E. G.; CRUZ, J. A. W.; ANDRICH, R. G.; GUINDANI, R. A. **Finanças corporativas: análise dos demonstrativos contábeis e de investimentos.** 1º ed. Curitiba: Intersaberes, 2014.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482/2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 22 set. 2021.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifas**. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/dados/tarifas>. Acesso em: 23 abr. 2021.

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução nº 8 de 30 de janeiro de 2015**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-8-de-30-de-janeiro-de-2015-32367532>. Acesso em: 26 out. 2021.

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Sistema de levantamento de preços.** 2021. Disponível em: <https://preco.anp.gov.br/>. Acesso em: 26 out. 2021.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. ***bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis.*** *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.

ASUE. ***BHKW-Kenndaten.*** *Energiereferat der Stadt Frankfurt Referat* 79A.2, 2001.

B3 - Brasil, Bolsa, Balcão. **Serviços de natureza informacional**. 2021. Disponível em: <http://www.b3.com.br/pt_br/produtos-e-servicos/outros-servicos/servicos-de-natureza-informacional/credito-de-descarbonizacao-cbio/>. Acesso em: 7 maio. 2021.

BACHMANN, S.; UPTMOOR, R.; EICHLER-LÖBERMANN, B. ***Phosphorus distribution and availability in untreated and mechanically separated biogas digestates.*** *Scientia Agricola*, v. 73, n. 1, p. 9–17, 2016.

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotação Dólar EUA**. 2021. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/>. Acesso em: 23 abr. 2021.

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Remuneração dos depósitos de poupança**. 2021. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/sgspub/consultarvalores/consultarValoresSeries.do?method=consultarValores>. Acesso em: 26 out. 2021.

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL; IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **INPC - Índice Nacional de Preço ao Consumidor**. 2021. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/sgspub/consultarvalores/telaCvsSelecionarSeries.paint>. Acesso em: 26 out. 2021.

BMELV - Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5º ed. Alemanha: Gülzow, 2010.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **TJLP - Taxa de juros de longo prazo**. 2021. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/taxa-juros-longo-prazo-tjlp?1dmy&urile=wcm%3Apath%3A%2Fbndes_institucional%2Fhome%2Ffinanciamentos%2Fguia-financiamento%2Fcustos-financeiros%2Ftlp-taxa-de-longo-prazo>. Acesso em: 26 out. 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.305/2010: Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 3 mar. 2021.

BRASIL - Ministério do Desenvolvimento Regional. **Probiogás**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/probiogas-1>. Acesso em: 3 mar. 2021a.

BRASIL. **Lei nº 14.026/2020: Marco do Saneamento**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm>. Acesso em: 8 mar. 2021b.

BRASIL. **RenovaBio - Planilha RenovaCalc versão 7.0**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovacalc>. Acesso em: 8 mar. 2021.

CARVALHO, R. Q.; TAVARES, A. N.; SANTOS, G. V.; BAJAY, S. V. **Oportunidades Enterradas**. 1º ed. Vitória: Edufes, 2019.

CASSINI, S. T. **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás.** Vitória: Rede cooperativa de pesquisas, 2003.

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Nota Técnica VII - Geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos e rurais**, 2001.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis. **Fundamentos do biogás.** Foz do Iguaçu, 2020.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis. **Panorama do biogás no Brasil 2020.** Foz do Iguaçu, 2021.

COBO, M. J.; LÓPEZ-HERRERA, A. G.; HERRERA-VIEDMA, E.; HERRERA, F. ***Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools***. Journal of the American Society for Information Science and Technology, v. 62, n. 14, p. 1382–1402, 2011.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C.

Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. An. 6. Encontro de Energia no Meio Rural, 2006.

CORTEZ, L. A. B. **Proálcool 40 anos: universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 2018.

DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH. ***Biogas Tool* - Guia do usuário**. 2019. Disponível em: <https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/Publications_reports_papers/user_guide_biogas_tool_eng.pdf>.

DANISH ENERGY AGENCY; EA ENERGY ANALYSES; IB TECH. ***Biogas Tool* - *Spreadsheet*.** 2018.

DRZ GESTÃO AMBIENTAL. **Plano Municipal de Saneamento Básico - Ouro Preto**. 2013. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixevivo.org.br/arquivos/images/subcomites/planosmunicipais/PMSB/Ouro_Preto/8_Relatorio_Final_do_PMSB_OP_Documento_Sintese.pdf>

DRZ GESTÃO AMBIENTAL. **Plano Municipal de Saneamento Básico - Itabirito**. 2014. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixevivo.org.br/files/images/2014/cbhvelhas/PMSB/8 - Relatorio Final do PMSB - Documento Sintese.pdf>

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Infoclima**. 2021. Disponível em: <https://www.cnpaf.embrapa.br/infoclima/>. Acesso em: 23 abr. 2021.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; SBERA - Sociedade Brasileira dos Especialistas em Resíduos das Produções Agropecuária e Agroindustrial. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: [s.n.], 2019.

Engineering ToolBox. **Air - Altitude, Density and Specific Volume**. 2003. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-density-volume-d_195.html>. Acesso

em: 23 abr. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Economicidade e competitividade no aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 2014.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica 2020**. Rio de Janeiro, 2020.

ESCOSTEGUY, P. A. V.; GATIBONI, L. C.; NICOLOSO, R. da S.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. S. da; BLEY, H. **Calagem e adubação e a qualidade ambiental.** In: MANUAL de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, p. 331-342, 2016.

FRANCO, E. F.; HIRAMA, K.; CARVALHO, M. M. ***Applying system dynamics approach in software and information system projects: A mapping study***. *Information and Software Technology*, v. 93, p. 58–73, 2018.

FUNDAÇÃO GORCEIX. **Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Consórcio Intermunicipal Multissetorial do Vale do Piranga (PIGIRS/CIMVALPI)**. 2020. Disponível em: <http://cimvalpi.mg.gov.br/phocadownload/pirigs/p8-proposicao-de-modelo-para-o-sistema-intermunicipal-de-gestao-consorciada.pdf>.

GITMAN, L. J. **Princípios da administração financeira.** São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2012.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. ***Renewable energy: traditional biomass vs. modern biomass.*** *Energy Policy*, v. 32, n. 6, p. 711–714, 2004.

GOMES, F. C. DE S. P. **Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: estado da arte e análise crítica das principais tecnologias.** 93 f. Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental (Dissertação) – Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

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

GONÇALVES FERREIRA, R. **Impactos ambientais decorrentes do lixão da cidade de Condado-Pb**. Geografia Ensino & Pesquisa, v. 21, n. 3, p. 142, 2017.

GOOGLE MAPS. ***Google Maps***. Disponível em: <https://www.google.com/maps/dir/Centro,+Ouro+Preto+-+MG/Av.+Américo+Renê+Gianetti+-+Ouro+Preto,+MG,+35400-000/@-20.3993115,-43.5302245,5591m/data=!3m1!1e3!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0xa40adfd7367b9f:0xe62029e8c20b8c7d!2m2!1d-43.5027082!2d-20.3868828!1m5!1m1!1s0x>. Acesso em: 26 out. 2021.

GUIDUCCI, R. DO C. N.; FILHO, J. R. DE L.; MOTA, M. M. **Viabilidade econômica de sistemas de produção agropecuários**. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <https://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00053210.pdf>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biblioteca**. 2021. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=31572&view=detalhes#:~:text=Em divisãoterritorial datada de 2007%2C o município é constituído,do Salto e São Bartolomeu.>. Acesso em: 18 mar. 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades: Ouro Preto**. 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/ouro-preto/panorama>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeção da população**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em: 16 nov. 2021.

IEA - INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Preços médios mensais pagos pela agricultura**. 2021. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea_Teste/pagos2.aspx?cod_sis=5>. Acesso em: 26 out. 2021.

ITABIRITO. **Descubra Itabirito**. 2021. Disponível em: <https://www.itabirito.mg.gov.br/descubra-itabirito/dados-geograficos>. Acesso em: 30 set. 2021.

JACOBOWSKI, M; RAMOS, M. J.; PIACENTI, C. A.; JÚNIOR, W. F. R.; SILVA, C. L. **Viabilidade econômica da cogeração de energia elétrica do biogás: um estudo de caso no aterro sanitário de Toleto, Paraná**. Toledo. v. 7, n. 3, 2020.

KELLEHER, M. ***Anaerobic digestion outlook for MSW streams.*** *BioCycle*, v. 48, n. 8, p. 51–55, 2007.

LAPPONI, J. C. **Projetos de investimento na empresa.** p. 487, 2007.

MACEDO, J. J.; CORBARI, C. E. **Análise de projeto e orçamento empresarial.** Curitiba. Intersaberes, 2014.

MARIANA. **Estudo da Geração Per Capita, Peso Específico e Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Mariana – MG.** Prefeitura Municipal de Mariana - MG, 2015.

MARIANA. **Distritos de Mariana**. 2021. Disponível em: <https://www.mariana.mg.gov.br/todos-distritos>. Acesso em: 30 set. 2021.

MATSUURA, M. I. da S. F.; SEABRA, J. E. A.; CHAGAS, M. F.; SCACHETTI, M. T.; MORANDI, M. A. B.; MOREIRA, M. M. R.; NOVAES, R. M. L.; RAMOS, N. P.; CAVALETT, O.; BONOMI, A. **Renovacalc: A calculadora do programa RenovaBio.** Embrapa Meio Ambiente, 2018.

MENDES, S. R. M. P. **A análise de investimentos em novas tecnologias: a importância da utilização de diferentes métodos de avaliação**. Engenharia Industrial (Dissertação) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2017.

MERCADO LIVRE. **Soda caustica**. 2021. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1559995823-10kg-soda-caustica-99-hidroxido-de-sodio-nota-fiscal-

_JM?searchVariation=58066027447#searchVariation=58066027447&position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=867d89cd-0171-4543-acb8-39e9bd59d047>. Acesso em: 26 out. 2021a.

MERCADO LIVRE. **Sulfato de Alumínio**. 2021. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1595746148-sulfato-de-aluminio-10-kg-_JM#position=6&search_layout=stack&type=item&tracking_id=1fd9a30e-f6cf-4d60-9e3b-9ce8a4b0f63b>. Acesso em: 26 out. 2021b.

MERCADO LIVRE. **Limalha de Ferro**. 2021. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1755032768-limalha-de-ferro-1kg-_JM#position=7&search_layout=stack&type=item&tracking_id=bfec0b5f-0213-4be0-b6c5-985635995d7d>. Acesso em: 26 out. 2021c.

MINAS GERAIS. **Lei Estadual nº 20.824/2013**. Disponível em: <http://www.fazenda.mg.gov.br/empresas/legislacao_tributaria/leis/2013/l20824_2013.html#:~:text=Altera as Leis nºs,esportivos e dá outras providências.>. Acesso em: 22 set. 2021.

OURO PRETO. **Lei Municipal nº 1.069/2017: Planta Genérica dos Valores Imobiliários**. Disponível em: <https://ouropreto.mg.gov.br/static/arquivos/menus_areas/lei-1.069-2017-PGV.pdf?dc=1974>. Acesso em: 14 maio. 2021.

OURO PRETO. **Secretaria de Meio Ambiente.** (Informação verbal) - Prefeitura Municipal de Ouro Preto - MG, 2021.

PAIVA, B. **Estudo de viabilidade de sistemas de triagem e compostagem dos resíduos sólidos urbanos do município de Ouro Preto - MG.** Engenharia Ambiental (Monografia), Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

PEREIRA, A. L.; MAIA, K. M. P. A. **Contribuição da gestão de resíduos sólidos e educação ambiental na durabilidade de aterros sanitários Anderson.** Sinapse Múltipla, v. 1, n. 2, p. 68–80, 2012.

PIMENTA, J. T.; DIAS, L. C. P. **Caracterização do RSU da cidade de Ouro Petro**

visando sua possível utilização em coprocessamento. 10º Forum Internacional de Resíduos Sólidos. João Pessoa - PB, 2018.

RAUBER, M. E. **Apontamentos sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal 12.305, de 02/08/2010.** Revista Eletrônica Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, n. 4, p. 1–24, 2011.

REIS, A. DOS S. **Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos em Biodigestor Anaeróbio**. Engenharia Civil e Ambiental (Dissertação), Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2012.

RIBEIRO, N. D. S. **Estudo do potencial energético de biogás de aterros sanitários e da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos dos estados de São Paulo e Minas Gerais**. Engenharia de Energia (Dissertação), Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2020.

SALEK, J. M. **Um Estudo da legislação ambiental brasileira sobre resíduos sólidos urbanos.** Engenharia Civil: saneamneto ambiental (Dissertação), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

SAMANEZ, P. C. **Gestão de Investimentos e Geração de Valor.** São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2007.

SANTANA, H. C. **Precepção, motivações e barreiras dos moradores para participação em programas de coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares na microrregião de Ouro Preto (MG).** Engenharia Ambiental (Dissertação), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

SANTOS, R. B.; LIMA, A. K. DE C. **Análise comparativa do biogás: processo em biodigestores e de aterro sanitário.** Revista eletrônica de energia. v.6, n.1, p. 48–57, 2016.

SEVIMOĜLU, O.; TANSEL, B. ***Effect of persistent trace compounds in landfill gas on engine performance during energy recovery: A case study.*** *Waste Management*, v. 33, n. 1, p. 74–80, 2013.

SGANZERLA, E. **Biodigestor, uma solução**. [s.l.] Porto Alegre: Agropecuária, 1983.

SILVA, M. S. C. DA. **Análise da Política Nacional de Biocombustível (RenovaBio)**. 2021. Disponível em: <https://portal.idp.emnuvens.com.br/bee/article/view/5693/2288>

SILVA, L. R. DE M.; MATOS, E. T. A.; FISCILETTI, R. M. D. S. ***Solid residual yesterday and today: historical evolution of solid residuals in Brazilian environmental legislation***. AREL FAAR, Ariquemes, v. 5, n. 2, p. 126–142, 2017.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2019. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-residuos-solidos/diagnostico-do-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-2019>. Acesso em: 29 mar. 2021.

SOUZA, S. N. M. de. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural.** Cascável. Unioeste, 2016.

SUN, Q.; LI, H.; YAN, J.; LIU, L.; YU, Z.; YU, X. ***Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation.*** *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* v. 51, p. 521–532, 2015.

SUZUKI, A. B. P.; FERNANDES, D. M.; FARIA, R. A. P.; VIDAL, T. C. M. **Uso de biogás em motores de combustão interna.** Pesquisa Aplicata & Agrotecnologia, v. 4, n. 1, p. 221–237, 2011.

TRACTEBEL; FUNDAÇÃO RENOVA. **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.** Mariana - MG, 2019.

WALLACE, W. L.; WU, H.O.; WANG, Z.Y. ***Boosting the Market for the Commercialization of Industrial Scale Biogas Projects in China***, 2004.

WBA - *WORLD BIOENERGY ASSOCIATION*. ***Global Bioenergy Statistics***. Estocolmo, 2016.

WBA - *WORLD BIOENERGY ASSOCIATION*. ***Global Bioenergy Statistics***. Estocolmo,

2020.

WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. ***The Biogas Handbook: Science, Production and Applications***, p. 1–476, 2013.