



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PEDRO DE SOUSA LIRA FILHO**

**VIABILIDADE ECONÔMICA DO BIOGÁS PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE  
RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CONSÓRCIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE  
SOBRAL (CE)**

**FORTALEZA**

**2022**

PEDRO DE SOUSA LIRA FILHO

VIABILIDADE ECONÔMICA DO BIOGÁS PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE  
RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CONSÓRCIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE SOBRAL (CE)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.

Fortaleza

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- L745v Lira Filho, Pedro de Sousa.  
Viabilidade econômica do biogás proveniente do tratamento de resíduos orgânicos do consórcio da Região Metropolitana de Sobral (CE) / Pedro de Sousa Lira Filho. – 2022.  
91 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.
1. Análise técnico-econômica. 2. Resíduos sólidos urbanos. 3. Biometano. 4. Energia elétrica. 5. Valor presente líquido. I. Título.

CDD 628

---

PEDRO DE SOUSA LIRA FILHO

VIABILIDADE ECONÔMICA DO BIOGÁS PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE  
RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CONSÓRCIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE SOBRAL (CE)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: xx/xx/xxxx.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Raphael Tobias de Vasconcelos Barros  
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

A Deus.

Aos meus pais, Pedro e Célia.

À minha irmã, Danyelle.

Ao meu sobrinho, Pedro Neto.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado a oportunidade de realizar este mestrado, sempre cuidando e me sustentando durante a minha caminhada.

Ao meu pai Pedro, minha mãe Célia, minha irmã Danyelle e meu sobrinho Pedro Neto, por todo o amor transmitido e pelo suporte nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti pela sua excelente orientação e apoio. Por sempre me instigar a continuar.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota e Prof. Dr. Raphael Tobias Vasconcelos Barros pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

À Marisa por sua ajuda, pelas reuniões e disponibilidade. Muitíssimo obrigado!

Aos meus bons amigos que conheci durante o mestrado Fernanda, Johnathas, Debora e Eduardo (in memoriam). Amo vocês e obrigado pelos rolêzinhos.

À Debora por ajudar na minha pesquisa, sem sua ajuda eu não conseguiria ter terminado. Muitíssimo obrigado!

Ao meu melhor amigo Marcelo, por sempre me ouvir e me dar apoio.

À Livia, João Pedro, João Gabriel e todos com quem tive a oportunidade de trabalhar enquanto estive pelo NUTEC pelos bons momentos no laboratório.

Ao Luiz Marques do Consórcio de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral, pela ajuda e informações disponibilizadas.

Por fim, agradeço ao apoio da Capes e à instituição FUNCAP pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo” (Albert Einstein).

## RESUMO

A grande geração de resíduos é um dos problemas que sempre precisará ser enfrentado, pois um mau gerenciamento pode acabar causando sérios problemas ambientais. A busca por soluções técnicas para o tratamento dos resíduos sólidos se mostra essencial. A digestão anaeróbia é um dos métodos mais promissores para o tratamento dos resíduos orgânicos, pois além de dar um destino aos resíduos, produz o biogás, fonte de energia renovável. No entanto, para operar de forma efetiva, é necessário o alinhamento da esfera ambiental com a econômica. O objetivo desse estudo foi avaliar a viabilidade técnico-econômica do aproveitamento do biogás obtido a partir da biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos gerados pelos municípios pertencentes ao Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral (CGIRS-RMS), Ceará, em um horizonte de projeto de 10 anos. Para isso, foram considerados 3 cenários: venda de energia elétrica (cenário 1), venda de biogás para concessionária (cenário 2), aproveitamento de biogás como fonte de combustível veicular (cenário 3). Primeiramente foi realizado o cálculo do dimensionamento do biodigestor utilizado, juntamente com empresa projetista, a partir da estimativa de geração de resíduos orgânicos. Depois, foi feito o levantamento do preço dos equipamentos necessários para a construção da planta de biogás, bem como os custos e impostos envolvidos. A partir disso, para a análise econômica em si, foi delineado um demonstrativo de resultado de exercício (DRE) para o cálculo dos fluxos de caixa referentes aos anos de projeto e a análise dos indicadores econômicos: valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e tempo de payback, utilizando uma taxa de atratividade mínima (TMA) de 14% a.a. Para a análise dos resultados, foram adotados 4 casos para cada um dos cenários: análise econômica sem receitas adicionais (Caso 1), análise econômica considerando a receita da não disposição dos resíduos orgânicos no aterro sanitário (Caso 2), análise econômica considerando a receita da venda de créditos de carbono (Caso 3) e, por fim, a análise econômica considerando essas duas receitas adicionais (Caso 4). Para o Caso 1, o cenário 1 se mostrou inviável economicamente com um VPL negativo de R\$ 7.893.785,56, TIR de 6,5% e payback de 16,96 anos. Já os cenários 2 e 3 se mostraram viáveis economicamente, com valores de VPL positivos de R\$ 3.101.979,12 e R\$ 37.544.853,27, TIR de 17,3% e 49,1% respectivamente. Para o Caso 2 os cenários 1, 2 e 3 se mostraram viáveis economicamente, com valores positivos de VPL de R\$ 17.450.969,91, R\$ 28.446.734,60 e R\$ 62.889.608,75 respectivamente, TIR de 28%, 40,4% e 69,4% respectivamente e payback de 4,91 anos, 3,17 anos e 1,73 anos respectivamente. Para o Caso 3 o cenário 1 continuou inviável, com um VPL negativo de R\$ 3.057.957,05, TIR de 11,2% e payback de 12,38 anos. Já os cenários 2 e 3 se mostraram viáveis economicamente com VPL positivos de R\$ 7.937.807,64 e R\$ 42.380.681,79 respectivamente, TIR de 22,3% e 52,3% e payback



de 5,99 anos e 2,3 anos respectivamente. Para o Caso 4, todos os cenários foram viáveis economicamente.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos urbanos; Digestão anaeróbia; Viabilidade econômica; Biometano.

## ABSTRACT

The large generation of waste is one of the problems that will always need to be faced, because poor management can end up causing serious environmental problems. Therefore, the search for technical solutions for the treatment of solid waste is essential. Anaerobic digestion is one of the most promising methods for the treatment of organic waste, because in addition to giving a destination to waste, it produces biogas, a source of renewable energy. However, to operate effectively, it is necessary to align the environmental and economic spheres. The objective of this study was to evaluate the technical-economic feasibility of biogas obtained from the anaerobic biodigestion of the organic solid waste generated by the counties of the consortium from the metropolitan region of Sobral (CGIRS-RMS), Ceará, Brazil, over a period of 10 years. For this, it was considered 3 scenarios: sale of electricity (scenario 1), sale of biogas to a concessionaire (scenario 2), usage of biogas as a source of vehicular fuel (scenario 3). The biodigester design was calculated together with the design company, based on the estimation of waste generation in the counties belonging to the CGIRS-RMS. Afterwards, the price of the equipment needed for the construction of the biogas plant was surveyed, as well as the costs and taxes involved. From this, for the economic analysis itself, a statement of income for the year was designed for the calculation of the cash flows for the years of the project and the analysis of economic indicators: net present value (NPV), internal rate return (IRR) and payback time, using a minimum attractiveness rate (MARR) of 14% per year. For the analysis of the results, 4 cases were adopted for each of the scenarios: economic analysis without additional revenues (Case 1), economic analysis considering the revenue from not disposing of organic waste in the sanitary landfill (Case 2), economic analysis considering the revenue from the sale of carbon credits (Case 3) and the economic analysis considering these two additional revenues (Case 4). For Case 1, scenario 1 proved to be economically unfeasible with a negative NPV of R\$ 7,893,785.56, IRR of 6.5% and payback time of 16.96 years. Scenarios 2 and 3 proved to be economically viable with positive NPV of R\$ 3,101,979.12 and R\$ 37,544,853.27 and IRR of 17.3% and 49.1% respectively. For Case 2, scenarios 1, 2 and 3 proved to be economically viable with positive NPV of R\$ 17,450,969.91, R\$ 28,446,734.60 and R\$ 62,889,608.75 respectively, IRR of 28 %, 40.4% and 69.4% respectively and payback time of 4.91 years, 3.17 years and 1.73 years respectively. For Case 3, scenario 1 remained unfeasible with a negative NPV of R\$ 3,057,957.05, an IRR of 11.2% and a payback time of 12.38 years. Scenarios 2 and 3 proved to be economically viable with positive NPV of R\$ 7,937,807.64 and R\$ 42,380,681.79 respectively, IRR of 22.3% and 52.3% and payback of 5.99 years and 2.3 years respectively. For Case 4, all scenarios were economically viable.

**Keywords:** Urban solid waste; Anaerobic digestion; Economic viability; Biomethane.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta de energia interna do setor “outras renováveis” .....	32
Figura 2 – Fluxograma das etapas do projeto .....	42
Figura 3 – Localização dos municípios pertencentes ao CGIRS-RMS .....	43
Figura 4 – Fluxograma do sistema de biodigestão .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Quantidade de RSU coletado e gerado por região .....	25
Tabela 2	– Disposição final de RSU no Brasil por região .....	26
Tabela 3	– Distribuição das regiões brasileiras com iniciativas de coleta seletiva .....	27
Tabela 4	– Classificação por destinação energética do biogás das plantas em 2021 .....	33
Tabela 5	– Dados da população urbana dos anos 2000 e 2010 .....	45
Tabela 6	– Faixa populacional para determinação da taxa per capita de geração de resíduos.....	46
Tabela 7	– Informações de entrada utilizadas na ferramenta RenovaCalc .....	51
Tabela 8	– Demonstrativo de resultado de exercício .....	54
Tabela 9	– Dimensões do biodigestor .....	56
Tabela 10	– Quantidade estimada de resíduos gerada .....	57
Tabela 11	– Quantidade de biogás e biometano produzida em cada ano .....	58
Tabela 12	– Quantidade de energia elétrica gerada por ano .....	59
Tabela 13	– Preço dos equipamentos para o cenário 1 .....	60
Tabela 14	– Preço dos equipamentos para os cenários 2 e 3 .....	61
Tabela 15	– Custos fixos de operação .....	63
Tabela 16	– Custos variáveis de operação .....	64
Tabela 17	– Resultado da redução das emissões de CO <sub>2</sub> .....	65
Tabela 18	– Receitas anuais de venda para os cenários 1, 2 e 3.....	66
Tabela 19	– Resultado do demonstrativo de resultado de exercício para o cenário 1 .....	68
Tabela 20	– Resultado do demonstrativo de resultado de exercício para o cenário 2 .....	69
Tabela 21	– Resultado do demonstrativo de resultado de exercício para o cenário 3 .....	70
Tabela 22	– Fluxos de caixa, valores presentes e valores presentes acumulados dos cenários 1, 2 e 3 para o caso 1 .....	71
Tabela 23	– Fluxos de caixa, valores presentes e valores presentes acumulados dos cenários 1, 2	

e 3 para o caso 2 .....	72
Tabela 24 – Fluxos de caixa, valores presentes e valores presentes acumulados dos cenários 1, 2 e 3 para o caso 3 .....	73
Tabela 25 – Fluxos de caixa, valores presentes e valores presentes acumulados dos cenários 1, 2 e 3 para o caso 4 .....	74
Tabela 26 – VPL, TIR e Payback para os 3 cenários em cada um dos quatro casos .....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOGÁS	Associação Brasileira de Biogás e Biometano
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACL	Ambiente de contratação livre
ACR	Ambiente de contratação regulada
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CAPEX	Custos de investimento
CBIO	Crédito de descarbonização
CEGÁS	Companhia de Gás do Ceará
CHP	Sistema de cogeração de energia
CGIRS-RMS	Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor model
DA	Digestão Anaeróbia
DRE	Demonstrativo de Resultado de Exercício
ETE	Estação de tratamento de esgoto
FC	Fluxo de Caixa
FORSU	Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos
GEE	Gases do efeito estufa
IR	Imposto de Renda
IRPJ	Imposto de Renda Pessoa Jurídica
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
OPEX	Custos de operação
PIS	Programas de Integração Social
PM	Parcela de Molécula
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRFV	Plástico reforçado com película de vidro
PT	Parcela de Transporte

REIDI	Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura
RSO	Resíduo(s) Sólido(s) Orgânicos(s)
RSU	Resíduo(s) Sólido(s) Urbano(s)
SINIR	Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento
ST	Sólidos Totais
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	19
2	OBJETIVOS .....	21
2.1	Objetivo geral .....	21
2.2	Objetivos específicos .....	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
3.1	A problemática dos resíduos sólidos .....	22
3.2	Resíduos sólidos: Aspectos gerais .....	22
3.3	Resíduos sólidos no Brasil .....	24
3.3.1	<i>Panorama dos resíduos sólidos no Brasil</i> .....	25
3.3.2	<i>Disposição final de resíduos no Brasil</i> .....	26
3.3.3	<i>Coleta Seletiva de resíduos no Brasil</i> .....	27
3.4	Resíduo orgânico .....	28
3.5	Digestão anaeróbia .....	29
3.6	Biogás e energia .....	31
3.6.1	<i>Biogás</i> .....	32
3.6.2	<i>Biogás no Brasil</i> .....	33
3.6.3	<i>Biogás no Ceará</i> .....	34
3.6.4	<i>Biogás e energia elétrica</i> .....	35
3.6.5	<i>Biometano</i> .....	36
3.7	Programas de incentivo à produção de biogás .....	38
3.7.1	<i>RenovaBio</i> .....	38
3.7.2	<i>MetanoZero</i> .....	39
3.8	Viabilidade econômica de projetos .....	40
4	METODOLOGIA .....	41
4.1	Caracterização da área de estudo .....	42
4.2	Estimativa populacional .....	44
4.3	Geração de resíduos sólidos .....	45
4.3.1	<i>Fração orgânica dos resíduos sólidos</i> .....	46
4.4	Dimensionamento do biodigestor .....	46
4.4.1	<i>Cálculo da carga de sólidos</i> .....	47
4.4.2	<i>Cálculo do volume do biodigestor</i> .....	48

4.5	Produção de biogás .....	49
4.6	Geração de energia elétrica .....	49
4.7	Cálculo da redução das emissões de carbono .....	50
4.8	Definição do sistema de biodigestão .....	51
4.9	Análise econômica .....	53
4.9.1	<i>Fluxo de caixa</i> .....	53
4.9.2	<i>Demonstrativo de resultado de exercício</i> .....	53
4.9.3	<i>Valor presente líquido</i> .....	54
4.9.4	<i>Taxa interna de retorno</i> .....	55
4.9.5	<i>Taxa mínima de atratividade</i> .....	55
4.9.6	<i>Payback</i> .....	55
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	56
5.1	Dimensões do biodigestor .....	56
5.2	Estimativa da produção de resíduos .....	56
5.3	Geração de biogás e biometano .....	57
5.4	Geração de energia elétrica .....	59
5.5	Custo de investimento .....	60
5.6	Custo de operação .....	62
5.7	Redução das emissões de carbono .....	64
5.8	Análise econômica .....	65
5.8.1	Receitas .....	65
5.8.2	<i>Fluxo de caixa e demonstrativo de resultado de exercício</i> .....	67
5.8.3	<i>Valor presente líquido, taxa interna de retorno e payback</i> .....	71
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	77
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	79
	<b>ANEXO A – ESTIMATIVA DA POPULAÇÃO DOS MUNICÍPIOS PERTENCENTES AO CGIRS-RMS</b> .....	87
	<b>ANEXO B – TAXA PER CAPITA DE GERAÇÃO DE RSU PELOS MUNICÍPIOS PERTENCENTES AO CGIRS-RMS</b> .....	88
	<b>ANEXO C - ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RSU PELOS MUNICÍPIOS PERTENCENTES AO CGIRS-RMS</b> .....	89
	<b>ANEXO D – DIMENSIONAMENTO DOS BIODIGESTORES</b> .....	90
	<b>ANEXO E – COMPONENTES DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO</b> .....	91

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico, aumento do consumo de bens e alimentos e, principalmente, o crescimento da população contribuem para o aumento da geração de resíduos sólidos em todo o mundo. O mau gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU), pode causar sérios problemas, desde obstrução de vias e doenças na população de determinado local a, até mesmo, degradação de ecossistemas. A existência de locais de disposição final inadequada, como aterros controlados e lixões, e a dificuldade cada vez maior de se encontrar áreas para a construção de aterros sanitários são uma realidade no País. O esgotamento de recursos naturais e a degradação do meio ambiente pela utilização de combustíveis fósseis também são reflexos desse rápido e crescente desenvolvimento econômico e tecnológico. Diante desse quadro, a busca por soluções técnicas para a disposição final, recuperação e/ou tratamento dos resíduos sólidos se mostra essencial e está cada vez mais ganhando espaço no País.

No Brasil, estima-se que são coletadas cerca de 76 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) anualmente, de onde cerca de 60% vão para destinação final adequada (ABRELPE, 2021). Uma fração importante dos RSU que muitas vezes não é reaproveitada, ocupando grandes volumes nos aterros sanitários e, conseqüentemente, diminuindo sua capacidade de aporte de mais resíduos é a fração orgânica. Uma forma de tratamento final para essa fração é a digestão anaeróbia, pois é um processo adequado para o tratamento de resíduos orgânicos, seja proveniente de cozinhas industriais, restaurantes ou residências. A digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos (FORSU) se mostra uma solução bastante estratégica, pois, além de dar uma destinação final ambientalmente adequada para esses resíduos, produz o biogás, uma fonte de energia intrinsecamente renovável que pode ser usado como fonte de energia elétrica, energia térmica e como fonte para combustível veicular.

A utilização do biogás proveniente de resíduo orgânico como fonte energética melhora o status da matriz energética de um país, já que, em determinados casos, esse gás pode ser usado em alternativa aos combustíveis fósseis, contribuindo para a conservação dos recursos naturais, proteção do meio ambiente e diminuição da poluição atmosférica. Segundo Abiogás (2020), o potencial brasileiro teórico de produção de biogás é de 84,6 bilhões de metros cúbicos por ano, o que seria suficiente para suprir 40% da demanda interna de energia elétrica e 70% do consumo de diesel total, entretanto o Brasil explora apenas o equivalente a 3% desse potencial.

Para o aproveitamento do biogás gerado, é necessário que existam benefícios não só na esfera ambiental, mas também na esfera econômica. Devido a isso, é notável o olhar cada vez maior do governo para as fontes renováveis de energia, principalmente com a criação de leis e projetos que regulamentam e incentivam a produção e utilização de biogás e biometano no País, instituindo linhas de crédito e incentivos fiscais.

Devido a variabilidade de formas de aproveitamento do biogás, se torna necessário escolher qual é a mais vantajosa economicamente. Segundo Souza (2015), para a definição de projetos de plantas de biogás, são necessários estudos de viabilidade técnico-econômicas que englobem planejamento de formato, capacidade de aporte da planta e uso do biogás, de forma a garantir o sucesso do empreendimento.

Em modelos de negócios de usinas de biogás são utilizadas planilhas financeiras que analisam vários cenários. Essas planilhas abrangem aspectos semelhantes em relação a custos de investimento (Capex), custos de operação (Opex) e a utilização de indicadores econômicos como: Demonstrativo de resultado e exercício (DRE), fluxo de caixa, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL) (PROBIOGÁS, 2015b). Segundo Probiogás (2016b), a consideração de métodos de viabilidade econômica utilizando os indicadores citados, devem ser cultivados desde a iniciação de qualquer projeto de engenharia, pois contribuem na tomada de decisões.

Portanto, a presente pesquisa buscou avaliar técnico-economicamente, por meio de diferentes cenários, o aproveitamento de biogás a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos gerada pelos municípios pertencentes ao Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral (CGIRS-RMS), no estado do Ceará.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.2 Objetivo geral**

Avaliar a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do biogás obtido a partir da biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos orgânicos gerados pelos municípios pertencentes ao Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral (CGIRS-RMS), Ceará.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o custo dos equipamentos necessários para o funcionamento de uma usina de biodigestão de resíduos sólidos orgânicos.
- Dimensionar um biodigestor para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos do CGIRS-RMS.
- Analisar a viabilidade técnico-econômica do biogás gerado a partir da biodigestão dos resíduos orgânicos produzidos pelos municípios do CGIRS-RMS em 3 cenários distintos: venda de energia elétrica, venda de biometano para concessionária e aproveitamento do biogás como fonte de combustível.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 A problemática dos resíduos sólidos**

O desenvolvimento econômico, o crescimento acelerado da população, a urbanização, a revolução tecnológica e o aumento no consumo de bens e alimentos promovem continuamente alterações no estilo de vida e nos modos de produção e consumo da população. Como resultado direto desses processos, está ocorrendo um aumento gradativo na geração de resíduos sólidos, tanto em quantidade como em diversidade, principalmente nas áreas urbanas (GIL, 2016).

Logo, as pessoas compram produtos e materiais que, no fim de seu uso, poderiam ser reciclados ou reaproveitados. No entanto, esses produtos, muitas vezes, são tratados como rejeitos e descartados, seja em razão de hábitos culturais, ou por falta de conhecimento sobre os impactos ambientais subsequentes. Portanto, um dos grandes desafios da sociedade moderna é o gerenciamento dessa grande geração de resíduos, principalmente o que fazer em sua destinação final (SILVA, 2020a).

O equilíbrio entre a adoção de um padrão de consumo consciente e uma correta gestão de resíduos, com participação pública e privada, possui potencial para trazer resultados importantes na abordagem ambiental (LUIZ, 2018). Os resíduos sólidos, quando não recebem a destinação final adequada, podem trazer malefícios para toda a população, como: obstrução de vias, acúmulos em ruas e calçadas, odores desagradáveis e, até mesmo, problemas de saúde. Isso gera um impacto negativo direto na esfera social, ambiental e econômica da sociedade (SOUSA, 2018).

Meireles (2016) ressalta que infelizmente é impossível parar por completo a geração de resíduos, pois isso é um resultado inerente às atividades humanas. No entanto, o autor afirma que é possível reduzir sua geração, tratá-los de maneira adequada e reduzir seus impactos causados ao meio ambiente.

#### **3.2 Resíduos sólidos: Aspectos gerais**

No dia 2 de agosto de 2010, foi instituída a Lei 12.305, constando da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), primeira legislação federal a regular o tema dos resíduos sólidos, se tornando um marco para o País. A PNRS reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal,

isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente e sanitariamente adequados dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010; ALMEIDA, 2018). Um dos instrumentos da PNRS é o incentivo à adoção de consórcios e outras formas de cooperação entre os entes federados, visando à redução dos custos envolvido. Municípios que optarem por soluções consorciadas intermunicipais para a gestão de resíduos sólidos terão prioridade no acesso aos recursos da União (BRASIL, 2010).

Dando seguimento aos modelos de gestão de países desenvolvidos, a PNRS visa orientar uma nova sistemática na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, onde um de seus maiores objetivos é o fechamento dos lixões e reinserção dos produtos pós-consumo, por categoria, no respectivo ciclo produtivo, por meio de seu tratamento e valorização. (MONTEIRO, 2017).

Segundo a PNRS, para um efetivo gerenciamento dos resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e, por fim, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). A não geração permite a preservação dos recursos naturais e a economia em todo o sistema ao longo do ciclo de vida da geração de produtos, desde a obtenção da matéria prima, até a sua disposição final (MAGALHÃES, 2018). Segundo Silva (2020a), os resíduos devem ser reaproveitados e esgotado ao máximo seu poder de reutilização, para que, apenas em último caso, sejam enviados para uma disposição final ambientalmente adequada. A PNRS define resíduos sólidos, como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à periculosidade em resíduos perigosos e não perigosos e quanto a sua origem como: domiciliares, de limpeza urbana, sólidos urbanos, industriais, de serviços de saúde, da construção civil, entre outros (BRASIL, 2010). Os resíduos sólidos urbanos (RSU) compreendem o conjunto de resíduos proveniente de serviços e gerados em domicílios e pequenos estabelecimentos comerciais, somado aos resíduos provenientes das atividades de limpeza de vias públicas (varrição, capina e poda),

com sua geração diretamente relacionada à urbanização de uma determinada região (AMARO, 2018).

Recentemente, a Lei N ° 14.206 de 15 de julho de 2020 atualizou o marco legal do saneamento básico, alterando a lei n° 9.984, de 17 de julho de 2000, modernizando diversos trechos da lei anterior. Esse novo marco legal do saneamento básico traz novos princípios e diretrizes para a execução dos serviços públicos de saneamento, dentre eles o manejo dos resíduos sólidos (ABRELPE, 2020). O novo marco do saneamento atribui à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, como prazos para disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Com a aprovação desta lei, a relação regulatória entre a ANA e o setor de saneamento atingirá um novo patamar, já que ela passará a editar normas de referência relacionadas ao manejo de resíduos sólidos. Estas regras de caráter geral deverão ser levadas em consideração pelas agências reguladoras de saneamento infranacionais (municipais, intermunicipais, distrital e estaduais) em sua atuação regulatória (BRASIL, 2020).

Com o intuito de simplificar e atualizar a Política Nacional de Resíduos Sólidos, em 12 de janeiro de 2022, foi instaurado o Novo Marco Legal dos Resíduos Sólidos, instituído pelo decreto n° 10.936. Dentre suas disposições em relação à gestão de resíduos sólidos, vale ressaltar as diretrizes aplicáveis à coleta seletiva e a logística reversa, com a instituição do Programa Nacional de Logística Reversa, o qual será integrado ao Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos - SINIR e ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares e sendo coordenado pelo MMA (BRASIL, 2022a).

A criação de novas legislações e a atualização das antigas mostra como os resíduos sólidos sempre serão um tema pertinente a ser tratado para a preservação do meio ambiente, requerendo sempre avanços e modernização nas suas formas de gerenciamento.

### **3.3 Resíduos sólidos no Brasil**

Estima-se que são produzidos cerca de 2,01 bilhões de toneladas de resíduo por ano no mundo, e espera-se que essa quantidade aumente para 3,04 bilhões até 2050 (WORLD BANK, 2020). Devido a isso, países estão buscando cada vez mais tecnologias e inovações na área de gestão e tratamento de resíduos. Com o Brasil não é diferente, devido a sua extensão, variedade de atividades econômicas e diversidade de interações culturais faz-se necessário uma atenção especial ao gerenciamento de resíduos (BATISTA, 2019).



Silva *et al.* (2021a) e Amaro (2018) ressaltam que o País tem uma produção de resíduos sólidos por habitante equivalente a países desenvolvidos, mas um proporcional de descarte equivalente à de países mais pobres, evidenciando uma deficiência no gerenciamento e no tratamento desses resíduos.

### 3.3.1 Panorama dos resíduos sólidos no Brasil

Em 2020, o Brasil alcançou um total de geração de resíduos sólidos urbanos de aproximadamente 82,5 milhões de toneladas, equivalente a 225.965 toneladas diárias, um aumento de 4,4% em relação ao ano anterior. Já a quantidade de RSU coletado foi de aproximadamente 76,1 milhões de toneladas, um aumento de aproximadamente 29% em relação aos últimos 10 anos (ABRELPE, 2020; ABRELPE, 2021). A Tabela 1 mostra a quantidade e proporção de resíduos sólidos urbanos gerados e coletados por região no País.

Tabela 1 – Quantidade de RSU coletado e gerado por região do Brasil.

<b>Região</b>	<b>RSU Gerado (t/ano)</b>	<b>RSU Gerado (%)</b>	<b>RSU Coletado (t/ano)</b>	<b>Cobertura de coleta (%)</b>
<b>Norte</b>	6.103.320,2	7,40	4.982.940	81,4%
<b>Nordeste</b>	20.371.893,1	24,70	16.575.614	81,5%
<b>Centro-oeste</b>	6.185.797,5	7,50	5.780.820	93,9%
<b>Sudeste</b>	40.991.218,1	49,70	40.249.087	98,2%
<b>Sul</b>	8.825.071,1	10,80	8.491.375	95,7%
<b>Brasil</b>	82.477.300	-	76.079.836	92,2%

Fonte: Abrelpe (2021).

Como pode ser observado na Tabela 1, as regiões Norte e Nordeste apresentam índices de coleta inferiores à média nacional, o que significa que cerca de 20% dos resíduos gerados ainda não são alcançados pelos serviços de coleta regular nos municípios pertencentes a essas regiões. Pode-se dizer que o Nordeste possui a situação mais crítica, já que é a segunda região que mais gera RSU.

### 3.3.2 Disposição final de resíduos no Brasil

Segundo a PNRS, a destinação final de resíduos inclui sua reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação, aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, como por exemplo a disposição final ambientalmente adequada. (BRASIL, 2010). A opção de destinação final mais utilizada comumente no Brasil é o aterro sanitário por conta da grande disponibilidade de áreas e do seu relativo baixo custo em comparação com outros métodos. No entanto, práticas operacionais inadequadas entre as regiões acarretam em falhas de gerenciamento e ineficiências no sistema de gestão de resíduos. Como resultado disso, infelizmente ainda existem aterros controlados e lixões que possuem alto potencial de degradação ambiental (SOARES, 2017).

No País, a maior parte dos RSU coletados segue para disposição final em aterros sanitários, sendo registrado um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década, passando de 33 milhões de toneladas por ano para 43 milhões de toneladas por ano. A quantidade de resíduos sólidos que segue para unidades inadequadas como lixões e aterros controlados também cresceu, passando de 25 milhões de toneladas ao ano para cerca de 29 milhões de toneladas por ano. A Tabela 2 mostra a disposição final de RSU nas diferentes regiões do País (ABRELPE, 2020).

Tabela 2 – Disposição final de RSU no Brasil por região.

Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
<b>Norte</b>	1.773.927	35,6%	3.209.013	64,4%
<b>Nordeste</b>	6.016.948	36,3%	10.558.666	63,7%
<b>Centro-Oeste</b>	2.456.849	42,5%	3.323.972	57,5%
<b>Sudeste</b>	29.542.830	73,4%	10.706.257	26,6%
<b>Sul</b>	6.011.894	70,8%	2.479.482	29,2%
<b>Brasil</b>	45.802.448	60,2%	30.277.390	39,8%

Fonte: Abrelpe (2020).

Como os RSU são gerados em grandes quantidades e os aterros possuem uma capacidade máxima de recebimento de resíduos, a utilização de novas técnicas de tratamento de resíduos, que minimizem o volume disposto, se mostra cada vez mais necessária, pois em

determinado momento será difícil manter a relação entre a vida útil dos aterros existentes e a criação de novos. Limitações impostas pelas regulamentações e condicionantes ambientais, maior preço de terrenos e o aumento das distâncias entre os municípios onde é gerado o resíduo e seu local de disposição final são motivos para a busca de alternativas (SIMA-SP, 2020; MARRA, 2016).

### 3.3.3 Coleta Seletiva de resíduos no Brasil

A coleta seletiva é a coleta de resíduos sólidos previamente segregados conforme sua constituição e composição (BRASIL, 2010). A segregação na origem, ou segregação na fonte, é realizada pelo próprio gerador do resíduo, para em seguida, conforme acondicionamento adequado, disponibilizá-lo para coleta pelo prestador de serviço ou em entregar em pontos de coleta específicos. Logo, o gerador separa a fração orgânica da fração reciclável seca e dos resíduos não passíveis de reciclagem, chamados de rejeitos (RODRIGUES, 2019).

Não há um modelo de coleta seletiva ideal, devem ser realizados estudos que fundamentem o planejamento, operação e manutenção do modelo mais bem avaliado. Para que a coleta seletiva ocorra de forma satisfatória, esse modelo deve estar em conformidade com o planejamento municipal e atender às demandas do mercado local de comercialização de resíduos. Portanto, deve-se sempre buscar uma melhor maneira de implantá-la, até atingir a universalidade desse serviço (SILVA, 2020b). A Tabela 3 mostra a quantidade de municípios que apresentam iniciativas de coleta seletiva no País.

Tabela 3 - Distribuição das regiões brasileiras com iniciativas de coleta seletiva.

Regiões	Norte		Nordeste		Centro-Oeste		Sudeste		Sul		Brasil	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
<b>Sim</b>	198	294	614	1.017	122	236	1.313	1.511	905	1048	3.152	4.145
<b>Não</b>	251	156	1.180	777	344	231	355	157	283	143	2.413	1.425
<b>Total</b>	449	450	1.794	1.794	466	467	1.668	1.668	1.188	1.191	5.565	5.570

Fonte: Adaptado de Abrelpe (2020) e Abrelpe (2021).

No Brasil, em 2010, 3.152 municípios registraram alguma iniciativa de coleta seletiva. Cerca de uma década depois, em 2020, esse número aumentou para 4.145 municípios em todo o Brasil. No entanto, vale ressaltar que em muitos municípios essa coleta seletiva não abrange a totalidade de sua área urbana, podendo ser iniciativas pontuais. A Região Nordeste apresentou crescimento de 37% em relação aos municípios que apresentam coleta seletiva (ABRELPE, 2020).

Segundo Fugii (2019), a consciência do processo de aproveitamento, tratamento ou destino dos resíduos sólidos urbanos é essencial. Nesse sentido, explorar as várias ações que podem contribuir para a redução de resíduos destinados aos aterros sanitários é fundamental. Para um melhor aproveitamento desse processo, seria ideal a coleta seletiva realizada na própria residência pelos moradores. Mir *et al.* (2021) ressaltam que os cidadãos possuem importante participação como contribuintes nas ações de coleta seletiva, onde cada indivíduo deve ser responsável pelo armazenamento adequado dos resíduos e segregação de materiais orgânicos e recicláveis, garantindo a correta disposição dos resíduos para o momento certo de coleta.

### **3.4 Resíduo orgânico**

Os resíduos sólidos urbanos são constituídos por diferentes tipos de materiais, como por exemplo metais, papel, vidro, plástico, papelão, matéria orgânica e outros. Determinar sua composição gravimétrica, ou seja, categorizar os tipos de resíduos descartados pela população é um passo essencial para uma gestão integrada mais eficiente (ABRELPE, 2020). Uma fração importante dos RSU que muitas vezes não é reaproveitada, ocupando grandes volumes nos aterros sanitários e, conseqüentemente, diminuindo sua capacidade útil de aporte de resíduos é a fração orgânica. Países em desenvolvimento como o Brasil possuem elevada fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) (CUDJOE *et al.*, 2020). Segundo Abrelpe (2020), são descartadas cerca de 170 Kg de matéria orgânica por pessoa a cada ano, o que corresponde a cerca de 45,3% de todo o RSU coletado. No ano de 2021, no Brasil, foram descartados cerca de 34 milhões de toneladas de resíduos sólidos orgânicos (RSO) (ABRELPE, 2021).

Logo, formas de tratamento e reaproveitamento energético dessa fração tomam grande destaque, pois uma má gestão desses resíduos, que são de fácil decomposição, somada a uma disposição final inadequada, pode resultar em sérios problemas ambientais, desde variações climáticas a até mesmo degradação de ecossistemas (CUDJOE *et al.*, 2020).

As principais tecnologias que podem ser utilizadas no tratamento da FORSU de maneira alternativa aos aterros sanitários são: a compostagem, a incineração para a produção de energia, a biodigestão anaeróbica e tecnologias de tratamento mecânico biológico. Existem também técnicas mais avançadas como a pirólise e a gasificação, mas não são muito aplicadas devido ao seu custo elevado (ZAMBON, 2017).

A biodigestão anaeróbica é adequada para o tratamento de material orgânico com alta umidade, como é o caso dos resíduos provenientes de cozinhas industriais, restaurantes e residências. É uma solução bastante estratégica para a destinação final desses resíduos, já que além de poder gerar um composto rico em nutrientes, pode-se produzir também o biogás, que pode ser usado como fonte de energia elétrica e térmica e ser utilizado como fonte de combustível veicular (POLZER, 2017; RODRIGUES, 2019).

Segundo Abrelpe (2020), o tratamento da fração orgânica por processos como digestão anaeróbia, tratamento mecânico biológico com recuperação da fração orgânica e compostagem evitam emissões em uma proporção de 2,3Kg CH<sub>4</sub>/t de resíduo a partir da digestão anaeróbia e 3Kg CH<sub>4</sub>/t por meio da compostagem. Já sob o ponto de vista bioquímico, o resíduo alimentar possui, além das macromoléculas de matéria orgânica, diferentes elementos traço essenciais para o desenvolvimento dos microrganismos que compõem o consórcio anaeróbio responsável pelo processo de biodigestão (MAGALHÃES, 2018).

Segundo Borges (2020), a ação de separar a fração orgânica dos resíduos e destiná-la a biodigestão pode ser onerosa, requerendo o envolvimento de mais fatores e operações do que sua direta destinação para aterros sanitários. No entanto, a biodigestão é capaz de produzir uma maior quantidade de biogás, visto que biodigestores possuem uma melhor capacidade para processar esses resíduos devido à maior facilidade no estabelecimento de parâmetros de controle e no monitoramento de todo o processo.

### **3.5 Digestão anaeróbia**

A digestão anaeróbia é um complexo processo de mineralização e bioestabilização da matéria orgânica que envolve diversos grupos de microrganismos com recíproca interação por trocas de substratos, onde cada grupo apresenta capacidades fisiológicas distintas. Em suma, é um processo biológico em que ocorre a conversão da matéria orgânica na ausência de oxigênio, tendo o biogás como um de seus produtos (MARTINS, 2018; GOMES, 2022). O processo de digestão anaeróbia ocorre através de quatro etapas sucessivas: hidrólise,

acidogênese, acetogênese e metanogênese, que dependem de interações entre várias comunidades de microrganismos capazes de executá-las de forma harmônica. (MEEGODA, 2018). Na hidrólise, substâncias orgânicas mais complexas, como carboidratos, lipídeos e proteínas, que não podem ser diretamente utilizadas pelas bactérias, são decompostas em monômeros solúveis, como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos, por enzimas extracelulares hidrolíticas excretadas por bactérias acidogênicas (LI; CHEN; WU, 2019).

Na acidogênese, microrganismos acidogênicos absorvem os produtos gerados na hidrólise por meio de suas membranas celulares e produzem compostos de cadeia curta que incluem os ácidos graxos voláteis (AGV's) (ácido acético, fórmico, propiônico, butírico e lático), álcoois, dióxido de carbono, hidrogênio, amoníaco, sulfeto de hidrogênio e novas células bacterianas. A concentração desses ácidos na acidogênese depende da condição do biodigestor e pode variar significativamente em diferentes faixas de pH (MEEGODA, 2018; MAGALHÃES, 2018). Já na etapa da acetogênese, as bactérias sintróficas acetogênicas são responsáveis pela oxidação de compostos orgânicos intermediários, como propionato e butirato, em substratos apropriados para os microrganismos metanogênicos (acetato, hidrogênio e dióxido de carbono) (CHERNICHARO, 2007).

Por fim, na última etapa conhecida como metanogênese, etapa final do processo de digestão anaeróbia, há a conversão de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono realizada por microrganismos do domínio *Archaea*. Em função da sua fisiologia, as arqueas metanogênicas são divididas em dois grupos principais: as metanogênicas acetoclásticas, que usam acetato como fonte de carbono e energia, produzindo gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), e as metanogênicas hidrogenotróficas, que utilizam o gás carbônico como fonte de carbono e acceptor final de elétrons e o hidrogênio como fonte de energia, onde o gás carbônico reage com o hidrogênio para produzir metano (CHERNICHARO, 2007).

Wang *et al.* (2019) ressaltam que a digestão anaeróbia vem sendo amplamente utilizada para o tratamento de esgotos e de muitos tipos de resíduos orgânicos com a finalidade de converter matéria orgânica em biogás, se mostrando uma boa alternativa de recuperação energética. O metano, principal componente do biogás, é um gás inflamável que pode ser usado como fonte de calor para geração de eletricidade e energia alternativa limpa. Sendo um gás de efeito estufa, sua utilização gera benefício duplo ao meio ambiente (CULI, 2019).

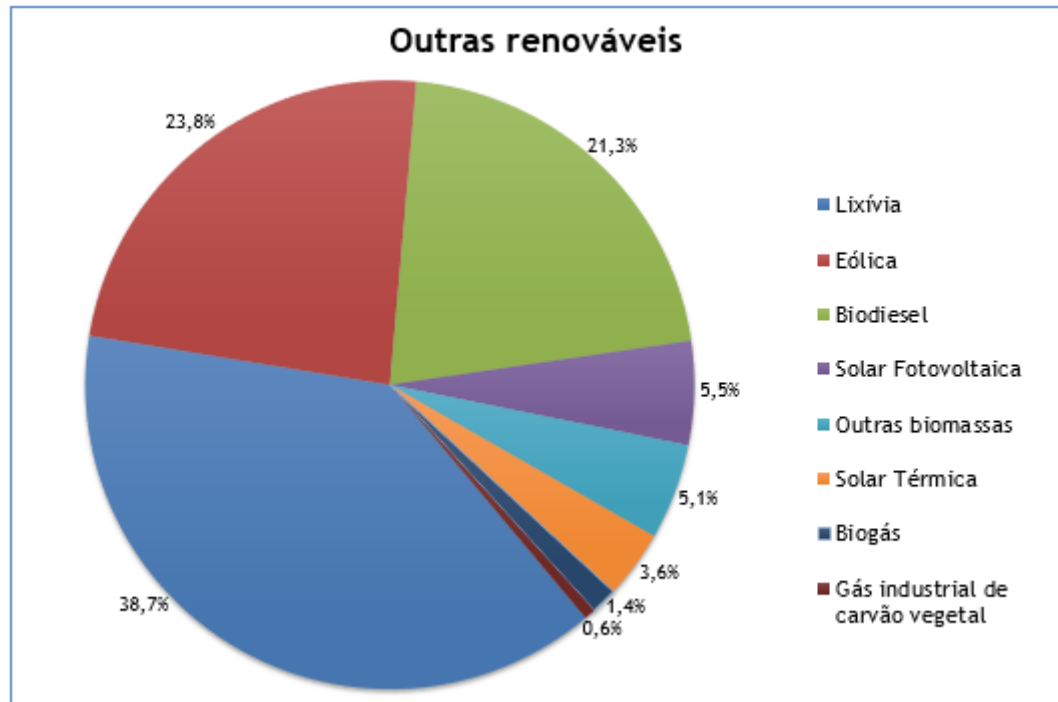
### 3.6 Biogás e Energia

É inegável que a utilização de combustíveis fósseis trouxe impactos positivos tanto para o desenvolvimento tecnológico quanto para o crescimento econômico mundial. No entanto, a utilização constante desses recursos não-renováveis vem trazendo sérios problemas para o meio ambiente, como por exemplo: emissões de poluentes na atmosfera, agravamento do efeito estufa e o aquecimento global (SHAHBAZ *et al.*, 2020; KHAN *et al.*, 2020). A incorporação de energias renováveis na matriz energética está cada vez mais presente. Nações em todo o mundo estão em busca de alternativas sustentáveis para geração de energia ao invés da utilização dos combustíveis tradicionais. (SHAHBAZ *et al.*, 2020).

As energias renováveis são assim definidas, pois apresentam ciclos contínuos que se repetem em espaços de tempo relativamente curto, ao contrário dos combustíveis fósseis que apresentam um ciclo de formação de milhões de anos e estão presentes na natureza em quantidades limitadas, necessitando de condições específicas para seu surgimento (FGV, 2015). Polzer (2017) afirma que o setor dos resíduos sólidos está intimamente ligado ao setor energético em muitos países. A substituição dos combustíveis fósseis por resíduos sólidos na produção de energia surge não só como uma alternativa para a redução da emissão de gases estufa, mas também como um meio para aumentar o uso de energias renováveis.

No Brasil, as energias renováveis têm participação de quase metade da oferta interna da matriz energética, correspondendo a 44,7% do total. Para se ter uma ideia da representatividade da bioenergia no País, a biomassa proveniente de cana, lenha e carvão vegetal e outras energias renováveis representaram 33,8% da oferta interna de energia em 2021. A categoria “outras renováveis” corresponde a 8,7% da oferta de energia interna e se divide entre outras 8 categorias de fontes de energia, observadas na Figura 1, com maiores participações da lixívia, energia eólica e biodiesel. O biogás representa apenas cerca de 1,4% desse setor, com um crescimento de 20% em relação ao ano interior (EPE, 2022).

Figura 1 – Oferta de energia interna do setor “outras renováveis”.



Fonte: EPE (2021).

### 3.6.1 Biogás

O biogás é uma mistura de gases composta principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) 40%-75% e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) 15%-60%, contendo também pequenas quantidades de hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ) e outros gases traço. Além de configurar o maior percentual na composição do biogás, o metano é responsável pela sua capacidade calorífica e pode servir como fonte de energia. O uso do biogás é visto como uma alternativa frente ao esgotamento dos combustíveis fósseis, como diesel, gasolina e gás natural, também podendo ser utilizado para a produção de combustível e de eletricidade por meio de usinas e geradores (JOSHI, 2019; COSTA, 2020).

O biogás é intrinsecamente renovável, ao contrário dos combustíveis fósseis, pois é produzido a partir da biomassa. Devido a isso, o biogás gerado a partir da digestão anaeróbia não apenas melhora o status da matriz energética de um país, mas também contribui significativamente na conservação dos recursos naturais, protegendo o meio ambiente (ABANADES et al., 2021).

Para que o biogás seja utilizado como fonte de energia, é necessária a retirada de impurezas. Basicamente existem dois processos envolvendo o tratamento do biogás. O primeiro consiste em sua “limpeza”, que envolve a remoção de componentes indesejados e/ou



tóxicos presentes no biogás, como gás sulfúrico, compostos orgânicos voláteis, siloxanos, monóxido de carbono e amônia. Nesse caso, o principal foco está na retirada do H<sub>2</sub>S, ação conhecida como dessulfurização. O segundo processo é chamado de “upgrading”, com o intuito de aumentar o poder calorífico do biogás removendo todo o dióxido de carbono presente e, assim, convertê-lo em um combustível de padrão elevado. O produto final do tratamento do biogás é chamado de biometano, composto basicamente por CH<sub>4</sub> (95%-99%), CO<sub>2</sub> (1%-5%) e nenhum traço de H<sub>2</sub>S (ANGELIDAKI *et al.*, 2018; ADNAN, 2019).

As aplicações mais comuns do biogás são: geração direta de calor, geração de energia elétrica em motogeradores, geração de energia elétrica e calor em sistemas de cogeração de energia (CHP) e utilização de biogás purificado na forma de biometano. Sendo esse último para injeção de em redes de gás natural, uso veicular e/ou ser transportado na forma liquefeita ou comprimida (ABILOGÁS, 2020).

### **3.6.2 Biogás no Brasil**

A utilização do biogás como fonte energética se enquadra no setor de biomassa, sendo caracterizada como uma fonte primária de energia não fóssil, que consiste em matéria orgânica de origem animal ou vegetal. Santos *et al.* (2017) ressaltam que a biomassa ainda pode ser caracterizada como qualquer matéria de origem orgânica que pode ser transformada em energia do tipo térmica, mecânica ou elétrica.

A biomassa pode ser classificada nas seguintes categorias: biomassa energética florestal, seus produtos e subprodutos ou resíduos; biomassa energética da agropecuária, as culturas agroenergéticas, os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e resíduos sólidos urbanos (EPE, 2022). No Brasil, os substratos utilizados para produção de biogás estão divididos em 3 categorias quanto a sua fonte: agropecuária, indústria (agroindústria) e saneamento. O setor de saneamento contempla os aterros sanitários (RSU), as usinas de tratamento de resíduos orgânicos e as estações de tratamento de esgoto (ETE) (CIBIOGÁS, 2021).

Em 2021 no Brasil, havia 811 plantas de biogás, sendo que dessas, 755 encontravam-se em operação com aproveitamento energético (93%), 44 encontravam-se em fase de implantação (5%) e 12 estavam passando por reforma (2%). As plantas em operação nesse ano geraram cerca de 2,3 bilhões de Nm<sup>3</sup> de biogás para três destinações distintas: energia elétrica, energia térmica e biometano. A Tabela 4 mostra a quantidade de plantas, em porcentagem, usadas para cada destinação energética. (CIBIOGÁS, 2021).

Tabela 4 – Classificação por destinação energética do biogás das plantas em 2021.

<b>Aplicação energética do biogás</b>	<b>Quantidade de plantas (%)</b>	<b>Volume do biogás (Nm<sup>3</sup>/ano)</b>
<b>Energia Elétrica</b>	87%	1.700.000.000
<b>Energia Térmica</b>	11%	151.000.000
<b>Biometano</b>	1%	522.000.000
<b>Total</b>	-	2.373.000.000

Fonte: CIBIOGÁS (2021).

Como observado na Tabela 4, apenas 1% da produção de biogás é destinada para a produção de biometano. Em 2021, as plantas destinadas a produção de biometano possuíam a capacidade de produção de 435 Nm<sup>3</sup> por dia, equivalente energeticamente a 378 litros de diesel por dia. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), em 2021 havia quatro usinas autorizadas a produzir e comercializar biometano no país e duas em processo de autorização. Em contrapartida, a produção de biogás para seu uso como energia elétrica tem sido cada vez mais significativa no cenário energético nacional, apresentando uma capacidade instalada de 372 MWe, o que equivale energeticamente ao abastecimento de mais de 1 milhão de residências. O uso do biogás para a produção de energia elétrica é a principal aplicação energética do biogás no País, representando cerca de 87% do total das plantas ativas, se encontrando nos ambientes de mercado regulado (Ambiente de Contratação Regulada - ACR), no mercado livre (Ambiente de Contratação Livre - ACL) e em sistemas isolados (off grid). Além disso, vale destacar que existe a opção de operação isolada. Desta forma, muitas plantas que operam neste regime não possuem registro de cadastro no sistema de geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (CIBIOGÁS, 2021).

### **3.6.3 Biogás no Ceará**

No Ceará, inaugurada em 2017, a usina GNR-Fortaleza capta e trata o biogás produzido no Aterro Sanitário de Fortaleza, composto pelo Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia e pelo Novo Aterro Sanitário, que recebe os resíduos da região metropolitana de Fortaleza. O Aterro recebe cerca de 5 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia (ECOMETANO, 2022).

A Companhia de Gás do Ceará (Cegás), com um investimento da ordem de 22 milhões de reais, construiu uma estação de transferência de custódia e um gasoduto de 23 km que transporta o gás natural renovável. O projeto se trata de uma parceria público-privada, onde o Governo do Ceará realizou a operação e faz a distribuição do gás natural renovável por meio da Cegás, a prefeitura de Fortaleza viabilizou o acesso aos resíduos sólidos e a GNR Fortaleza montou a usina de produção. A usina fornece biometano à Cegás através de uma interligação do gasoduto com a sua rede de distribuição e tem capacidade para produzir até 85.000 m<sup>3</sup> de biometano por dia e está em fase de ampliação para uma capacidade total de 108 mil m<sup>3</sup> por dia (CEGÁS, 2022a; ECOMETANO, 2022).

Se tratando de volume de biogás e sua equivalência energética, segundo CIBIOGÁS (2021), o Ceará está entre os 5 estados com maior produção de biogás, possuindo 3 plantas que contribuem para a produção de cerca de 110 milhões Nm<sup>3</sup>/ano.

#### ***3.6.4 Biogás e energia elétrica***

A geração de energia elétrica tem sido a destinação mais usual para o biogás devido às tecnologias disponíveis consolidadas, baixo custo de produção de energia, gama de fornecedores e legislações pertinentes (JÚNIOR, 2019).

Para a conversão do biogás em energia elétrica há, primeiramente, sua transformação em energia mecânica por combustão controlada. A energia mecânica ativa um gerador que produz a energia elétrica. Existem várias tecnologias disponíveis, porém as mais utilizadas são as turbinas a gás e os geradores de combustão interna (MILANEZ, 2018). Segundo Perecin e Coelho (2019), a geração de eletricidade por meio do biogás se configura como cogeração ou combined heat and power (CHP), pois gera energia elétrica e térmica. Isso se dá, pois a eficiência dos equipamentos disponíveis geralmente não supera 45% da energia gerada na combustão.

No Brasil, o mercado de comercialização de energia elétrica é dividido em dois ambientes comerciais: o ambiente de contratação regulado (ACR) e o ambiente de contratação livre (ACL). O ACL é o ambiente no qual o produtor de energia elétrica negocia diretamente o preço com o comprador final, onde são estabelecidos contratos bilaterais de compra e venda, com preços livremente negociados conforme regras de comercialização específicas. Já o ACR é o ambiente em que o consumidor é protegido com tarifas reguladas, de forma que pequenos consumidores não ficam expostos a variações tarifárias. A comercialização é

realizada por meio de leilões, onde os compradores formalizam suas negociações por meio de contratos registrados (ARAUJO e OLIVEIRA, 2020).

Segundo Araújo e Oliveira (2020), a bioeletricidade advinda da biomassa contribui para a segurança energética nacional, mas infelizmente ainda não é muito valorizada nos leilões. Para obter êxito, esse tipo de energia tem que se tornar mais competitiva nos leilões de ACR, atraindo a atenção dos compradores. Porém, no ACL há uma maior oportunidade de comercialização na venda dos excedentes de energia elétrica produzida.

Em 2004, a ANEEL publicou o artigo 14º do Decreto lei nº 5.163/2004 com o conceito de geração distribuída (GD), que consiste na geração de energia, incluindo fontes renováveis, no local de consumo ou próximo dele (JÚNIOR, 2019). Essa instituição da geração distribuída, inicialmente, foi um impulso adicional à biodigestão, pois o excedente de energia elétrica gerado nas propriedades rurais passou a poder ser inserido nas redes de distribuição (MILANEZ et al., 2018). De maneira complementar, a resolução ANEEL nº 687/2015 trouxe o conceito de geração compartilhada, possibilitando que consórcios ou cooperativas com micro ou mini GD utilizem a energia gerada para abatimento das faturas de energia elétrica dos consorciados ou cooperados. Segundo Júnior (2019), o debate sobre gestão energética municipal associado ao uso estratégico dos recursos públicos está cada vez mais em pauta ultimamente. Logo, uma gestão eficiente de energia por meio da utilização de fontes renováveis como o biogás pode contribuir para a redução dos gastos públicos, permitindo a destinação de capital para outras atividades necessárias.

### **3.6.5 Biometano**

O biometano é produzido a partir da purificação do biogás, processo que consiste em aumentar o teor de metano pela retirada de contaminantes como o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), siloxanos, vapor de água, entre outros (CIBIOGÁS, 2021). O biometano teve qualidade primeiramente regulamentada por meio da Resolução ANP nº 8/2015 e posteriormente, pela Resolução ANP nº 685/2017. A primeira trata de biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais. A segunda trata da especificação de biometano oriundo de aterros sanitários e estações de tratamento de esgotos destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Em junho de 2018, por meio da resolução nº 734 da ANP, foram regulamentados os requisitos para a produção de biocombustíveis, dentre eles o biometano (GUERREIRO, 2020).

Para que as especificações de uso do biometano sejam atendidas deve-se primeiro retirar os contaminantes excedentes do biogás e, posteriormente, elevar seu poder calorífico. Ao elevar o poder calorífico do biogás, reduz-se tanto o custo com transporte como os custos de armazenamento, pois a mesma quantidade de energia é obtida com um menor volume de gás. Devido a isso, é muito vantajoso utilizá-lo em veículos, já que por ser um combustível com alta densidade energética, permite a redução do peso e tamanho do armazenamento de combustível, aumentando a autonomia dos veículos de transporte (PERECIN e COELHO, 2019).

Existem diversos processos possíveis para o “upgrade” do biometano, dentre eles se destacam os processos de absorção, adsorção, separação por membranas e separação criogênica. Nos processos de absorção, o CO<sub>2</sub> é dissolvido em água, ou em meios solventes seletivos, permitindo sua retirada do fluxo de gás. Nos sistemas de adsorção, o biogás é pressurizado e conduzido por uma coluna com compostos fixadores, onde o CO<sub>2</sub> se desprende do adsorvente pelo uso de um gás de expurgo. Já nos processos de separação por membrana, o biogás atravessa uma membrana onde o metano fica retido. Por fim, o processo de separação criogênica consiste na redução gradativa da temperatura até atingir o ponto de condensação dos componentes presentes, restando apenas o metano (EPE, 2018).

O biometano funciona como combustível em veículos da mesma forma que o gás natural (ou metano fóssil). Por esse motivo, pode ser usado em veículos convencionais de gás natural (PROBIOGÁS, 2016a). No entanto, sua utilização como combustível continua inexpressiva, pois o gás natural, um combustível semelhante de origem fóssil, é mais utilizado. Um dos problemas na utilização do gás natural é o sistema de transporte da unidade exploradora até a região de demanda, o que, pode ser uma característica positiva para o uso do biogás purificado, já que a produção desse biocombustível geralmente ocorre no mesmo local de sua demanda.

A incorporação do biometano no setor energético brasileiro diminui a dependência externa energética do País, além de promover o tratamento de resíduos orgânicos. Segundo MME (2022), cada 333 m<sup>3</sup> de biometano utilizados evitam a emissão de cerca de uma tonelada de gás carbônico para a atmosfera. No entanto, mesmo o uso do biometano apresentando benefícios ambientais e energéticos, seu uso só é executado quando benefícios econômicos também são alcançados (FEROLDI *et al.*, 2018).

### **3.7 Programas de incentivo à produção de biogás**

O Brasil está cada vez mais dando atenção para a produção de combustíveis renováveis, com foco na geração de biogás e na recuperação energética. Para a utilização do biogás na geração de energia ou como biocombustível, é necessária a existência de um bom custo-benefício e competitividade em relação aos combustíveis fósseis utilizados. Para tanto, decretos e leis estão sendo instituídos no País, procurando fomentar o uso dessa fonte de energia renovável.

Dentre as legislações recentes, destaca-se o decreto 10.712/2021 que regulamenta a nova Lei do Gás, lei nº 14.134/2021, permitindo que gases que sejam intercambiáveis com o gás natural possam receber tratamento regulatório equivalente ao gás natural, desde que sejam atendidas as especificações estabelecidas pela ANP. No congresso nacional tramita o PL 3865/2021 que institui o Programa de Incentivo à Produção e ao Aproveitamento de Biogás, de Biometano e de Coprodutos Associados – PIBB, possuindo objetivos como: a utilização de biometano no transporte público, incentivo a integração da produção do biometano em gasodutos já existentes, redução de impactos negativos ao meio ambiente com a participação de energias renováveis na matriz energética nacional e o aproveitamento de biomassa e biodigestão por meio do seu uso em escala industrial e comercial como forma de geração de emprego e desenvolvimento social.

É notável o olhar cada vez maior do governo, nos últimos 5 anos, para as fontes renováveis de energia, com a criação de leis e projetos que regulamentam e incentivam a produção e utilização de biogás e biometano no País. Dentre os programas voltados para o uso de biogás e biometano destacam-se o RenovaBio e o Programa MetanoZero (MMA, 2022).

#### **3.7.1 RenovaBio**

Em 2017, foi instituída a lei 13.576 que dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) fazendo parte integrante da política energética nacional. O RenovaBio é um programa de âmbito nacional com o objetivo de reconhecer a importância da produção de biocombustíveis na matriz energética, contribuindo tanto para manutenção da segurança energética, como para redução de emissões de gases de efeito estufa (BRASIL, 2017).

Uma importante iniciativa visando o fomento e uso do biogás foi a inclusão do biometano do programa RenovaBio, permitindo que produtores de biometano se qualifiquem

para gerar créditos de descarbonização (CBIO). O CBIO representa a mitigação de uma tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente que é gerado pelos produtores e importadores de biocombustíveis de acordo com a intensidade de carbono de cada biocombustível (KIMURA, 2020).

O atual ambiente de negociação do RenovaBio irá permitir um faturamento de R\$ 1,4 trilhão em investimentos até 2030. Dentro desse valor estão os investimentos em novas instalações industriais e a plantação de áreas agrícolas custando R\$ 0,54 trilhão, restando R\$ 0,86 trilhão para custos de operação. Ao contrário do setor de petróleo, os maiores gastos no setor de biocombustíveis estão na operação e manutenção das unidades de produção, resultando em uma melhor distribuição de renda e geração de empregos. Com relação ao biometano, o programa almeja alcançar uma produção anual de 30,4 milhões de Nm<sup>3</sup>/dia em 2030, com a instalação de cerca de 1.200 unidades de produção (MME, 2021).

### ***3.7.2 MetanoZero***

Um outro grande marco de importância para o biogás no País foi a criação do Decreto N° 11.003, de 21 de março de 2022, que institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano. Dentre seus objetivos principais estão o incentivo a programas e ações para reduzir as emissões de metano e o fomento o uso de biogás e biometano como fontes renováveis de energia e combustível (BRASIL, 2022).

O referido decreto faz parte do programa Metano Zero, que possui o foco voltado para o aproveitamento energético e como combustível de resíduos orgânicos, gerando biogás e metano, dando destaque aos resíduos sólidos urbanos e agrícolas. Esse programa tem como objetivo o fomento e a consolidação de mercados de carbono por meio da valorização de atividades ambientais incentivadas pela mitigação das emissões de metano. Uma de suas novidades é a criação de créditos de metano, onde o Brasil se mostra pioneiro nessa iniciativa. Os empreendedores terão benefícios tanto por meio de créditos gerados pela redução das emissões de metano oriundas dos resíduos orgânicos como pela emissão evitada de carbono pela substituição do uso de combustíveis fósseis (MMA, 2022).

Dentre as medidas do MetanoZero destacam-se as linhas de crédito e financiamento de agentes públicos e privados para a implantação de biodigestores, implantação de sistemas de purificação de biogás para produção e compressão de biometano, criação de pontos e corredores verdes para abastecimento de veículos pesados (ônibus, caminhões e veículos agrícolas) movidos a biometano, implantação de tecnologias que permitam a utilização de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de emissões de

gases de efeito estufa e a desoneração tributária para infraestruturas relacionadas com projetos de biogás e biometano (MMA, 2022).

Esta iniciativa está em total alinhamento ao Programa Nacional de Crescimento Verde, procurando estabelecer estruturas de priorização de ações e incentivos econômicos que permitam o país alavancar iniciativas de caráter sustentável, valorizando a inovação e o empreendedorismo (MME, 2022).

### **3.8 Viabilidade Econômica de projetos**

Uma análise de viabilidade econômica de um projeto visa estimar os gastos envolvendo o investimento inicial, a operação e manutenção e as receitas que serão geradas durante certo período de tempo (MORAES, 2017). Segundo Souza (2015), para a definição de projetos de plantas de biogás são necessários estudos de viabilidade técnico-econômicas com planejamento de formato, capacidade de aporte da planta e uso do biogás, de forma a garantir o sucesso do empreendimento. Em modelos de negócios de usinas de biogás são utilizados modelos de planilhas financeiras que analisam vários cenários. Essas planilhas tecnicamente abrangem aspectos em relação a custos de investimento (Capex), custos de operação (Opex) e a utilização de indicadores econômicos como: Demonstrativo de resultado e exercício (DRE), fluxo de caixa, Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e o Payback (PROBIOGÁS, 2015b).

Uma taxa importante a ser considerada nos cálculos desses indicadores é a taxa mínima de atratividade (TMA). A TMA é a taxa de juros mínima no qual fará o investidor optar em determinado projeto de investimento. Ela serve para trazer os fluxos de caixa do projeto a valores presentes e realizar o cálculo dos indicadores econômicos de rentabilidade VPL e TIR. É o retorno mínimo exigido para se investir em determinado projeto de acordo com o risco do mesmo (FARIA, 2015; SILVA, 2021b).

O VPL, um dos métodos mais utilizados para seleção e viabilidade de projetos financeiros, considera o valor de investimento ao longo de um determinado tempo. A análise por meio do VPL tem como finalidade avaliar o valor atual dos fluxos de caixas futuros gerados por um projeto, ao longo de um período determinado ou durante sua vida útil (WIVES, 2018). Segundo Moraes Filho (2017), é um dos métodos mais utilizados para seleção e viabilidade de projetos financeiros.

A TIR é a taxa que iguala o fluxo de caixa operacional ao valor a ser investido no projeto, ou seja, é a taxa que iguala o VPL à zero, representando a rentabilidade anual do



investimento durante o período de projeto determinado (MORAES FILHO, 2017; GASPAR *et al.*, 2020).

Segundo Probiogás (2016b), a adoção de categorias de custos e consideração de diferentes métodos de viabilidade econômica utilizando indicadores, como valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR), por exemplo, devem ser cultivados desde a iniciação de qualquer projeto de engenharia, ajudando na escolha da melhor forma de investimento para um projeto ou empreendimento.

#### 4 METODOLOGIA

A presente pesquisa realizou um estudo de caso da análise da viabilidade técnico-econômica da implantação de uma usina de produção de biogás pela digestão via úmida para um período de 10 anos. A produção de biogás foi realizada por meio da biodigestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos provenientes do primeiro consórcio público de resíduos do estado do Ceará, o Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral (CGIRS-RMS). A Figura 2 mostra o fluxograma das etapas desenvolvidas neste estudo.

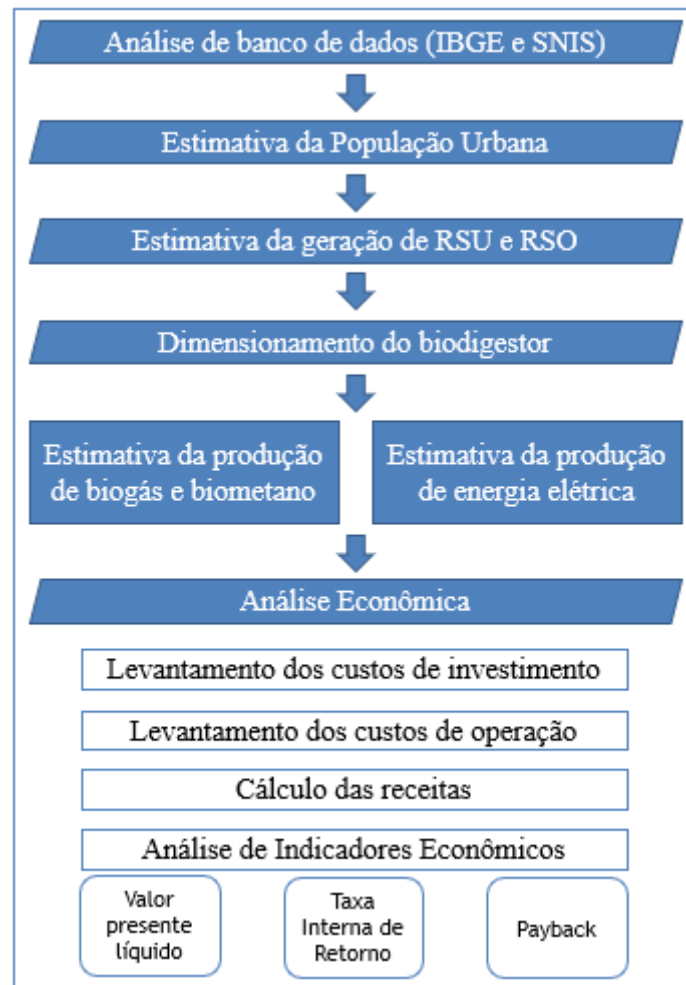
A análise da viabilidade econômica do projeto foi realizada por meio do levantamento dos custos dos equipamentos necessários para o funcionamento da usina, do levantamento dos custos de operação e das receitas geradas. Portanto, foram considerados 3 cenários para o aproveitamento do biogás:

- Cenário 1: Venda de energia elétrica;
- Cenário 2: Venda de biometano para a distribuidora de gás;
- Cenário 3: Aproveitamento do biogás como fonte de biocombustível;

E quatro Casos para cada cenário:

- Caso 1: Análise econômica sem receitas adicionais;
- Caso 2: Análise econômica considerando a receita da não disposição dos resíduos orgânicos no aterro sanitário;
- Caso 3: Análise econômica considerando a receita da venda de créditos de carbono;
- Caso 4: Análise econômica considerando a receita da não disposição dos resíduos orgânicos no aterro sanitário e da venda de créditos de carbono.

Figura 2 – Fluxograma das etapas do projeto.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

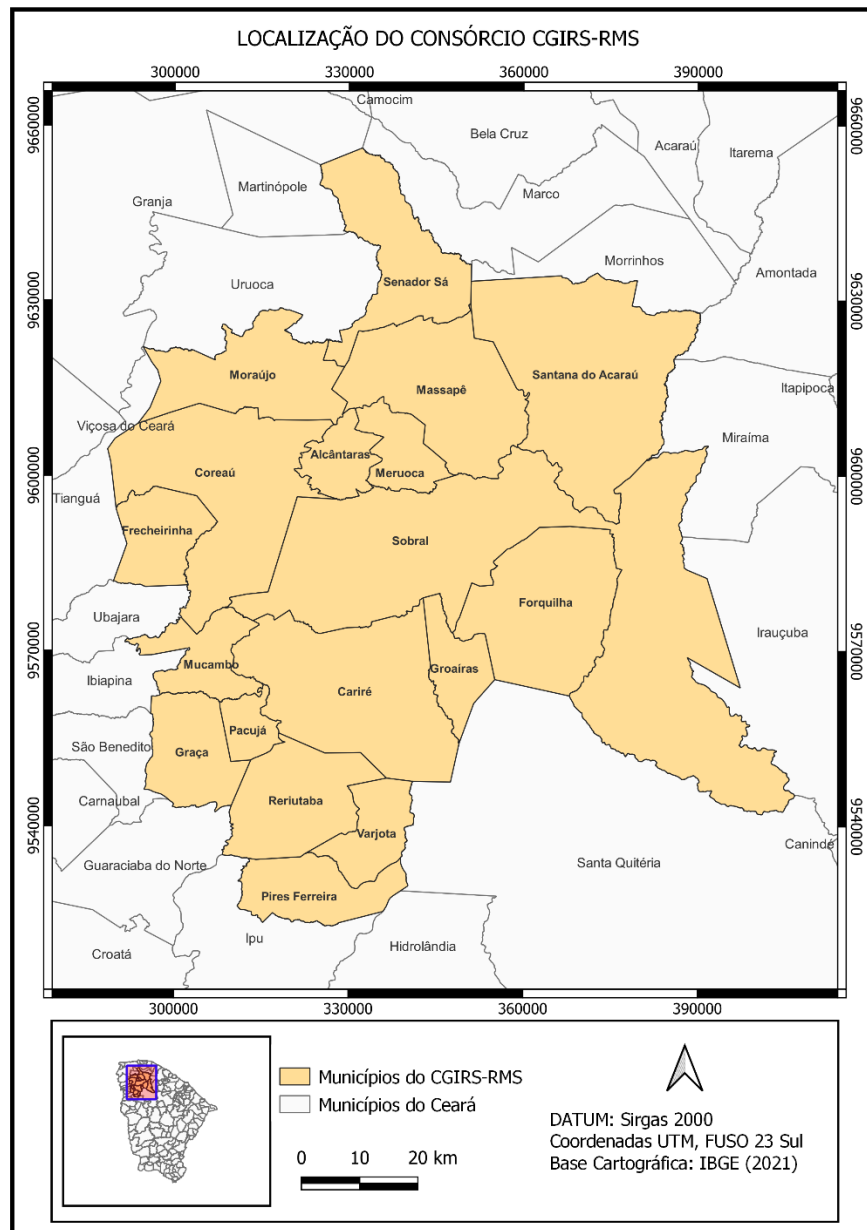
#### 4.1 Caracterização da área de estudo

Este estudo levou em consideração os municípios pertencentes ao Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - Região Metropolitana de Sobral (Figura 3). O primeiro indício de formação do CGIRS-RMS surgiu entre os anos de 2008 e 2009, onde foi instituído inicialmente o Consórcio para Destinação Final de Resíduos Sólidos (COMDERES) visando a construção de um aterro sanitário para atender inicialmente a 15 municípios membros (DIGITAL, 2021).

Em 27 de dezembro de 2016, foi aprovada no Estado do Ceará a Lei Complementar nº 168, criando a Região Metropolitana de Sobral (RMS) composta por 18 municípios da Zona Norte do estado, dos quais 14 já faziam parte do COMDERES, excluindo Mucambo, que deixou o consorciamento para implantar um aterro sanitário individual. Com

isso, fez-se necessário que o COMDERES fosse reformulado para que sua base territorial metropolitana coincidissem com a região metropolitana de Sobral, incluindo os municípios de Pires Ferreira, Reriutaba e Varjota, o que mudou o nome do Consórcio para contemplar a evolução no manejo de resíduos sólidos. Desta forma, o CGIRS-RMS foi consolidado e dotado de infraestrutura a partir do segundo semestre de 2018 (DIGITAL, 2021).

Figura 3 - Localização dos municípios pertencentes ao CGIRS-RMS.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

No presente ano, o CGIRS-RMS é constituído por 18 municípios: Alcântaras, Cariré, Coreaú, Forquilha, Frecheirinha, Graça, Groáiras, Massapê, Meruoca, Moraújo, Mucambo, Pacujá, Pires Ferreira, Reriutaba, Santana do Acaraú, Senador Sá, Sobral e Varjota. A região tem uma área de aproximadamente 8.512,11 km<sup>2</sup> e uma população urbana estimada para o ano de 2022 de 489.110 habitantes.

## 4.2 Estimativa populacional

Para o cálculo da estimativa de geração de resíduos sólidos orgânicos dos municípios, foi realizada a estimativa populacional do CGIRS-RMS para um período de 10 anos. Os dados para a estimativa da população urbana foram retirados dos censos realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O cálculo foi feito usando o método da projeção geométrica, que calcula o crescimento populacional em função da população existente a cada instante, utilizado para estimativas de menor prazo (VON SPERLING, 2014). As equações utilizadas estão a seguir:

$$P = P2 * e^{Kg*(t-t0)} \quad (1)$$

$$Kg = \frac{\ln P2 - \ln P1}{t2 - t1} \quad (2)$$

Onde:

P: População no ano de projeção;

P1: População do penúltimo censo;

P2: População do último censo;

Kg: Taxa de crescimento geométrico;

t: Ano de projeção;

t0: Ano inicial;

t1: Ano do penúltimo censo;

t2: Ano do último censo.

Para o cálculo da taxa de crescimento geométrico foram utilizados os valores de população referentes aos anos de 2000 e 2010, mostrados na Tabela 5, que são os últimos censos onde se tem o registro da parcela urbana da população dos municípios.

Tabela 5 – Dados da população urbana dos anos 2000 e 2010.

<b>Municípios</b>	<b>População Urbana</b>	
	<b>Censo 2000</b>	<b>Censo 2010</b>
<b>Alcântaras</b>	2.759	3.448
<b>Cariré</b>	5.448	8.301
<b>Coreaú</b>	11.262	14.223
<b>Forquilha</b>	11.625	15.473
<b>Frecheirinha</b>	64.49	7.636
<b>Graça</b>	4.832	5.815
<b>Groaíras</b>	5.582	7.076
<b>Massapê</b>	19.127	23.983
<b>Meruoca</b>	5.634	7.420
<b>Moraújo</b>	3.324	3.604
<b>Mucambo</b>	7.569	9.066
<b>Pacujá</b>	3.265	3.723
<b>Pires Ferreira</b>	2.813	3.354
<b>Reriutaba</b>	9.728	10.590
<b>Santana do Acaraú</b>	12.452	15.372
<b>Senador Sá</b>	3.800	5.068
<b>Sobral</b>	134.371	166.310
<b>Varjota</b>	13.481	14.416

Fonte: Adaptado de IBGE (2000 e 2010).

### 4.3 Geração de resíduos sólidos

A taxa de geração de resíduos para os municípios do CGIRS-RMS foi determinada a partir das faixas populacionais levantadas pelo Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) em seu Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, mostradas na Tabela 6 (SNIS, 2020). Cada faixa populacional possui um valor determinado de geração de resíduos em quilogramas de acordo com a quantidade de habitantes, sendo assim possível calcular a geração de RSU a partir da população dos municípios.

Tabela 6 – Faixa populacional para determinação da taxa per capita de geração de resíduos.

<b>Faixa Populacional</b>	<b>Número de Habitantes</b>	<b>Taxa de geração de resíduos</b>
<b>1</b>	$\leq 30.000$ habitantes	0,99 kg/hab/dia
<b>2</b>	entre $> 30.000$ e $\leq 100.000$	1,01 kg/hab/dia
<b>3</b>	entre $> 100.000$ e $\leq 250.000$	0,95 kg/hab/dia
<b>4</b>	entre $> 250.000$ e $\leq 1.000.000$	1,05 kg/hab/dia
<b>5</b>	entre $> 1.000.000$ e $\leq 4.000.000$	1,06 kg/hab/dia
<b>6</b>	$> 4.000.000$ habitantes	1,01 kg/hab/dia

Fonte: Adaptado de SNIS (2020).

#### **4.3.1 Fração orgânica dos resíduos sólidos**

Em 2017 foram elaborados planos de coletas seletivas que objetivavam nortear os municípios quanto a suas potencialidades e deficiências com relação à sua cadeia de reciclagem, conhecidos como Planos de Coletas de Seletivas Múltiplas. O Plano de Coletas Seletivas Múltiplas da Bacia do Acaraú, que engloba a maioria dos municípios pertencentes ao CGIRS-RMS, retrata a dificuldade de se fazer uma gestão dos resíduos gerados na região, pois os municípios não apresentam análise da composição gravimétrica desses resíduos. Devido a isso, para este estudo foi considerado que cada município já tenha implantado um sistema de coleta seletiva, seja individual ou em consórcio com outros municípios da região, para a separação de seus resíduos gerados.

Para o cálculo da fração orgânica presente nos RSU foi utilizada a porcentagem de 48%, valor obtido por Feitosa (2018) ao realizar uma revisão sistemática de literatura sobre análise gravimétrica na gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, no período de 10 anos, de 2006 a 2015.

#### **4.4 Dimensionamento do biodigestor**

Os biodigestores utilizados foram projetados e cotados em um fornecedor nacional mediante estimativa de geração de resíduos orgânicos. Cada biodigestor tem formato circular, com revestimento interno e é confeccionado em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV). As equações de dimensionamento dos biodigestores a seguir, referentes às seções 4.4.1 e 4.4.2, foram adaptadas de Silva (2018).

#### 4.4.1 Cálculo da carga de sólidos

O processo de digestão anaeróbia utilizado baseia-se no teor de matéria seca dos substratos, sendo classificado como biodigestão por via úmida, pois permite a transferência do material a ser digerido por bombeamento, exigindo certo teor de umidade. Portanto, para esse tipo de tratamento, a mistura final a ser digerida com substrato deve apresentar valores de sólidos totais (ST) iguais ou menores a 15% (PROBIOGÁS, 2015a). Logo, é necessária uma prévia diluição do substrato para seu posterior bombeamento para o digestor.

Primeiramente, para o cálculo da solução a ser alimentada no biodigestor, deve ser estabelecida a porcentagem de sólidos totais presente nos resíduos sólidos alimentares. Segundo literatura, a porcentagem de sólidos totais presente nos resíduos orgânicos alimentares é de 21% (MALINOWSKY, 2016; LI et al., 2018; ZHAO *et al.*; 2019). Logo, a carga de sólidos totais presente nos resíduos alimentares pode ser obtida através da Equação 3:

$$Cst = P * ST \quad (3)$$

Onde:

Cst: Carga de sólidos totais adicionada no reator (kg/dia);

P: Produção diária de resíduos (kg/dia);

ST: Fração sólida do substrato inicial (%).

Como citado anteriormente, a digestão por via úmida apresenta valores de ST menores que 15%. Portanto, para evitar possíveis sobrecargas nos sistemas de alimentação e no transporte da solução durante o processo de biodigestão, foi utilizada uma porcentagem de 14% de sólidos totais. Por fim, o valor da massa final é calculado a partir da Equação 4:

$$Mf = \frac{Cst * 100}{Stf} \quad (4)$$

Onde:

Mf: Massa final de alimentação diária (kg/dia);

Cst: Carga de sólidos totais adicionada no reator (kg/dia);

Stf: Fração sólida do substrato final (%).

Com o valor da massa final adicionada diariamente ao reator, pode-se calcular o volume de água necessário para a biodigestão em via úmida, que será o restante da massa total. Utilizando a densidade da água como 1.000 kg/m<sup>3</sup>, o volume foi calculado por meio da Equação 5:

$$V_a = \frac{M_f - P_d}{\rho} \quad (5)$$

Onde:

V<sub>a</sub>: Volume de água utilizado (m<sup>3</sup>);

P<sub>d</sub>: Produção diária de resíduos (Kg/m<sup>3</sup>);

ρ: Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>).

#### 4.4.2 Cálculo do volume do biodigestor

Para o cálculo do volume do biodigestor é necessário saber o volume total de resíduos alimentados diariamente. Para tanto, foi utilizado o valor de 1.213 kg/m<sup>3</sup>, referente à densidade dos resíduos orgânicos (SILVA, 2011). No entanto, segundo Nagalli (2020), o valor é de 1.320 kg/m<sup>3</sup> para esse parâmetro. Logo, foi calculado o volume diário de resíduos a ser processado pelo reator a partir da Equação 6:

$$V_r = \frac{P_d}{\text{Massa Específica}} \quad (6)$$

Somando o volume de resíduos com o volume de água adicionado diariamente tem-se a vazão diária de entrada do biodigestor.

$$Q_a = V_r + V_a \quad (7)$$

Onde:

Q<sub>a</sub>: Volume da solução alimentada (m<sup>3</sup>);

V<sub>r</sub>: Volume de resíduos alimentados (m<sup>3</sup>);

V<sub>a</sub>: Volume de água (m<sup>3</sup>).



O tempo de detenção hidráulica (TDH) é um importante parâmetro para o dimensionamento de reatores. Segundo fornecedor, o tempo de detenção adotado foi de 20 dias.

$$\text{Volume do reator} = Q_a * \text{TDH} \quad (8)$$

A partir do volume, e admitindo o biodigestor em formato circular, foram dimensionados a área da base e a altura, baseadas nas especificações fornecidas pelo fornecedor.

#### 4.5 Produção de biogás

O cálculo utilizado para a estimar a quantidade de biogás produzida por reator se baseou na relação entre os sólidos voláteis presentes no resíduo orgânico e a geração de metano. Segundo literatura, a quantidade de sólidos totais voláteis presentes nos resíduos sólidos alimentares urbanos apresenta um teor médio de 20% (MALINOWSKY, 2016; LI, *et al.* 2018; ZHAO *et al.*; 2019). Segundo Ferreira (2015), um quilograma de sólidos voláteis é capaz de gerar 0,4 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, valor utilizado para a determinação da quantidade de metano produzida por reator neste estudo. Por fim, foi considerado que a porcentagem de metano presente no biogás é de 54%, já que o biogás proveniente de resíduos possui de 54% a 64% de metano (MAGALHÃES, 2018).

#### 4.6 Geração de energia elétrica

Para ser feita a análise de viabilidade econômica do cenário 1, de venda de energia elétrica, é necessário calcular a estimativa anual de produção de energia proveniente do biogás. Para esse cálculo foi utilizada a Equação 9, adaptada de Costa (2020).

$$\text{Pot} = (q - c) * \text{PC} * n \quad (9)$$

Onde:

Pot: Potência gerada;

q: Vazão do Biogás (m<sup>3</sup>/h);

PC: Poder calorífico do biogás (kWh/m<sup>3</sup>);

n: Eficiência elétrica do conjunto motor-gerador (%);

c: Consumo de biogás pelo motor-gerador (m<sup>3</sup>/h).

Segundo Santiago (2019) o poder calorífico do biogás, com composição média de 50%-65% de metano, é de 6,4 kWh/m<sup>3</sup>. Já para a eficiência elétrica do motor-gerador, foi utilizado o valor de 38% segundo especificação do próprio equipamento.

#### 4.7 Cálculo da redução das emissões de carbono

A emissão dos CBIO é feita pelos produtores de biocombustíveis após serem habilitados e certificados pela ANP, sendo disponibilizados conforme a eficiência energética (GOMES, 2022). O cálculo dos créditos de carbono foi realizado utilizando a planilha RenovaCalc, disponibilizada pelo programa RenovaBio, onde foi usada a rota de produção de biometano. Para o cálculo da redução de emissões, foram utilizadas as equações 10 e 11, adaptadas de Gomes (2022). Primeiramente, para se obter a nota de eficiência energética-ambiental subtraiu-se o valor da intensidade de carbono do valor da intensidade de carbono de referência (86,70 gCO<sub>2</sub>eq/MJ) que, segundo a RenovaCalc, é uma média entre o uso de gasolina, diesel e gás natural veicular. Em seguida multiplicou-se o valor dessa nota pelo potencial global de geração energética, resultando na mitigação de CO<sub>2</sub> equivalente emitido por ano. Por fim, o resultado da redução de emissão de CO<sub>2</sub> foi multiplicado pelo valor do CBIO para a obtenção da receita.

$$NEE = ICR - IC \quad (10)$$

$$RE = NEE * PE \quad (11)$$

Onde:

NEE = Nota de eficiência energética;

IC = Intensidade de carbono;

ICR = Intensidade de carbono de referência;

RE = Redução das emissões;

PE = Potencial global energético.

A Tabela 7 mostra as informações utilizadas como dados de entrada na planilha “RenocaCalc\_Biometano\_aberta (v. 7)”, disponibilizada pelo programa RenovaCalc. O valor de biomassa e de biometano utilizados foram a estimativa da geração de resíduos e de biometano pelo consórcio para cada ano de projeto. O CGIRS-RMS possui cinco centrais de tratamento de resíduos localizadas nos municípios de Massapê, Cariré, Coreaú, Pacujá,

Ubaúna e Forquilha, que recebem os resíduos de todos os municípios participantes do consórcio. Logo, a distância de transporte utilizada como dado de entrada na planilha de cálculo foi a soma das distâncias médias desses municípios até Sobral, local onde seria construído a planta de biogás deste trabalho, resultando em 236,8 km. Para a porcentagem de metano no biogás e poder calorífico inferior do biometano, foram utilizados os valores de 54% e 35,9 MJ/m<sup>3</sup> respectivamente. Já o potencial energético foi obtido pela multiplicação da quantidade de biometano produzida em cada ano pelo poder calorífico inferior do biometano.

Tabela 7 – Informações de entrada utilizadas na ferramenta RenovaCalc.

<b>Dados de entrada</b>
Biomassa (resíduo alimentar)
Produção de biometano
Distância de transporte
Porcentagem de metano no biogás
Poder calorífico inferior do biometano
Potencial energético

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

#### **4.8 Definição do sistema de biodigestão**

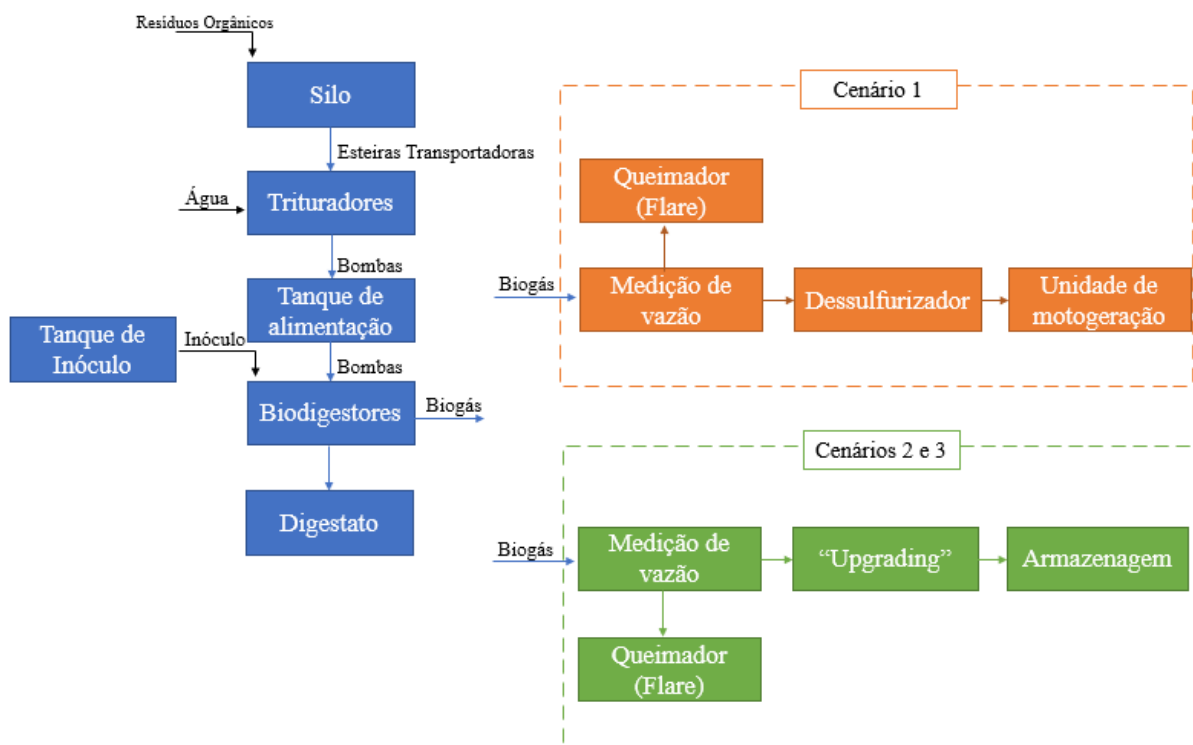
O processo de biodigestão irá ocorrer pela via úmida com biodigestores de mistura contínua, conhecidos como Continuous Flow Stirred Tank Reactor (CSTR), considerados a tecnologia padrão para a digestão anaeróbia de substratos mais densos, ou seja, com teor de sólidos totais em torno de 15% e que possuem características favoráveis para bombeamento e mistura (SILVA, 2018). Cada biodigestor será alimentado inicialmente com inóculo igual a 10% do seu volume total e, posteriormente, será realizada a alimentação diária com os resíduos para o tratamento e geração de biogás.

Primeiramente, os resíduos orgânicos serão recepcionados em um “silo” dimensionado de acordo com a quantidade diária recebida. Depois, seguirão para o sistema de trituração por meio de correias transportadoras equipadas com eletroímã e sistema de interrupção acionados por detector de metais. O material triturado será misturado com água e seguirá para o tanque de alimentação, de onde posteriormente será bombeado para os reatores e injetados pela parte superior. Todo o sistema de bombeamento é feito através de bombas para líquidos, permitindo também o pré-tratamento (trituração) e a eventual mistura do

substrato. O material usado para condução de substratos e água são canos de aço ou de tubos de poliuretano com resistência a ultravioleta (PE), já para condução de gás, os indicados são de aço inox ou PE (PROBIOGÁS, 2015b).

Para a geração de energia elétrica serão utilizados geradores com potência nominal de 230 kW, com um consumo médio de combustível de 100 Nm<sup>3</sup>/h de biogás e eficiência de 38%. Já o sistema de “upgrading” do biogás em biometano contará com uma coluna de adsorção de CH<sub>4</sub> e uma coluna de “Stripping” de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S (Torre de Degassagem). As vantagens desse sistema são a utilização de apenas água e energia elétrica para a purificação do metano, não utilizando aditivos biológicos e químicos como soda cáustica, por exemplo. A Figura 4 mostra o fluxograma do sistema de biodigestão.

Figura 4 – Fluxograma do sistema de biodigestão.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

A planta também conta com sistema de automação, um controle eletrônico central e controlador lógico programável, com aquisição de dados de monitoramento de todo o processo, como: quantidade de entrada de substratos nos recipientes de armazenagem; volume de substratos que alimentam os biodigestores; nível e temperatura dos substratos; quantidade e qualidade de geração de gás; eficiência térmica e elétrica de geração, temperatura, pH, etc. Os dados serão armazenados e exibidos em uma sala de controle central. A Probiogás (2015b)

ressalta a importância de um sistema automatizado, imbuído de sistemas com avisos por telefone, celular e e-mail, e de operadores capacitados para operar todo o sistema de forma fácil e segura.

#### **4.9 Análise econômica**

Para a análise econômica, primeiramente foi realizado o contato com empresas para o levantamento dos preços dos equipamentos necessários para o funcionamento da usina, considerando os cenários analisados. Após o levantamento e tabulação dos dados, foi realizado os cálculos necessários para a análise de viabilidade.

Para a análise de viabilidade econômica do investimento, foram determinados os fluxos de caixa do projeto e utilizados indicadores como, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Mínima de Atratividade (TMA), Taxa Interna de Retorno (TIR) e, por fim, o *Payback* descontado, verificando a possibilidade de retorno financeiro diante dos cenários estipulados. Segundo Probiogás (2016), a adoção de cenários de custos e consideração de diferentes indicadores de viabilidade econômica, como VPL e TIR, por exemplo, devem ser cultivados desde a iniciação de qualquer projeto de engenharia.

##### ***4.9.1 Fluxo de caixa***

O fluxo de caixa representa as entradas e saídas monetárias de um projeto durante um período determinado de tempo. Segundo Wives (2018), o fluxo de caixa é uma ferramenta muito importante para a análise de viabilidade de uma atividade ou investimento, onde se é possível reconhecer o volume e a periodicidade dos recursos financeiros. Para a análise este estudo, foi considerado um período de 10 anos, que coincide com o tempo de vida útil e depreciação das instalações e equipamentos utilizados, segundo estipulado pela Receita Federal (MINISTÉRIO DA FAZENDA, 2017).

##### ***4.9.2 Demonstrativo de Resultado de Exercício (DRE)***

Para o delineamento do fluxo de caixa, com suas entradas e saídas ao longo do período analisado, foi feito um demonstrativo de resultado do exercício, detalhado na Tabela 8.

Tabela 8 – Demonstrativo de resultado de exercício.

<b>DRE</b>	
(+)	Receita Bruta
(-)	Impostos sobre vendas e encargos
(=)	Receita Líquida
(-)	Custos Operacionais (fixo e variáveis)
(=)	Lucro bruto
(-)	Depreciação
(=)	Lucro antes do imposto de renda
(-)	Impostos sobre a receita (IRPJ e CSLL)
(=)	Lucro líquido (após imposto de renda)
(-)	Amortização
(-)	Investimentos
(=)	Fluxo de caixa do projeto

Fonte: Adaptado de Peixe (2018).

No DRE são levantadas as receitas e descontados os impostos, custos operacionais e demais custos envolvidos de acordo com o projeto ou investimento em questão. A depreciação é quanto um equipamento ou bem perde valor ao longo do tempo. Para tanto, foi padronizado o valor de 10% do custo dos equipamentos e instalações segundo a Receita Federal (MINISTÉRIO DA FAZENDA, 2017). Também foi considerado a inserção da usina no Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (Reidi), o que isentou a cobrança dos impostos como PIS e COFINS.

#### 4.9.3 Valor presente líquido

O VPL pode ser calculado através da Equação 12, adaptada de Peixe (2018):

$$VPL = -FC_0 + \sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1+TMA)^j} \quad (12)$$

Onde:

FC<sub>0</sub>: Capital Inicial do Projeto (R\$);

j: período (anos ou meses);

N: tempo total do projeto, período total de avaliação do investimento;

FC<sub>j</sub>: Fluxo de caixa do período;

TMA: Taxa de juros, Taxa Mínima de Atratividade adotada (%).

Um valor de VPL maior ou igual a zero indica que o investimento é viável economicamente, pois significa que o retorno gerado é maior ou igual ao capital investido. Quando um projeto apresenta um VPL negativo, seu retorno é menor que o capital investido, significando sua inviabilidade econômica (MICUANSKI, 2014).

#### **4.9.4 Taxa interna de retorno**

A taxa interna de retorno de um investimento é a taxa que iguala o fluxo de caixa operacional ao valor a ser investido no projeto, ou seja, é a taxa que iguala o VPL a zero (LIMA, 2019). O TIR pode ser calculado a partir da Equação 13, adaptada de Franco (2021):

$$VPL = 0 = - \text{Investimento Inicial} + \sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1 + TIR)^j} \quad (13)$$

Em que:

FC<sub>j</sub>: Fluxo de caixa do período;

j: período (anos ou meses);

N: tempo total do projeto, período total de avaliação do investimento;

TIR: Taxa interna de retorno

#### **4.9.5 Taxa mínima de atratividade**

A taxa mínima de atratividade é um dos principais parâmetros de avaliação de projetos, pois influencia muito em seu resultado (SILVA, 2021b). Segundo Peixe (2018), normalmente é analisada em comparação com a TIR, se a TIR for maior que a TMA, significa que o projeto é economicamente viável. Para esse trabalho, foi utilizada uma taxa mínima de atratividade de 14%, valor adotado para investimentos tidos como seguros, como por exemplo o tesouro direto Selic e a letra de crédito do agronegócio.

#### **4.9.6 Payback**

O payback é uma ferramenta utilizada para se determinar o tempo que o investimento apresentará retorno financeiro. Existem dois tipos de *payback*: o simples e o descontado. O *payback* simples é o tempo de retorno sem levar em consideração o valor do

dinheiro ao longo do tempo. Já o *payback* descontado atualiza os valores do investimento em cada período em relação ao fluxo de caixa, utilizando descontos de acordo com a taxa mínima de atratividade (WIVES, 2018).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Dimensões do biodigestor

A Tabela 9 mostra os resultados dos parâmetros calculados para o biodigestor em conformidade com as especificações do projetista. O biodigestor possui formato circular com volume total de 1.860 m<sup>3</sup> e capacidade para tratar 63 toneladas diárias de resíduo orgânico.

Tabela 9 – Dimensões do biodigestor.

<b>Parâmetros</b>	
<b>Altura</b>	6 m
<b>Diâmetro</b>	19,9 m
<b>Volume total</b>	1.860 m <sup>3</sup>
<b>TRH<sup>(1)</sup></b>	20 dias

<sup>(1)</sup> TRH = Tempo de Retenção Hidráulica.  
Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

### 5.2 Estimativa da produção de resíduos

A quantidade de RSU e RSO produzida pelo CGIRS-RMS para os anos de projeto foi baseada na estimativa da população e na geração per capita de cada município, representadas nos ANEXOS A e B respectivamente. O resultado da quantidade estimada total de resíduos para cada município está representado no ANEXO C. Dentre os 18 municípios analisados, Sobral se destaca com a maior produção de RSU, com uma geração anual maior de 200 toneladas durante todo o período analisado. Portanto, com os valores da projeção populacional e da geração per capita de resíduos, foi estimada a quantidade de resíduos sólidos urbanos e orgânicos de todos os municípios do consórcio CGIRS-RMS em um período de 10 anos. A Tabela 10 mostra a quantidade de RSU e RSO estimada.



Tabela 10 – Quantidade estimada de resíduos gerada.

<b>Ano</b>	<b>RSU<sup>(1)</sup> (t/dia)</b>	<b>RSU<sup>(1)</sup> (t/ano)</b>	<b>RSO<sup>(2)</sup> (t/dia)</b>	<b>RSO<sup>(2)</sup> (t/ano)</b>
<b>2023</b>	416,26	151.933,87	199,80	72.928,26
<b>2024</b>	425,34	155.248,00	204,16	74.519,04
<b>2025</b>	434,63	158.640,15	208,62	76.147,27
<b>2026</b>	444,14	162.112,28	213,19	77.813,89
<b>2027</b>	453,88	165.666,42	217,86	79.519,88
<b>2028</b>	463,85	169.304,64	222,65	81.266,23
<b>2029</b>	474,05	173.029,09	227,55	83.053,96
<b>2030</b>	509,98	186.140,97	244,79	89.347,67
<b>2031</b>	521,22	190.244,95	250,19	91.317,58
<b>2032</b>	532,73	194.446,25	255,71	93.334,20

<sup>(1)</sup> RSU = Resíduos sólidos urbanos.

<sup>(2)</sup> RSO = Resíduos sólidos orgânicos.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

O aterro que comporta os resíduos dos municípios integrantes do CGIRS-RMS recebe em média cerca de 400 toneladas diárias de RSU, ou seja, cerca de 146.000 toneladas por ano. Considerando a fração orgânica como 48% do total, isso resultaria em cerca de 70.000 toneladas de resíduo orgânico para o presente ano, valor que é muito próximo ao obtido na estimativa realizada por esse estudo, dando confiabilidade à estimativa. Formas de tratamento da fração orgânica do RSU trazem benefícios ao meio ambiente pois diminuem o volume de resíduos disposto em aterros, aumentando sua vida útil e, conseqüentemente, também diminuem a ocupação de novas terras para a construção de mais unidades.

### 5.3 Geração de biogás e biometano

O volume de biogás e de biometano, mostrados na Tabela 11, foram calculados a partir da quantidade estimada de resíduos orgânicos. No ANEXO D consta os dados de projeto e produção de biogás e biometano de forma mais detalhada. Essa produção foi utilizada para o cálculo da viabilidade econômica de projeto de todos os cenários estipulados.

A produção de biogás da usina durante o período proposto se encontra na faixa entre 5.000.001 e 125.000.001 metros cúbicos por ano, o que a enquadra como usina de grande porte. No país, apenas 7% das plantas de biogás são de grande porte, mas são responsáveis por 82% de todo volume de biogás total gerado (CIBIOGÁS, 2021). Mesmo

com a quantidade de biogás produzida crescendo ao longo do período analisado, a produção de biometano se mantém constante devido ao sistema de “upgrading” utilizado, possuindo a capacidade de tratar 1.000 metros cúbicos de biogás por dia. A quantidade excedente será queimada em um flare com capacidade de 1.500 m<sup>3</sup>/dia.

Tabela 11 – Quantidade de biogás e biometano produzida em cada ano.

<b>Ano</b>	<b>Volume de biogás (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Volume de biogás (m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>Volume de biometano gerado (m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>Volume de biogás excedente (m<sup>3</sup>/dia)</b>
<b>2023</b>	10.804.186,11	29.600,51	12.960,00	5.600,51
<b>2024</b>	11.039.858,03	30.246,19	12.960,00	6.246,19
<b>2025</b>	11.281.077,43	30.907,06	12.960,00	6.907,06
<b>2026</b>	11.527.984,44	31.583,52	12.960,00	7.583,52
<b>2027</b>	11.780.723,04	32.275,95	12.960,00	8.275,95
<b>2028</b>	12.039.441,15	32.984,77	12.960,00	8.984,77
<b>2029</b>	12.304.290,79	33.710,39	12.960,00	9.710,39
<b>2030</b>	13.236.691,30	36.264,91	12.960,00	12.264,91
<b>2031</b>	13.528.529,72	37.064,46	12.960,00	13.064,46
<b>2032</b>	13.827.288,57	37.882,98	12.960,00	13.882,98

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Segundo Índice de Qualidade Municipal do Meio Ambiente (IQM), a frota destinada para coleta de resíduos deve ser composta no mínimo por cerca de 53 veículos destinados a coleta de RSU e 18 veículos destinados à coleta de resíduos do serviço de saúde. A produção anual de biometano corresponde a 4.115.448 litros de diesel, equivalente a 11.275,2 L/dia, o que seria suficiente para abastecer 184 caminhões de coleta de resíduos. Isso é mais do que o necessário para abastecer diariamente toda a frota mínima pertencente ao consórcio, podendo ainda abastecer demais veículos utilizados pelos serviços da prefeitura. Vieira *et al.* (2019) ao analisarem a viabilidade econômica do aproveitamento energético de biometano proveniente de dejetos de suínos, observaram que a granja poderia reduzir sua compra de diesel para 634.760,74 litros por ano, obtendo uma economia anual de 22,11%.

Isso mostra a atratividade econômica que biometano possui, além do seu benefício ambiental por ser um combustível renovável. Apesar disso, o biometano ainda é pouco explorado, seja para abastecimento próprio ou comercialização, visto que a maior parte do biogás produzido no País é destinado à geração de energia elétrica. Em 2021, apenas 4 usinas

estavam autorizadas a produzir e comercializar biometano no país e 2 se encontravam em processo de autorização (CIBIOGÁS, 2021).

#### 5.4 Geração de energia elétrica

A Tabela 12 mostra a quantidade estimada de energia elétrica gerada por ano. Segundo EPE (2021), o consumo de energia elétrica médio per capita do Estado do Ceará é de 1.297 kWh/hab. Portanto, a usina possui a capacidade de atender no primeiro ano de funcionamento cerca de 17.146 habitantes e no último ano analisado cerca de 22.367 habitantes. Essa geração de energia pode suprir a demanda por eletricidade de municípios inteiros do CGIRS-RMS, como Alcântaras, Frecheirinha, Graça, Groaíras, Meruoca, Moraújo, Pacujá, Pires Ferreira e Senador Sá, ou abastecer eletricamente a população urbana de dois ou três municípios simultaneamente, como Moraújo, Pacujá e Pires Ferreira, por exemplo.

Tabela 12 – Quantidade de energia elétrica gerada por ano.

<b>Ano</b>	<b>Geração de energia elétrica (kWh/ano)</b>
<b>2023</b>	22.239.136,90
<b>2024</b>	22.767.042,00
<b>2025</b>	23.307.373,45
<b>2026</b>	23.860.445,15
<b>2027</b>	24.426.579,60
<b>2028</b>	25.006.108,18
<b>2029</b>	25.599.371,37
<b>2030</b>	27.687.948,52
<b>2031</b>	28.341.666,56
<b>2032</b>	29.010.886,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Um dado importante que pode ser analisado é a geração de energia por tonelada de resíduo orgânico. Durante o período foi obtida uma produção média de 25.224 MWh/ano com uma utilização média de 81.925 t/ano de resíduo orgânico. Logo, uma tonelada de resíduo orgânico consegue produzir por volta de 0,307 MWh de energia elétrica. Gomes (2022), também analisando a estimativa da produção de energia elétrica por meio da

biodigestão da FORSU em um biodigestor CSTR, obteve um valor de 0,314 MWh por tonelada de resíduo orgânico.

### 5.5 Custo de investimento

As Tabelas 13 e 14 mostram a lista de equipamentos necessários para o tratamento de todo o resíduo orgânico gerado pelo CGIRS-RMS para a produção de biogás segundo especificações da empresa projetista, com adaptações devido a quantidade de resíduo tratada e de biodigestores necessários. O ANEXO E mostra os componentes do sistema de automação de forma mais detalhada.

Tabela 13 – Preço dos equipamentos para o cenário 1.

<b>Equipamento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço unitário</b>	<b>Total</b>
Silo para recepção de resíduos orgânicos	1	R\$ 158.144,85	R\$158.144,85
Esteira para transporte de resíduos	1	R\$92.300,00	R\$92.300,00
Detector de metais	1	R\$33.957,00	R\$33.957,00
Triturador de resíduos	8	R\$132.180,00	R\$1.057.440,00
Tanque de alimentação/equalização	1	R\$1.000.000,00	R\$1.000.000,00
Tanque de inóculo	1	R\$620.000,00	R\$620.000,00
Biodigestores	4	R\$2.460.000,00	R\$9.840.000,00
Automação e controle	1	R\$110.505,00	R\$110.505,00
Bombas de transporte	6	R\$32.005,00	R\$192.030,00
Tubulações (substrato e gás)	1	R\$590.000,00	R\$590.000,00
Medidores de fluxo de biogás	4	R\$11.150,00	R\$44.600,00
Sistema de tratamento de biogás	1	R\$1.670.800,00	R\$1.670.800,00
Motores-geradores	8	R\$750.000,00	R\$6.000.000,00
Bag (contentor de biogás)	4	R\$39.505,45	R\$158.021,80
Flare	1	R\$113.800,00	R\$113.800,00
Tanque de digestato	1	R\$ 900.000,00	R\$ 900.000,00
<b>Preço dos equipamentos</b>	-	-	<b>R\$22.581.598,65</b>
Obras civis	-	-	R\$2.258.159,87
Instalações elétricas	-	-	R\$2.258.159,87
<b>Total investido</b>	-	-	<b>R\$27.097.918,38</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 14 – Preço dos equipamentos para os cenários 2 e 3.

<b>Equipamento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço unitário</b>	<b>Total</b>
Silo para recepção de resíduos orgânicos	1	R\$ 158.144,85	R\$ 158.144,85
Esteira para transporte de resíduos	1	R\$92.300,00	R\$92.300,00
Detector de metais	1	R\$33.957,00	R\$33.957,00
Triturador de resíduos	8	R\$132.180,00	R\$1.057.440,00
Tanque de alimentação/equalização	1	R\$1.000.000,00	R\$1.000.000,00
Tanque de inóculo	1	R\$620.000,00	R\$620.000,00
Biodigestores	4	R\$2.460.000,00	R\$9.840.000,00
Automação e controle	1	R\$110.505,00	R\$110.505,00
Bombas de transporte	6	R\$32.005,00	R\$192.030,00
Tubulações (substrato e gás)	1	R\$590.000,00	R\$590.000,00
Medidores de fluxo de biogás	4	R\$11.150,00	R\$44.600,00
Sistema de tratamento de biogás (“Upgrading”)	1	R\$4.552.672,00	R\$4.552.672,00
Bag (contentor de biogás)	4	R\$39.505,45	R\$158.021,80
Flare	1	R\$113.800,00	R\$113.800,00
Tanque de digestato	1	R\$900.000	R\$900.000
<b>Preço dos equipamentos</b>	-	-	<b>R\$19.463.470,65</b>
Obras civis	-	-	R\$1.946.347,07
Instalações elétricas	-	-	R\$1.946.347,07
<b>Total investido</b>	-	-	<b>R\$23.356.164,78</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como cada reator possui a capacidade de tratar 63 toneladas de resíduo orgânico por dia, são necessários 4 biodigestores para o tratamento de todo o resíduo orgânico gerado pelos municípios do consórcio. A quantidade necessária dos demais equipamentos foi dimensionada a partir da quantidade de resíduo a ser tratada e da capacidade de operação de cada equipamento contida em sua especificação. Os cenários 2 e 3 possuem o mesmo dimensionamento para a quantidade de equipamentos pois ambos visam a produção de biometano, apenas diferindo em seu uso final. Para os valores de obras civis e instalações elétricas, foi utilizado o percentual de 10% do total investido, segundo Probiogás (2015b).

O investimento inicial para atender ao cenário 1 é maior do os demais cenários devido à utilização dos motogeradores necessários para a geração de energia elétrica que, mesmo sendo adquiridos nacionalmente, são equipamentos que ainda possuem preço elevado.

Como observado na Tabela 13, para o cenário 1, os valores de investimento mais elevados se devem, em primeiro lugar, à construção dos biodigestores custando R\$ 9.840.000,00 e, em seguida, ao sistema de motogeração de energia custando R\$ 6.000.000,00. Isso também foi verificado por Gomes (2022) em seu levantamento do preço de equipamentos para a análise de viabilidade econômica do uso do biogás, com custos de R\$ 5.134.212,182 para seu biodigestor CSTR e de R\$ 5.094.037,688 para seu sistema de motores-geradores, ambos correspondendo cerca de 33% de todo o investimento do projeto. O preço das unidades de motogeração para o cenário 1 deste trabalho representou cerca de 23% do investimento total. Segundo Probiogás (2015b) o preço dessas unidades em plantas de biogás costuma girar em torno de 34% de todo o investimento inicial.

Os sistemas de tratamento de biogás também apresentaram valores significativos em relação ao investimento total. O sistema de “upgrading” cotado em R\$4.666.472,00 para os cenários 2 e 3 resultou em cerca de 19,5% do investimento inicial. Miki *et al.* (2019), em seu sistema de purificação do biogás gerado em ETE, com uma capacidade de produção de 1.500 a 1.700 m<sup>3</sup>/dia de biometano, realizaram um investimento da ordem de R\$ 7.377.639,46. Apesar de ter um valor elevado, os sistemas de tratamento utilizados nesse projeto contam com projeto de engenharia básica, projeto de engenharia executiva, equipamentos, materiais de consumo iniciais, construção civil, montagem eletromecânica, serviços técnicos necessários (especializados e auxiliares), comissionamento e partida assistida até a produção plena de biometano.

Peixe (2018), ao levantar os valores de investimento para a análise econômica da queima de biogás a partir de usina sucroenergética, chegou em um investimento da ordem de 36 milhões de reais tratando cerca de 110 toneladas de matéria orgânica por reator. Já Costa (2020), em sua análise de viabilidade econômica para o tratamento da FORSU proveniente da CTR Pernambuco, chegou em um investimento de aproximadamente 58 milhões de reais.

## **5.6 Custo de operação**

Os custos de operação e manutenção de um empreendimento são essenciais para o cálculo de sua viabilidade econômica, sendo descontados anualmente durante o período analisado e se dividindo em fixos e variáveis. A Tabela 15 mostra o resultado dos custos fixos levantados para uma planta de produção de biogás. Nos custos fixos de operação referentes à manutenção das instalações de gás estão inclusos a reposição de material e a contratação de empresas e pessoal especializado na reparação e manutenção dos equipamentos.

Tabela 15 – Custos fixos de operação.

<b>Custos fixos de operação</b>	<b>Custo unitário</b>	<b>Custo fixo anual cenário 1</b>	<b>Custo fixo anual cenários 2 e 3</b>
<b>Manutenção do gasômetro</b>	2% do Capex	R\$541.958,37	R\$467.123,30
<b>Manutenção das tubulações</b>	2% do Capex	R\$541.958,37	R\$467.123,30
<b>Manutenção das instalações elétricas</b>	2% do Capex	R\$541.958,37	R\$467.123,30
<b>Manutenção da medição e composição do biogás</b>	2% do Capex	R\$541.958,37	R\$467.123,30
<b>Manutenção da medição da vazão de biogás</b>	2% do Capex	R\$541.958,37	R\$467.123,30
<b>Manutenção do flare (Queimador de biogás)</b>	R\$ 8.400	R\$ 8.400	R\$ 8.400
<b>Consumo de óleo lubrificante</b>	R\$ 336.345,73	R\$ 336.345,73	-
<b>Análises laboratoriais - óleo lubrificante</b>	R\$ 5.220,00	R\$ 5.220,00	-
<b>Mão de obra dos operadores</b>	R\$ 530.200,20	R\$ 530.200,20	R\$ 530.200,20
<b>Total</b>	-	R\$ 3.589.957,77	R\$2.874.216,68

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Probiogás (2017) ressalta a falta de experiências e estudos em usinas brasileiras no levantamento e detalhamento desses custos de operação. Micuanski (2014) definiu o custo de operação para uma usina de geração de biogás a partir de resíduo orgânico vinhaça em 2,5% do investimento inicial. Já Costa (2020) afirma que custos de manutenção não detêm um valor específico, avaliando-se que gire em torno de 5% do valor total investido na implantação. Devido a isso, o delineamento dos custos de operação e manutenção utilizados neste trabalho foram baseados em experiências e projetos de usinas de geração de biogás alemãs já consolidadas levantados por Probiogás (2016b) elencados nas Tabelas 15 e 16.

Os custos variáveis de operação envolvem manutenções no sistema de motogeração e a manutenção do sistema de tratamento do biogás, que consiste na reposição dos materiais de consumo e a manutenção preventiva e corretiva dos sistemas de biodessulfurização e refrigeração. O custo referente ao sistema de tratamento do biogás é de 0,035 R\$/m<sup>3</sup>, já os custos variáveis de manutenção e reparação do sistema de moto-geração foram de 0,0210 R\$/kWh e 0,0315 R\$/kWh respectivamente (PROBIOGÁS, 2017). A Tabela 16 mostra os custos variáveis de operação para os cenários estudados, onde para o cenário 1 foram considerados todos os custos variáveis. Já para os cenários 2 e 3 foi considerado apenas o custo de manutenção do sistema de tratamento de biogás, já que não possuem sistemas de motogeração.

Tabela 16 – Custos variáveis de operação.

Ano	Autoconsumo de energia do CHP	Manutenção do sistema de tratamento	Manutenção do sistema de motogeração	Reparação do sistema de motogeração	Total Cenário 1	Total Cenários 2 e 3
2023	R\$444.782,74	R\$ 378.146,51	R\$467.021,87	R\$700.532,81	R\$1.990.483,94	R\$ 378.146,51
2024	R\$455.340,84	R\$ 386.395,03	R\$478.107,88	R\$717.161,82	R\$2.037.005,58	R\$ 386.395,03
2025	R\$466.147,47	R\$ 394.837,71	R\$489.454,84	R\$734.182,26	R\$2.084.622,28	R\$ 394.837,71
2026	R\$477.208,90	R\$ 403.479,46	R\$501.069,35	R\$751.604,02	R\$2.133.361,73	R\$ 403.479,46
2027	R\$488.531,59	R\$ 412.325,31	R\$512.958,17	R\$769.437,26	R\$2.183.252,33	R\$ 412.325,31
2028	R\$500.122,16	R\$ 421.380,44	R\$525.128,27	R\$787.692,41	R\$2.234.323,28	R\$ 421.380,44
2029	R\$511.987,43	R\$ 430.650,18	R\$537.586,80	R\$806.380,20	R\$2.286.604,60	R\$ 430.650,18
2030	R\$553.758,97	R\$ 463.284,20	R\$581.446,92	R\$872.170,38	R\$2.470.660,46	R\$ 463.284,20
2031	R\$566.833,33	R\$ 473.498,54	R\$595.175,00	R\$892.762,50	R\$2.528.269,37	R\$ 473.498,54
2032	R\$580.217,73	R\$ 483.955,10	R\$609.228,61	R\$913.842,92	R\$2.587.244,36	R\$ 483.955,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

É notável como as unidades de moto-geração influenciam no aumento do custo operacional de uma planta de biogás que produz energia elétrica, influenciando tanto os custos fixos como variáveis, chegando para esse trabalho a representar cerca de 80% do custo total variável para o cenário 1. As unidades de moto-geração necessitam de trocas constantes de óleo lubrificante e são muito suscetíveis a apresentarem problemas caso não aconteça a purificação adequada do biogás pela retirada de H<sub>2</sub>S e siloxanos e outras impurezas.

### 5.7 Redução das emissões de carbono

A Tabela 17 mostra a intensidade de carbono, a nota de eficiência e a intensidade da redução de emissões de gás carbônico, calculados pela ferramenta RenovaCalc, utilizando a rota de produção de biometano. Durante os anos de projeto, a redução das emissões de carbono variou de 91% a 90% se comparada com a intensidade de carbono de referência (86,70 gCO<sub>2</sub>eq/MJ).



Tabela 17 – Resultado da redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

Ano	Biomassa (t/ano)	Biometano (m <sup>3</sup> /ano)	Potencial energético (MJ/ano)	Intensidade de carbono (gCO <sub>2</sub> eq/MJ)	Nota de Eficiência (gCO <sub>2</sub> eq/MJ)	Redução de emissões de CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> /ano)
2023	72.928,26	4.730.400	165.989.736	10,93	75,77	12.577,04
2024	74.519,04	4.730.400	165.989.736	11,09	75,61	12.550,48
2025	76.147,27	4.730.400	165.989.736	11,26	75,44	12.522,27
2026	77.813,89	4.730.400	165.989.736	11,42	75,28	12.495,71
2027	79.519,88	4.730.400	165.989.736	11,60	75,10	12.465,83
2028	81.266,23	4.730.400	165.989.736	11,77	74,93	12.437,61
2029	83.053,96	4.730.400	165.989.736	11,96	74,74	12.406,07
2030	89.347,67	4.730.400	165.989.736	12,59	74,11	12.301,50
2031	91.317,58	4.730.400	165.989.736	12,79	73,91	12.268,30
2032	93.334,20	4.730.400	165.989.736	13,00	73,70	12.233,44

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

## 5.8 Análise econômica

Os custos de tratamento do digestato produzido pelos biodigestores e a possível receita gerada pela sua venda não foram considerados na análise de viabilidade econômica deste trabalho devido a dificuldades no dimensionamento e levantamento de preços. Portanto, do ponto de vista técnico, foi considerado que todo o digestato produzido pela usina seria destinado à adubação e fertirrigação de áreas de cultivo próximas à região do consórcio.

### 5.8.1 Receitas

As receitas para os 3 cenários estão mostradas na Tabela 18. Para o preço de venda de energia elétrica, foi tomado como base leilão de energia realizado pela ANEEL em 2021 como fonte de biomassa, com o valor de 490,37 R\$/MWh. Para o cenário 2, foi utilizado o valor de 2,5 R\$/Nm<sup>3</sup>, preço sugerido, pois os valores reais são estabelecidos pelo setor de compras da Concessionária, calculados a partir da soma entre os valores da parcela de transporte (PT) e da parcela de molécula (PM). Todavia a Concessionária deixa público os contratos de compra, que podem ser encontrados no site da ANP, e os valores das tarifas para os vários setores e demandas de contratação, que estão em valores mínimos de 4,00 R\$/Nm<sup>3</sup>

(CEGÁS, 2022b). Para o cenário 3, foi utilizado o preço médio ponderado ao consumidor final para o GNV no Ceará em agosto de 2022 de 4,85 R\$/Nm<sup>3</sup>.

A receita para o crédito de carbono foi calculada com base na quantidade de créditos de descarbonização emitidas por ano, onde um CBIO corresponde a uma tonelada de gás carbônico. O valor utilizado foi de 74,37 R\$/CBIO, valor médio referente a primeira quinzena de setembro de 2022 segundo a bolsa de valores do Brasil (B3). Devido a imprevisibilidade do mercado, variação do preço dos créditos de carbono ao longo do tempo e dificuldades de se estabelecer um preço fixo, esse valor foi usado na análise econômica para todos os anos de projeto onde foi considerado sua receita.

Uma receita interessante de ser analisada, que alguns trabalhos de viabilidade técnico-econômica não levam em consideração, é o ganho referente ao custo evitado na disposição dos resíduos orgânicos no aterro sanitário do consórcio e seu efeito. Os municípios integrantes do CGIRS-RMS pagam, em média, cerca de R\$ 61,09 para cada tonelada depositada. Portanto, a partir da quantidade de resíduo orgânico estimada (Tabela 10), foi calculada essa receita.

Tabela 18 – Receitas anuais de venda para os cenários 1, 2 e 3.

<b>Ano</b>	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Receita referente à venda de créditos de carbono</b>	<b>Receita referente a não disposição do resíduo</b>
<b>2023</b>	R\$10.897.177,08	R\$11.826.000,00	R\$ 22.942.440,00	R\$ 935.354,64	R\$4.455.187,18
<b>2024</b>	R\$11.155.850,58	R\$11.826.000,00	R\$ 22.942.440,00	R\$ 933.379,49	R\$4.552.368,26
<b>2025</b>	R\$11.420.612,99	R\$11.826.000,00	R\$ 22.942.440,00	R\$ 931.280,90	R\$4.651.836,89
<b>2026</b>	R\$11.691.618,12	R\$11.826.000,00	R\$ 22.942.440,00	R\$ 929.305,75	R\$4.753.650,84
<b>2027</b>	R\$11.969.024,00	R\$11.826.000,00	R\$ 22.942.440,00	R\$ 927.083,72	R\$4.857.869,50
<b>2028</b>	R\$12.252.993,01	R\$11.826.000,00	R\$ 22.942.440,00	R\$ 924.985,12	R\$4.964.553,85
<b>2029</b>	R\$12.543.691,97	R\$11.826.000,00	R\$ 22.942.440,00	R\$ 922.639,64	R\$5.073.766,59
<b>2030</b>	R\$13.567.094,78	R\$11.826.000,00	R\$ 22.942.440,00	R\$ 914.862,51	R\$5.458.248,93
<b>2031</b>	R\$13.887.416,62	R\$11.826.000,00	R\$ 22.942.440,00	R\$ 912.393,57	R\$5.578.590,69
<b>2032</b>	R\$14.215.334,33	R\$11.826.000,00	R\$ 22.942.440,00	R\$ 909.801,20	R\$5.701.786,15

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

### ***5.8.2 Fluxos de caixa e demonstrativo de resultado de exercício***

A partir do demonstrativo de resultado de exercício foram calculados os fluxos de caixa para os anos de operação do projeto. O fluxo de caixa para cada cenário foi montado considerando o investimento inicial (CAPEX) como o ano zero.

Para o resultado do DRE de cada um dos cenários, foram analisados 4 casos: análise econômica sem receitas adicionais (Caso 1), análise econômica considerando a receita da não disposição dos resíduos orgânicos no aterro sanitário (Caso 2), análise econômica considerando a receita da venda de créditos de carbono (Caso 3) e, por fim, a análise econômica considerando tanto a receita da não disposição dos resíduos orgânicos no aterro como a venda de créditos de carbono (Caso 4). Os valores da receita da não disposição dos resíduos e da venda de créditos de carbono, quando considerados na análise econômica, foram somados ao lucro líquido após os descontos dos custos de operação e descontos sobre o imposto de renda. Os resultados do demonstrativo de resultado e exercício para cada cenário e seus respectivos fluxos de caixa podem ser observados nas Tabelas 19, 20 e 21.

No DRE não foi considerada nenhuma amortização e nem nenhum tipo de investimento. Como foi considerado que o empreendimento entrará no Reidi, não houve o desconto de impostos como PIS e Cofins. Já os valores para IRPJ e CSLL foram retirados da INSTRUÇÃO NORMATIVA RFB Nº 1700, DE 14 DE MARÇO DE 2017, que dispõe sobre a determinação e o pagamento do imposto sobre a renda e da contribuição social sobre o lucro líquido das pessoas jurídicas e disciplina o tratamento tributário da Contribuição para o PIS/Pasep. Para tanto, seus valores foram de 25% e 9% respectivamente.

Tabela 19 – Resultado do demonstrativo de resultado de exercício para o cenário 1.

Descrição	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
<b>Receita Bruta</b>	R\$11.535.367,23	R\$11.788.153,03	R\$12.046.920,51	R\$12.311.821,55	R\$12.583.012,18	R\$12.860.652,74	R\$13.144.908,01	R\$14.161.749,78	R\$14.475.391,11	R\$14.796.506,65
<b>(-) impostos</b>										
<b>Receita Líquida</b>	R\$11.535.367,23	R\$11.788.153,03	R\$12.046.920,51	R\$12.311.821,55	R\$12.583.012,18	R\$12.860.652,74	R\$13.144.908,01	R\$14.161.749,78	R\$14.475.391,11	R\$14.796.506,65
<b>Custo Variável</b>	R\$1.932.338,08	R\$1.977.800,84	R\$2.024.339,38	R\$2.071.981,02	R\$2.120.753,82	R\$2.170.686,63	R\$2.221.809,07	R\$2.404.684,95	R\$2.461.092,38	R\$2.518.844,03
<b>Custo Fixo</b>	R\$3.589.957,77	R\$3.589.957,77	R\$3.589.957,77	R\$3.589.957,77	R\$3.589.957,77	R\$3.589.957,77	R\$3.589.957,77	R\$3.589.957,77	R\$3.589.957,77	R\$3.589.957,77
<b>Lucro bruto</b>	R\$6.349.417,11	R\$6.556.740,15	R\$6.768.969,10	R\$6.986.228,50	R\$7.208.646,32	R\$7.436.354,07	R\$7.669.486,91	R\$8.503.452,80	R\$8.760.686,69	R\$9.024.050,59
<b>Depreciação</b>	R\$601.307,14	R\$622.039,44	R\$643.262,34	R\$664.988,28	R\$687.230,06	R\$710.000,83	R\$733.314,12	R\$816.710,71	R\$842.434,10	R\$868.770,49
<b>Lucro Antes do IR</b>	R\$5.411.764,24	R\$5.598.354,98	R\$5.789.361,03	R\$5.984.894,49	R\$6.185.070,53	R\$6.390.007,51	R\$6.599.827,06	R\$7.350.396,36	R\$7.581.906,86	R\$7.818.934,37
<b>IRPJ</b>	R\$1.352.941,06	R\$1.399.588,75	R\$1.447.340,26	R\$1.496.223,62	R\$1.546.267,63	R\$1.597.501,88	R\$1.649.956,76	R\$1.837.599,09	R\$1.895.476,72	R\$1.954.733,59
<b>CSLL</b>	R\$487.058,78	R\$503.851,95	R\$521.042,49	R\$538.640,50	R\$556.656,35	R\$575.100,68	R\$593.984,44	R\$661.535,67	R\$682.371,62	R\$703.704,09
<b>Lucro Após IR</b>	R\$3.571.764,40	R\$3.694.914,29	R\$3.820.978,28	R\$3.950.030,36	R\$4.082.146,55	R\$4.217.404,96	R\$4.355.885,86	R\$4.851.261,60	R\$5.004.058,53	R\$5.160.496,69
<b>(-) Amortização</b>										
<b>(-) investimentos</b>										
<b>Fluxo de caixa Caso 1</b>	R\$3.158.140,81	R\$3.284.159,02	R\$3.413.143,56	R\$3.545.169,38	R\$3.680.313,46	R\$3.818.654,90	R\$3.960.274,98	R\$4.458.847,07	R\$4.614.898,55	R\$4.774.650,53
<b>Fluxo de caixa Caso 2</b>	R\$7.613.327,99	R\$7.836.527,28	R\$8.064.980,45	R\$8.298.820,23	R\$8.538.182,96	R\$8.783.208,76	R\$9.034.041,57	R\$9.917.096,00	R\$10.193.489,24	R\$10.476.436,68
<b>Fluxo de caixa Caso 3</b>	R\$4.093.495,45	R\$4.217.538,51	R\$4.344.424,46	R\$4.474.475,14	R\$4.607.397,18	R\$4.743.640,03	R\$4.882.914,62	R\$5.373.709,57	R\$5.527.292,13	R\$5.684.451,72
<b>Fluxo de caixa Caso 4</b>	R\$8.548.682,62	R\$8.769.906,77	R\$8.996.261,35	R\$9.228.125,98	R\$9.465.266,68	R\$9.708.193,88	R\$9.956.681,21	R\$10.831.958,51	R\$11.105.882,82	R\$11.386.237,87

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Tabela 20 – Resultado do demonstrativo de resultado de exercício para o cenário 2.

Descrição	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
<b>Receita Bruta</b>	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00
<b>(-) impostos</b>										
<b>Receita Líquida</b>	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00	R\$11.826.000,00
<b>Custo Variável</b>	R\$367.836,97	R\$375.897,74	R\$384.149,25	R\$392.596,35	R\$401.244,01	R\$410.097,34	R\$419.161,61	R\$451.586,41	R\$461.587,73	R\$471.827,38
<b>Custo Fixo</b>	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68
<b>Lucro bruto</b>	R\$8.583.946,36	R\$8.575.885,59	R\$8.567.634,07	R\$8.559.186,97	R\$8.550.539,31	R\$8.541.685,98	R\$8.532.621,71	R\$8.500.196,91	R\$8.490.195,60	R\$8.479.955,94
<b>Depreciação</b>	R\$858.394,64	R\$857.588,56	R\$856.763,41	R\$855.918,70	R\$855.053,93	R\$854.168,60	R\$853.262,17	R\$850.019,69	R\$849.019,56	R\$847.995,59
<b>Lucro Antes do IR</b>	R\$7.725.551,72	R\$7.718.297,03	R\$7.710.870,66	R\$7.703.268,27	R\$7.695.485,38	R\$7.687.517,38	R\$7.679.359,54	R\$7.650.177,22	R\$7.641.176,04	R\$7.631.960,35
<b>IRPJ</b>	R\$1.931.387,93	R\$1.929.574,26	R\$1.927.717,67	R\$1.925.817,07	R\$1.923.871,35	R\$1.921.879,34	R\$1.919.839,89	R\$1.912.544,31	R\$1.910.294,01	R\$1.907.990,09
<b>CSSL</b>	R\$695.299,65	R\$694.646,73	R\$693.978,36	R\$693.294,14	R\$692.593,68	R\$691.876,56	R\$691.142,36	R\$688.515,95	R\$687.705,84	R\$686.876,43
<b>Lucro Após IR</b>	R\$5.098.864,14	R\$5.094.076,04	R\$5.089.174,64	R\$5.084.157,06	R\$5.079.020,35	R\$5.073.761,47	R\$5.068.377,30	R\$5.049.116,97	R\$5.043.176,18	R\$5.037.093,83
<b>(-) Amortização</b>										
<b>(-) investimentos</b>										
<b>Fluxo de caixa Caso 1</b>	R\$5.092.740,26	R\$5.087.840,64	R\$5.082.825,69	R\$5.077.692,50	R\$5.072.438,06	R\$5.067.059,31	R\$5.061.553,09	R\$5.042.168,48	R\$5.036.101,16	R\$5.029.889,96
<b>Fluxo de caixa Caso 2</b>	R\$9.547.927,44	R\$9.640.208,90	R\$9.734.662,58	R\$9.831.343,34	R\$9.930.307,56	R\$10.031.613,17	R\$10.135.319,68	R\$10.500.417,42	R\$10.614.691,85	R\$10.731.676,11
<b>Fluxo de caixa Caso 3</b>	R\$6.028.094,90	R\$6.021.220,14	R\$6.014.106,59	R\$6.006.998,25	R\$5.999.521,78	R\$5.992.044,44	R\$5.984.192,73	R\$5.957.030,99	R\$5.948.494,73	R\$5.939.691,16
<b>Fluxo de caixa Caso 4</b>	R\$10.483.282,08	R\$10.573.588,39	R\$10.665.943,48	R\$10.760.649,09	R\$10.857.391,28	R\$10.956.598,29	R\$11.057.959,32	R\$11.415.279,92	R\$11.527.085,43	R\$11.641.477,31

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Tabela 21 – Resultado do demonstrativo de resultado de exercício para o cenário 3.

Descrição	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
<b>Receita Bruta</b>	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00
<b>(-) impostos</b>											
<b>Receita Líquida</b>	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00	R\$22.942.440,00
<b>Custo Variável</b>	R\$367.836,97	R\$375.897,74	R\$384.149,25	R\$392.596,35	R\$401.244,01	R\$410.097,34	R\$419.161,61	R\$451.586,41	R\$461.587,73	R\$471.827,38	
<b>Custo Fixo</b>	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68	R\$2.874.216,68
<b>Lucro bruto</b>	R\$19.700.386,36	R\$19.692.325,59	R\$19.684.074,07	R\$19.675.626,97	R\$19.666.979,31	R\$19.658.125,98	R\$19.649.061,71	R\$19.616.636,91	R\$19.606.635,60	R\$19.596.395,94	
<b>Depreciação</b>	R\$1.970.038,64	R\$1.969.232,56	R\$1.968.407,41	R\$1.967.562,70	R\$1.966.697,93	R\$1.965.812,60	R\$1.964.906,17	R\$1.961.663,69	R\$1.960.663,56	R\$1.959.639,59	
<b>Lucro Antes do IR</b>	R\$17.730.347,72	R\$17.723.093,03	R\$17.715.666,66	R\$17.708.064,27	R\$17.700.281,38	R\$17.692.313,38	R\$17.684.155,54	R\$17.654.973,22	R\$17.645.972,04	R\$17.636.756,35	
<b>IRPJ</b>	R\$4.432.586,93	R\$4.430.773,26	R\$4.428.916,67	R\$4.427.016,07	R\$4.425.070,35	R\$4.423.078,34	R\$4.421.038,89	R\$4.413.743,31	R\$4.411.493,01	R\$4.409.189,09	
<b>CSLL</b>	R\$1.595.731,29	R\$1.595.078,37	R\$1.594.410,00	R\$1.593.725,78	R\$1.593.025,32	R\$1.592.308,20	R\$1.591.574,00	R\$1.588.947,59	R\$1.588.137,48	R\$1.587.308,07	
<b>Lucro Após IR</b>	R\$11.702.029,50	R\$11.697.241,40	R\$11.692.340,00	R\$11.687.322,42	R\$11.682.185,71	R\$11.676.926,83	R\$11.671.542,66	R\$11.652.282,33	R\$11.646.341,54	R\$11.640.259,19	
<b>(-) Amortização</b>											
<b>(-) investimentos</b>											
<b>Fluxo de caixa Caso 1</b>	R\$11.695.905,62	R\$11.691.006,00	R\$11.685.991,05	R\$11.680.857,86	R\$11.675.603,42	R\$11.670.224,67	R\$11.664.718,45	R\$11.645.333,84	R\$11.639.266,52	R\$11.633.055,32	
<b>Fluxo de caixa Caso 2</b>	R\$16.151.092,80	R\$16.243.374,26	R\$16.337.827,94	R\$16.434.508,70	R\$16.533.472,92	R\$16.634.778,53	R\$16.738.485,04	R\$17.103.582,78	R\$17.217.857,21	R\$17.334.841,47	
<b>Fluxo de caixa Caso 3</b>	R\$12.631.260,26	R\$12.624.385,50	R\$12.617.271,95	R\$12.610.163,61	R\$12.602.687,14	R\$12.595.209,80	R\$12.587.358,09	R\$12.560.196,35	R\$12.551.660,09	R\$12.542.856,52	
<b>Fluxo de caixa Caso 4</b>	R\$17.086.447,44	R\$17.176.753,75	R\$17.269.108,84	R\$17.363.814,45	R\$17.460.556,64	R\$17.559.763,65	R\$17.661.124,68	R\$18.018.445,28	R\$18.130.250,79	R\$18.244.642,67	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

### 5.8.3 Valor presente líquido, taxa interna de retorno e payback

O valor presente acumulado é a soma dos valores presentes durante o período. Para o cálculo do valor presente (VP), o investimento inicial é considerado como negativo, representando o ano zero. As Tabelas 22, 23, 24 e 25 trazem o resultado da análise dos valores presentes para todos os 3 cenários em cada um dos quatro casos analisados.

- Caso 1: Análise econômica sem receitas adicionais;
- Caso 2: Análise econômica considerando a receita da não disposição dos resíduos orgânicos no aterro sanitário;
- Caso 3: Análise econômica considerando a receita da venda de créditos de carbono;
- Caso 4: Análise econômica considerando receita da venda de créditos de carbono e da não disposição dos resíduos orgânicos.

Tabela 22 – Fluxos de caixa, valores presentes e valores presentes acumulados dos cenários 1, 2 e 3 para o caso 1.

Ano	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3		
	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado
0	-R\$27.097.918,38	-R\$27.097.918,38	-R\$27.097.918,38	-R\$23.356.164,78	-R\$23.356.164,78	-R\$23.356.164,78	-R\$23.356.164,78	-R\$23.356.164,78	-R\$23.356.164,78
1	R\$ 3.158.140,81	R\$2.770.298,96	-R\$24.327.619,42	R\$ 5.092.740,26	R\$4.467.316,02	-R\$18.888.848,76	R\$ 11.695.905,62	R\$10.259.566,34	-R\$13.096.598,44
2	R\$ 3.284.159,02	R\$2.527.053,72	-R\$21.800.565,70	R\$ 5.087.840,64	R\$3.914.928,17	-R\$14.973.920,59	R\$ 11.691.006,00	R\$8.995.849,50	-R\$4.100.748,95
3	R\$ 3.413.143,56	R\$2.303.774,69	-R\$19.496.791,01	R\$ 5.082.825,69	R\$3.430.762,56	-R\$11.543.158,03	R\$ 11.685.991,05	R\$7.887.711,10	R\$3.786.962,15
4	R\$ 3.545.169,38	R\$2.099.024,87	-R\$17.397.766,14	R\$ 5.077.692,50	R\$3.006.401,58	-R\$8.536.756,45	R\$ 11.680.857,86	R\$6.916.005,56	R\$10.702.967,71
5	R\$ 3.680.313,46	R\$1.911.439,49	-R\$15.486.326,66	R\$ 5.072.438,06	R\$2.634.465,38	-R\$5.902.291,07	R\$ 11.675.603,42	R\$6.063.942,55	R\$16.766.910,27
6	R\$ 3.818.654,90	R\$1.739.727,80	-R\$13.746.598,85	R\$ 5.067.059,31	R\$2.308.484,06	-R\$3.593.807,01	R\$ 11.670.224,67	R\$5.316.797,37	R\$22.083.707,64
7	R\$ 3.960.274,98	R\$1.582.673,69	-R\$12.163.925,16	R\$ 5.061.553,09	R\$2.022.785,52	-R\$1.571.021,48	R\$ 11.664.718,45	R\$4.661.656,85	R\$26.745.364,48
8	R\$ 4.458.847,07	R\$1.563.089,21	-R\$10.600.835,95	R\$ 5.042.168,48	R\$1.767.577,82	R\$196.556,33	R\$ 11.645.333,84	R\$4.082.377,22	R\$30.827.741,71
9	R\$ 4.614.898,55	R\$1.419.117,96	-R\$9.181.717,99	R\$ 5.036.101,16	R\$1.548.641,11	R\$1.745.197,44	R\$ 11.639.266,52	R\$3.579.166,90	R\$34.406.908,61
10	R\$ 4.774.650,53	R\$1.287.932,42	-R\$7.893.785,56	R\$ 5.029.889,96	R\$1.356.781,68	R\$3.101.979,12	R\$ 11.633.055,32	R\$3.137.944,66	R\$37.544.853,27

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Tabela 23 – Fluxos de caixa, valores presentes e valores presentes acumulados dos cenários 1, 2 e 3 para o caso 2.

Ano	Cenário 1				Cenário 2				Cenário 3			
	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado		Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado		Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado	
<b>0</b>	<b>-R\$27.097.918,38</b>	<b>-R\$27.097.918,38</b>	<b>-R\$27.097.918,38</b>		<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>		<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	
<b>1</b>	R\$ 7.613.327,99	R\$6.678.357,88	<b>-R\$20.419.560,50</b>		R\$9.547.927,44	R\$8.375.374,95	<b>-R\$14.980.789,83</b>		R\$ 16.151.092,80	R\$14.167.625,26	<b>-R\$9.188.539,52</b>	
<b>2</b>	R\$ 7.836.527,28	R\$6.029.953,28	<b>-R\$14.389.607,22</b>		R\$9.640.208,90	R\$7.417.827,72	<b>-R\$7.562.962,11</b>		R\$ 16.243.374,26	R\$12.498.749,05	R\$3.310.209,53	
<b>3</b>	R\$ 8.064.980,45	R\$5.443.632,08	<b>-R\$8.945.975,14</b>		R\$9.734.662,58	R\$6.570.619,96	<b>-R\$992.342,15</b>		R\$ 16.337.827,94	R\$11.027.568,50	R\$14.337.778,03	
<b>4</b>	R\$ 8.298.820,23	R\$4.913.567,78	<b>-R\$4.032.407,36</b>		R\$9.831.343,34	R\$5.820.944,49	R\$4.828.602,34		R\$ 16.434.508,70	R\$9.730.548,47	R\$24.068.326,50	
<b>5</b>	R\$ 8.538.182,96	R\$4.434.464,68	R\$402.057,32		R\$9.930.307,56	R\$5.157.490,57	R\$9.986.092,91		R\$ 16.533.472,92	R\$8.586.967,75	R\$32.655.294,25	
<b>6</b>	R\$ 8.783.208,76	R\$4.001.511,75	R\$4.403.569,08		R\$10.031.613,17	R\$4.570.268,01	R\$14.556.360,92		R\$ 16.634.778,53	R\$7.578.581,32	R\$40.233.875,57	
<b>7</b>	R\$ 9.034.041,57	R\$3.610.340,19	R\$8.013.909,26		R\$10.135.319,68	R\$4.050.452,02	R\$18.606.812,94		R\$ 16.738.485,04	R\$6.689.323,34	R\$46.923.198,91	
<b>8</b>	R\$ 9.917.096,00	R\$3.476.527,80	R\$11.490.437,07		R\$10.500.417,42	R\$3.681.016,40	R\$22.287.829,35		R\$ 17.103.582,78	R\$5.995.815,81	R\$52.919.014,72	
<b>9</b>	R\$ 10.193.489,24	R\$3.134.578,91	R\$14.625.015,97		R\$10.614.691,85	R\$3.264.102,06	R\$25.551.931,40		R\$ 17.217.857,21	R\$5.294.627,85	R\$58.213.642,57	
<b>10</b>	R\$ 10.476.436,68	R\$2.825.953,94	R\$17.450.969,91		R\$10.731.676,11	R\$2.894.803,20	R\$28.446.734,60		R\$ 17.334.841,47	R\$4.675.966,18	R\$62.889.608,75	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).



Tabela 24 – Fluxos de caixa, valores presentes e valores presentes acumulados dos cenários 1, 2 e 3 para o caso 3.

Ano	Cenário 1				Cenário 2				Cenário 3			
	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado		Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado		Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado	
<b>0</b>	<b>-R\$27.097.918,38</b>	<b>-R\$27.097.918,38</b>	<b>-R\$27.097.918,38</b>		<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>		<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	
<b>1</b>	R\$ 4.093.495,45	R\$3.590.785,48	<b>-R\$23.507.132,90</b>		R\$6.028.094,90	R\$5.287.802,54	<b>-R\$18.068.362,24</b>		R\$ 12.631.260,26	R\$11.080.052,86	<b>-R\$12.276.111,92</b>	
<b>2</b>	R\$ 4.217.538,51	R\$3.245.258,93	<b>-R\$20.261.873,97</b>		R\$6.021.220,14	R\$4.633.133,38	<b>-R\$13.435.228,86</b>		R\$ 12.624.385,50	R\$9.714.054,71	<b>-R\$2.562.057,22</b>	
<b>3</b>	R\$ 4.344.424,46	R\$2.932.362,77	<b>-R\$17.329.511,20</b>		R\$6.014.106,59	R\$4.059.350,65	<b>-R\$9.375.878,22</b>		R\$ 12.617.271,95	R\$8.516.299,18	R\$5.954.241,96	
<b>4</b>	R\$ 4.474.475,14	R\$2.649.248,48	<b>-R\$14.680.262,72</b>		R\$6.006.998,25	R\$3.556.625,19	<b>-R\$5.819.253,03</b>		R\$ 12.610.163,61	R\$7.466.229,17	R\$13.420.471,13	
<b>5</b>	R\$ 4.607.397,18	R\$2.392.937,72	<b>-R\$12.287.325,00</b>		R\$5.999.521,78	R\$3.115.963,61	<b>-R\$2.703.289,41</b>		R\$ 12.602.687,14	R\$6.545.440,79	R\$19.965.911,92	
<b>6</b>	R\$ 4.743.640,03	R\$2.161.138,58	<b>-R\$10.126.186,42</b>		R\$5.992.044,44	R\$2.729.894,84	R\$26.605,43		R\$ 12.595.209,80	R\$5.738.208,15	R\$25.704.120,07	
<b>7</b>	R\$ 4.882.914,62	R\$1.951.394,93	<b>-R\$8.174.791,49</b>		R\$5.984.192,73	R\$2.391.506,76	R\$2.418.112,18		R\$ 12.587.358,09	R\$5.030.378,08	R\$30.734.498,15	
<b>8</b>	R\$ 5.373.709,57	R\$1.883.802,55	<b>-R\$6.290.988,95</b>		R\$5.957.030,99	R\$2.088.291,15	R\$4.506.403,34		R\$ 12.560.196,35	R\$4.403.090,56	R\$35.137.588,71	
<b>9</b>	R\$ 5.527.292,13	R\$1.699.686,23	<b>-R\$4.591.302,71</b>		R\$5.948.494,73	R\$1.829.209,38	R\$6.335.612,72		R\$ 12.551.660,09	R\$3.859.735,18	R\$38.997.323,89	
<b>10</b>	R\$ 5.684.451,72	R\$1.533.345,66	<b>-R\$3.057.957,05</b>		R\$5.939.691,16	R\$1.602.194,92	R\$7.937.807,64		R\$ 12.542.856,52	R\$3.383.357,90	R\$42.380.681,79	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Tabela 25 – Fluxos de caixa, valores presentes e valores presentes acumulados dos cenários 1, 2 e 3 para o caso 4.

Ano	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3		
	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado
<b>0</b>	<b>-R\$27.097.918,38</b>	<b>-R\$27.097.918,38</b>	<b>-R\$27.097.918,38</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>	<b>-R\$23.356.164,78</b>
<b>1</b>	R\$ 8.548.682,62	R\$7.498.844,41	<b>-R\$19.599.073,97</b>	R\$10.483.282,08	R\$9.195.861,47	<b>-R\$14.160.303,31</b>	R\$ 17.086.447,44	R\$14.988.111,79	<b>-R\$8.368.052,99</b>
<b>2</b>	R\$ 8.769.906,77	R\$6.748.158,49	<b>-R\$12.850.915,49</b>	R\$10.573.588,39	R\$8.136.032,93	<b>-R\$6.024.270,38</b>	R\$ 17.176.753,75	R\$13.216.954,26	R\$4.848.901,26
<b>3</b>	R\$ 8.996.261,35	R\$6.072.220,16	<b>-R\$6.778.695,33</b>	R\$10.665.943,48	R\$7.199.208,04	R\$1.174.937,66	R\$ 17.269.108,84	R\$11.656.156,58	R\$16.505.057,84
<b>4</b>	R\$ 9.228.125,98	R\$5.463.791,39	<b>-R\$1.314.903,94</b>	R\$10.760.649,09	R\$6.371.168,10	R\$7.546.105,76	R\$ 17.363.814,45	R\$10.280.772,08	R\$26.785.829,92
<b>5</b>	R\$ 9.465.266,68	R\$4.915.962,91	R\$3.601.058,98	R\$10.857.391,28	R\$5.638.988,81	R\$13.185.094,57	R\$ 17.460.556,64	R\$9.068.465,98	R\$35.854.295,90
<b>6</b>	R\$ 9.708.193,88	R\$4.422.922,53	R\$8.023.981,51	R\$10.956.598,29	R\$4.991.678,79	R\$18.176.773,36	R\$ 17.559.763,65	R\$7.999.992,10	R\$43.854.288,00
<b>7</b>	R\$ 9.956.681,21	R\$3.979.061,42	R\$12.003.042,93	R\$11.057.959,32	R\$4.419.173,25	R\$22.595.946,61	R\$ 17.661.124,68	R\$7.058.044,58	R\$50.912.332,58
<b>8</b>	R\$ 10.831.958,51	R\$3.797.241,14	R\$15.800.284,07	R\$11.415.279,92	R\$4.001.729,74	R\$26.597.676,35	R\$ 18.018.445,28	R\$6.316.529,15	R\$57.228.861,72
<b>9</b>	R\$ 11.105.882,82	R\$3.415.147,18	R\$19.215.431,25	R\$11.527.085,43	R\$3.544.670,33	R\$30.142.346,68	R\$ 18.130.250,79	R\$5.575.196,12	R\$62.804.057,85
<b>10</b>	R\$ 11.386.237,87	R\$3.071.367,18	R\$22.286.798,43	R\$11.641.477,31	R\$3.140.216,44	R\$33.282.563,11	R\$ 18.244.642,67	R\$4.921.379,42	R\$67.725.437,26

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Já a Tabela 26 apresenta os valores de VPL, TIR e o tempo de Payback para cada um dos 3 cenários em cada caso. Um VPL maior que zero significa que o projeto ou investimento em questão é viável economicamente, pois os fluxos de caixa possuem capacidade de agregar valor incremental ao investimento inicial. Uma outra forma de analisar a viabilidade dos cenários é observando o valor da TIR, que deve ser maior que o valor da TMA estabelecida no projeto para que ele seja viável.

Tabela 26 – VPL, TIR e Payback para os 3 cenários em cada um dos quatro casos.

<b>Análise econômica sem considerar receitas adicionais (Caso 1)</b>			
<b>Cenários</b>	<b>VPL<sup>(1)</sup></b>	<b>TIR<sup>(2)</sup></b>	<b>Payback (anos)</b>
<b>Cenário 1</b>	-R\$ 7.893.785,56	6,5%	16,96
<b>Cenário 2</b>	R\$ 3.101.979,12	17,3%	7,89
<b>Cenário 3</b>	R\$ 37.544.853,27	49,1%	2,52
<b>Análise econômica considerando receita da não disposição de resíduos (Caso 2)</b>			
<b>Cenários</b>	<b>VPL<sup>(1)</sup></b>	<b>TIR<sup>(2)</sup></b>	<b>Payback (anos)</b>
<b>Cenário 1</b>	R\$ 17.450.969,91	28,0%	4,91
<b>Cenário 2</b>	R\$ 28.446.734,60	40,4%	3,17
<b>Cenário 3</b>	R\$ 62.889.608,75	69,4%	1,73
<b>Análise econômica considerando receita da venda de créditos de carbono (Caso 3)</b>			
<b>Cenários</b>	<b>VPL<sup>(1)</sup></b>	<b>TIR<sup>(2)</sup></b>	<b>Payback (anos)</b>
<b>Cenário 1</b>	-R\$ 3.057.957,05	11,2%	12,38
<b>Cenário 2</b>	R\$ 7.937.807,64	22,3%	5,99
<b>Cenário 3</b>	R\$ 42.380.681,79	53,3%	2,30
<b>Análise econômica considerando receita da não disposição de resíduos e venda de créditos de carbono (Caso 4)</b>			
<b>Cenários</b>	<b>VPL<sup>(1)</sup></b>	<b>TIR<sup>(2)</sup></b>	<b>Payback (anos)</b>
<b>Cenário 1</b>	R\$ 22.286.798,43	31,7%	4,27
<b>Cenário 2</b>	R\$ 33.282.563,11	44,6%	2,84
<b>Cenário 3</b>	R\$ 67.725.437,26	73,4%	1,63

<sup>(1)</sup> VPL = Valor Presente Líquido.

<sup>(2)</sup> TIR = Taxa Interna de Retorno.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

O Caso 1, análise econômica sem considerar receitas adicionais, apresentou um VPL negativo de R\$7.893.785,56 para o cenário 1, mostrando que a utilização do biogás para produção e venda de energia elétrica não é viável, pelo menos dentro do período estipulado para o projeto, visto que os fluxos de caixa não irão suprir o desembolso realizado pelo

investimento inicial. Essa inviabilidade também pode ser observada analisando a TIR, que resultou em 6,5%, menor que a taxa mínima de atratividade adotada (14%). Já os cenários 2 e 3 se mostram viáveis economicamente, com valores positivos de VPL de R\$ 3.101.979,12 e R\$ 37.544.853,27 e TIR de 17,3% e 49,1% respectivamente. Ainda para o Caso 1, o cenário 1 apresentou tempo de payback de 16,96 anos, maior que o horizonte de projeto de 10 anos. Os cenários 2 e 3 obtiveram retorno dentro do período estabelecido com payback de 7,89 anos e 2,52 anos, respectivamente.

Alguns trabalhos mostram a inviabilidade do aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, como foi o caso de Duarte (2017), que, analisando a viabilidade econômica da implantação de biodigestor para a geração de energia a partir de resíduos sólidos orgânicos para um horizonte de projeto de 6 anos, obteve um valor de TIR de 10,52% para uma TMA de 15%.

Ao considerar a receita proveniente da não disposição dos resíduos orgânicos no aterro sanitário (Caso 2), os cenários 1, 2 e 3 se mostraram viáveis economicamente dentro do período analisado, com VPL positivos de R\$ 17.450.969,91, R\$ 28.446.734,60 e R\$ 62.889.608,75 respectivamente. As TIR, de 28%, 40,4% e 69,4% para todos os respectivos cenários desse caso foram menores do que a TMA adotada. Logo, conseqüentemente todos os cenários apresentaram tempo de retorno financeiro menores do que 10 anos, como observado na Tabela 26. Isso mostra como a utilização de tratamentos alternativos para o tratamento dos resíduos orgânicos pode trazer não só vantagens ambientais, mas também benefícios econômicos para o CGIRS-RMS que paga para depositar esse tipo de resíduo no aterro sanitário.

Já ao adicionar apenas a receita da venda de créditos de carbono gerado pela usina de produção de biogás à análise econômica (Caso 3), o cenário 1 ainda permanece inviável com VPL negativo de R\$ 3.057.957,05, TIR de 11,2% e um tempo de payback de 12,38 anos. Os cenários 2 e 3 permanecem viáveis economicamente, aumentando seus tempos de retorno em cerca de 2 anos e 0,3 anos respectivamente. Lembrando que o preço de venda dos CBIO usados nessa análise econômica foi fixado devido a impossibilidade de se prevê-lo ao longo dos anos já que varia de acordo com o mercado, podendo aumentar ou diminuir ao longo do tempo. Logo, o aumento do preço de venda do CBIO durante o período analisado poderia até viabilizar o cenário 1. No entanto é difícil realizar uma análise para confirmar isso. Percebe-se que quando um cenário já possui um baixo valor de payback, receitas adicionais aumentam pouco esse retorno.

Por fim, ao analisar o Caso 4, que considera tanto a receita da venda de créditos de carbono como a receita da não disposição dos resíduos no aterro sanitário, todos os cenários se tornam viáveis com VPL positivo, TIR maiores que a TMA adotada para o projeto e tempos de payback menores do que 10 anos, como pode ser observado na Tabela 26. O cenário 3 sempre se mostrou mais vantajoso que os demais em todos os casos analisados, visto que possuiu maiores VPL, indicando que os custos de investimentos foram pagos mais rapidamente, gerando um maior retorno financeiro.

Peixe (2018) analisando a viabilidade técnica do biogás gerado a partir do resíduo orgânico proveniente de uma usina sucroenergética para a geração de energia elétrica obteve valor de VPL positivo de R\$ 16.673.333,29 e valor de TIR maior que a TMA adotada. O referido autor observou um investimento inicial de R\$ 36 milhões em um horizonte temporal de 20 anos e obteve um tempo de payback de 10 anos e 6 meses. No entanto, o próprio autor considerou ser um prazo relativamente longo para se obter o retorno do capital investido, devido às características do setor sucroenergético. Já Gomes (2022) em sua avaliação econômica da produção de biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, encontrou que o tratamento por meio da utilização de biodigestores do tipo CSTR foi inviável, visto que o investimento e os custos de operação foram significativamente maiores que as receitas obtidas.

## 6 CONCLUSÕES

O tratamento para os resíduos orgânicos em grande escala, principalmente englobando vários municípios, demandou altos custos de investimentos. Para o cenário 1, calculou-se um investimento total de R\$ 27.097.918,38 e para os cenários 2 e 3 de R\$ 23.356.164,78. Mesmo com um tratamento de biogás mais elevado, o capex dos cenários 2 e 3 foi mais barato devido à aquisição dos motogeradores necessários para a produção de energia elétrica do cenário 1.

Para o tratamento anaeróbio de todo o resíduo orgânico estimado a ser gerado pelo CGIRS-RMS durante o período de 10 anos, mostrou-se necessária a construção de 4 biodigestores modelo CSTR com capacidade para tratar cerca de 63 toneladas diárias de resíduo cada um. Os biodigestores projetados possuem 1.860 m<sup>3</sup> de volume útil com 19,9 m de diâmetro e 6 m de altura.

Com relação à análise de viabilidade técnico-econômica em si, ao analisar os 3 cenários sem considerar receitas adicionais (Caso 1), o cenário 1, de venda de energia elétrica,

se mostrou inviável economicamente, com um VPL negativo de R\$ 7.893.785,56, TIR de 6,5%, menor que a TMA adotada e um tempo de payback de 16,96 anos. Já os cenários 2, venda de biometano para a concessionária, e 3, aproveitamento do biogás como combustível na forma de biometano, se mostraram viáveis economicamente, com valores de VPL positivos de R\$ 3.101.979,12 e R\$ 37.544.853,27, e TIR maiores que a TMA adotada, de 17,3% e 49,1% respectivamente. Os cenários 2 e 3 apresentaram tempo de payback de 7,89 e 2,52 anos respectivamente.

Ao considerar a receita adicional da não disposição do resíduo orgânico no aterro sanitário (Caso 2), os cenários 1, 2 e 3 se mostraram viáveis economicamente, com valores positivos de VPL de R\$ 17.450.969,91, R\$ 28.446.734,60 e R\$ 62.889.608,75 respectivamente. Consequentemente, a TIR para cada um desses cenários foi maior do que a TMA adotada (14%) com valores de 28%, 40,4% e 69,4% respectivamente. Já o tempo de payback para cada um desses cenários foi de 4,91 anos, 3,17 anos e 1,73 anos respectivamente.

Mesmo considerando a receita adicional da venda de créditos de carbono (Caso 3), o cenário 1 continua inviável, continuando com um VPL negativo de R\$ 3.057.957,05, uma TIR de 11,2%, menor do que a TMA adotada (14%) e um tempo de payback de 12,38 anos. Já os cenários 2 e 3 para esse caso se mostraram viáveis economicamente com VPL positivos de R\$ 7.937.807,64 e R\$ 42.380.681,79 respectivamente, TIR de 22,3% e 52,3% e tempos de retorno de investimento de 5,99 anos e 2,3 anos respectivamente.

Por fim, ao considerar a receita da venda de créditos de carbono juntamente com a receita da não disposição dos resíduos no aterro sanitário (Caso 4) todos os cenários se tornaram viáveis, com o cenário 3 apresentando um maior retorno econômico em menor tempo.

Apesar do aproveitamento de biogás como energia elétrica ser o dominante no País, os cenários 2 e 3, em que há o seu aproveitamento como biometano, foram os mais viáveis economicamente em todos os casos, apresentando um menor tempo de retorno financeiro, mostrando o potencial econômico do biometano. Portanto, percebe-se que o tratamento de resíduos sólidos orgânicos para a produção de biogás em grande escala, como de mais de um município, analisada nesse estudo, demanda grandes quantias de investimento e custos de operação. Isso mostra a importância de uma análise de viabilidade técnico-econômica para o aproveitamento do biogás, onde se pode escolher entre vários tipos de aproveitamento e levar em consideração vários tipos de casos e cenários.

## REFERÊNCIAS

- ABANADES, S.; ABBASPOUR, H.; AHMADI, A. *et al.* A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 4, p. 3377-3400, 2021.
- ABIOGÁS - Associação Brasileira de Biogás e Biometano. **Nota Técnica: O Potencial Brasileiro do Biogás**. São Paulo, 2020. Disponível em <https://abiogas.org.br/biblioteca/>. Acesso em 15 de maio de 2022.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Grappa, 2020.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Grappa, 2021.
- ADNAN, A. I.; ONG, M. Y.; NOMANBHAY, S.; CHEW, K.W.; SHOW, P. L. Technologies for Biogas Upgrading to biomethane: A review. **Bioengineering**, v. 6, n. 4, p. 92, 2019.
- ALMEIDA, J. V. G. **Em busca da gestão moderna? A implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (lei nº 12.305/2010) nos municípios de Natal e Parnamirim**. 2018. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estudos Urbanos e Regionais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- AMARO, A. B. **Política Nacional de Resíduos Sólidos, uma lei viável?: Estudo de caso a partir do âmbito do acordo MPF/MPSP x CESP**. 2018. 327 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Faculdade de Ciência e Tecnologia de Presidente Prudente, Presidente Prudente, 2018.
- ANGELIDAKI, I.; TREU, L.; TSPAEEKOS, P.; LUO, G.; CAMPANARO, S.; WENZEL, H.; KOUGIAS, P. G. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018. Elsevier BV.
- ARAUJO, G. J. F. de; OLIVEIRA, S. V. W. B. de. Analysis of financial and economic feasibility of the use of vinasse for electricity generation in Brazil. **Cadernos Ebape.Br**, v. 18, n. 4, p. 936-955, 2020.
- BATISTA, M. H.; MARTINS, F. C. Informação e conhecimento social das cidades no gerenciamento de resíduos sólidos. **Gestão de Resíduos Sólidos**, v. 1, n. 1, p. 7-11, 2019.
- BORGES, C. P. **Sistema tecnológico de inovação do biogás do Brasil: uma análise funcional e prospectiva**. 2020. 213f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF.
- BRASIL. LEI Nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências**. Brasília, DF.

BRASIL, Lei Nº 14.206. de 15 de julho de 2020. **Institui o Novo Marco do Saneamento**. Brasília, DF.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. **Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2022a.

CEGÁS – COMPANHIA DE GÁS DO CEARÁ. 2022a. Cegás é a primeira distribuidora do Brasil a injetar o gás natural renovável em sua rede de gasodutos. Disponível em: <https://www.cegas.com.br/gas-natural/o-gas-natural/o-produto/>. Acesso em: setembro de 2022

CEGÁS – COMPANHIA DE GÁS DO CEARÁ. 2022b. **Tabela de tarifas atual**. Disponível em: <https://www.cegas.com.br/tabela-de-tarifas-atual-01-07/>. Acesso em: setembro de 2022.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. v.5. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis. **Nota Técnica: Panorama do Biogás no Brasil**. Caxias do Sul, 2021. Disponível em: <https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/04/NT-PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2021.pdf>.

COSTA, V. C B. **Análise da viabilidade econômica na implantação e operação de sistemas de aproveitamento energético em aterros sanitários da Região Metropolitana de Recife – PE**. 2020. 73 f. TCC (Graduação) – Tecnologia em Gestão Ambiental, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2020.

CUDJOE, D.; HAN, M. S.; NANDIWARDHANA, A. P. Electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste generated in provinces of China: techno-economic and environmental impact analysis. **Fuel Processing Technology**, v. 203, p. 106381, jun. 2020.

CULI, M. J. L. **Biodigestão da fração orgânica de resíduos sólidos em um reator de duas fases operado em bateladas sequenciais com imobilização da biomassa**. 2019. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

DIGITAL, Enova. **O CGIRS-RMS**. Disponível em: <https://www.cgirsrms.ce.gov.br/institucional#QuemSomos>. Acesso em: 4 abr. 2022.

ECOMETANO. 2022. **A GNR-Fortaleza é a segunda maior planta em capacidade instalada do Brasil e a primeira produtora de biometano certificada pelo programa RenovaBio**. Disponível em: <https://ecometano.com.br/>. Acesso em: setembro de 2022.

DUARTE, R. F. **Viabilidade econômica da implantação de um biodigestor para geração de energia a partir de resíduos sólidos orgânicos**. 2017. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano**. Rio de Janeiro, 2018.



EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (Ano base 2020)**. Rio de Janeiro, 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (Ano base 2021)**. Rio de Janeiro, 2022.

FARIA, L. F. V. de. **Análise de projeto de investimento e tomada de decisão com utilização da teoria de opções reais na indústria de petróleo: um modelo de opção de abandono**. 2015. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

FGV – Fundação Getúlio Vargas. **Energias renováveis complementares**. Caderno FGV Energia. Ano 02, nº 04, dezembro, 2015.

FEITOSA, A.; BARDEN, J. E.; KONRAD, O. Análise gravimétrica na gestão de resíduos sólidos urbanos: uma revisão sistemática. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 12, n. 1, p. 131-146, 2018.

FEROLDI, M. CAROLINE, A.; NEVES, C. E. B.; ARANTES, M. K.; JOSÉ, A. H. Storage of purified biogas (biomethane) at low pressure. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 61, 2018.

FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FUGUI, G. M. **Proposta de um modelo de dinâmica de sistemas aplicado à gestão de resíduos sólidos urbanos domiciliares de Curitiba**. 2019. 248 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

FRANCO, A. C. **Análise de viabilidade econômico-financeira de energia fotovoltaica em parques industriais**. 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

GASPAR, R.M.L; INÁCIO, C. de T.; QUINTAES, B.R.; CARVALHO, L. de S.Q.; PERES, A.A. de C. Análise econômico-financeira do gerenciamento dos resíduos sólidos orgânicos em uma agroindústria de processamento mínimo de hortaliças. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 3, 2020, p. 477-488.

GIL, M. D. M. **Relações entre fatores socioeconômicos e a geração de resíduos sólidos domiciliares – vacaria**. 2016. 154 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

GOMES, G. S. M. **Avaliação econômica da produção de biogás a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos gerados na região de Ouro Preto - MG**. 2022. 89 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

GUERREIRO, É. M. da S. **Potencial de aproveitamento energético de biometano gerado em aterros sanitários: estudo de casos**. 2020. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Censo Brasileiro de 2000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JOSHI, P.; VISVANATHAN, C. Sustainable management practices of food waste in Asia: technological and policy drivers. **Journal Of Environmental Management**, v. 247, p. 538-550, 2019. Elsevier BV.

JÚNIOR, A. F. **Potencial de geração de energia elétrica com biogás da suinocultura e compensação em prédios públicos - estudo de caso de pinheiro preto – SC**. 2019. 25 F. Monografia (Graduação) – Curso de Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

KHAN, H.; KHAN, I.; BINH, T. T. The heterogeneity of renewable energy consumption, carbon emission and financial development in the globe: a panel quantile regression approach. **Energy Reports**, v. 6, p. 859-867, 2020. Elsevier BV.

KIMURA, W. J. **Aproveitamento do biogás, do biometano e do gás carbônico no setor sucroenergético e os possíveis impactos no mercado do etanol brasileiro**. 2020. Dissertação (Mestrado) Curso de Análise e Planejamento Energético, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

LI, Y.; JIN, Y.; LI, H.; BORRION, A.; YU, Z.; LI, Z. Kinetic studies on organic degradation and its impacts on improving methane production during anaerobic digestion of food waste. **Applied Energy**, v. 213, p. 136-147, 2018. Elsevier BV.

LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: a review. **Applied Energy**, v. 240, p. 120-137, 2019. Elsevier BV.

LIMA, F. R. S. de. **Viabilidade econômica e financeira de projetos**. Volta Redonda: UGB/FERP, 2019. 141 p.

LUIZ, G. de C. **Política Nacional de Resíduos Sólidos: Uma análise da gestão em municípios de pequeno porte**. 2018. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão de Organizações Públicas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

MAGALHÃES, G. V. V. **Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real**. 2018. 131 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MALINOWSKY, C. **Tratamento dos resíduos sólidos orgânicos da UFSC através de biodigestor anaeróbio**. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MARRA, A. B. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil e em Portugal: análise dos planos de resíduos sólidos e da disposição ambientalmente adequada**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MARTINS, A. da S. **Digestão anaeróbia de resíduos alimentares: efeito da carga orgânica e da adição de elementos traço sobre a produção de metano e a diversidade microbiana**. 2018. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

MEEGODA, J. N.; LI, B.; PATEL, K.; WANG, L. B. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, v. 15, n. 10, p. 2224, 2018. MDPI AG.

MEIRELES, V. K. A. **Gestão e tratamento dos resíduos plásticos produzidos pelo polo industrial de Manaus: tecnologias e sustentabilidade**. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências do Ambiente e Sustentabilidade, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

MICUANSKI, V. C. **Viabilidade técnica e econômica da utilização da vinhaça para geração de energia elétrica (estudo de caso)**. 2014. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

MILANEZ, A. Y.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. da S.; SOUZA, J. A. P. de; LEMOS, M. L. F. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-275, 2018.

MIKI, R. E.; REAMI, L.; CASON, M. M.; PEIXOTO, L. P. C. B. B. **Produção e uso de biometano como combustível veicular na ETE Franca: resultados e considerações do primeiro ano de operação**. 30º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. 10 f, São Paulo, 2019.

MINISTÉRIO DA FAZENDA, Secretaria da Receita Federal do Brasil. Instrução Normativa RFB Nº 1700, de 14 de março de 2017.

MIR, I. S. *et al.* Implementation analysis of solid waste management in Ludhiana city of Punjab. **Environmental Challenges**, v. 2, p. 100023, 2021. Elsevier BV.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Programa Nacional Metano Zero**. Brasília, 2022.  
MME – Ministério de Minas e Energia. **Nota Explicativa sobre a Proposta de Criação da Política Nacional de Biocombustíveis**. 26 de abril de 2021. Disponível em <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1/legislacao-e-documentos/concepcao-do-renovabio/renovabionotaexplicativa.pdf/view>. Acesso em 17 de agosto de 2022.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Cerimônia Alusiva às Medidas de Fomento à Produção e ao Uso Sustentável do Biometano**. Brasília, 2022.

MONTEIRO, M. J. M. **Sistema logístico reverso para destinação final adequada de resíduos sólidos urbanos, sob a visão do pensamento sistêmico**. 2017. 230 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MORAES, M. B. F. **Viabilidade econômica para produção de energia elétrica por biodigestores utilizando resíduos pecuários**. 2017. 100f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2017.

MORAES FILHO, J. R.S. **Análise de viabilidade econômica do mercado de microgeração fotovoltaica on grid no Estado do Maranhão**. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia e Meio Ambiente, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.

NAGALLI, A.; GERALDO FILHO, P. R.; BACH, N. S. Densidade aparente média de resíduos sólidos coletados em uma obra portuária. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 9, n. 19, p 67-74, 2020.

PEIXE, V. P. **Análise da Viabilidade Técnica e Econômica da Queima do Biogás em uma Usina Sucroenergética**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2018.

PERECIN, D; COELHO, S. T. **Comparing Strategies of Biogas Energy Use: Electricity Generation Versus Biomethane Production**. In: 27th EUBCE 2019 - European Biomass Conference and Exhibition, Lisbon, 2019.

POLZER, V. R. **Desafios e perspectivas rumo ao gerenciamento integrado de resíduos sólidos nas cidades brasileiras: contribuições a partir de estudos de caso europeus**. Tese (Doutorado) Curso de Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2017.

PROBIOGÁS. Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético no Brasil. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil. Substratos, Digestores e uso do Biogás**. Brasília, 2015a.

PROBIOGÁS. Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético no Brasil. **Desenvolvimento de um anteprojeto para a implantação de uma usina modelo de pesquisa e capacitação de biogás na região de Concórdia/S**. Brasília, 2015b.

PROBIOGÁS - Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás. **Biometano como Combustível Veicular**. Ministério das Cidades. Brasília, 2016a.

PROBIOGÁS - Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás. **Recomendações para a licitação de uma usina de biogás em ETE e exemplos de especificações técnicas**. Ministério das Cidades. Brasília, 2016b.

PROBIOGÁS - Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás. **Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs a partir do biogás**. Ministério das Cidades. Brasília, 2017.

RODRIGUES, C. A. de O. *et al.* **Caderno Temático 4 – Valorização de Resíduos Orgânicos**. Março de 2019. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/saneamento/plansab/consulta-publica/cadernos-tematicos>. Acesso em: 20 de julho de 2022.

SANTIAGO, H. S.; SANTIAGO, E. L. G. Potencial energético utilizando a produção de biogás em tratamento de esgoto. **Engineering Sciences**, v.7, n.1, p.73-80, 2019.

SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S. do; ALVES, G. M. Biomassa como energia renovável no Brasil. **Revista Uningá Review**, Maringá, v. 29, n. 2, p. 6-13, 2017.

SHAHBAZ, M.; RAGHUTLA, C.; CHITTEDEI, K. R.; JIAO, Z.; VO, X. V. The effect of renewable energy consumption on economic growth: evidence from the renewable energy country attractive index. **Energy**, v. 207, p. 118162, 2020. Elsevier BV.

SILVA M. C.; SANTOS, G. O. **Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados**. Fortaleza: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, 2011.

SILVA, J. C. da. **Estudo da metanização de resíduos alimentares como fonte de energia no restaurante universitário da UFSC**. 2018. 119 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SILVA, C. S. de S. da; BOLL, N.; ZANIN, G. B.; PERETTI, G.; SOUZA, D. S. da. Análise histórica da geração, coleta e destinação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 16, n. 41, p. 125, 2020a.

SILVA, R. C. P. da. **Avaliação de modelos de coleta seletiva de recicláveis secos em perfis socioeconômicos: Estudo de Caso Recife-PE**. 2021. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020b.

SILVA, S. P. da; COSTA, A. S. V. da; SANTOS, S. L. B. dos; LAIA, M. L. de. A importância da biomassa na matriz energética brasileira. **Pensar Acadêmico**, v. 19, n. 2, p. 557, 16 abr. 2021a.

SILVA, P. H. de O.; JANNI, V. Relação da taxa mínima de atratividade no cenário econômico atual com a viabilidade econômica de projetos. **Boletim do Gerenciamento**, v. 25, n. 25, p. 68-75, ago. 2021b.

SIMA-SP - Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **PLANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO ESTADO DE SÃO PAULO**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/>. Acesso em 8 de junho de 2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, SNIS. **Diagnóstico Temático do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2020**. Brasília, p.31, 2021.

SOARES, F. R.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos – Caieiras. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 993–1003, 2017.

SOUZA, J. de. **Contribuição de um método de dimensionamento de plantas de biogás**. 2015. 138 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SOUSA, M. U. **Gestão de resíduos sólidos sob a ótica da tecnologia social: uma experiência em Campina Grande – PB**. 2018. 197 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2018.

VIEIRA, P. F.; DOMINGUES, E. G.; RAMALHO, S. S.; PINTO, L. S.; NETO, D. P. Análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás e do biometano provenientes de dejetos suínos: estudo de caso. **Revista Tecnica**, v. 4, n. 1, p. 146-167, 2019.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Editora UFMG. 4a ed., 472 p, 2014.

WANG, Y.; YANG, L.; LI, Y.; FU, L.; YUAN, C.; YAO, L.; LUO, J. Reactor performance and economic evaluation of singular, binary, and ternary mixing of feedstocks for anaerobic digestion. **Environmental Technology**, v. 42, n. 2, p. 318-328, 2019.

WIVES, D. G.; KÜHN, D. D. **Gestão e planejamento de agroindústrias familiares**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, v. 1, p. 41-59, 2018.

WORLD BANK. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Urban Development. Washington, DC: World Bank, 2020.

ZAMBON, M. M. **Alternativas para a gestão dos resíduos orgânicos urbanos: um estudo de caso na cidade de Florianópolis**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

ZHAO, X.; LI; WU, D.; XIAO, T.; MA, Y.; PENG, X. Modified Anaerobic Digestion Model No. 1 for modeling methane production from food waste in batch and semi-continuous anaerobic digestions. **Bioresource Technology**, v. 271, p. 109-117, 2019. Elsevier BV.

## ANEXO A – ESTIMATIVA DA POPULAÇÃO DOS MUNICÍPIOS PERTENCENTES AO CGIRS-RMS

Anexo A – Estimativa da população dos municípios pertencentes ao CGIRS-RMS durante os anos de projeto.

População (hab)

Municípios

Ano	Alcântaras	Carré	Coreaú	Forquilha	Frecheirinha	Graça	Groaitras	Massapê	Meruoca	Moraújo	Mucambo	Pacujá	Pires Ferreira	Reriutaba	Santana do Acarauá	Senador Sá	Sobral	Varjota
2023	4.607	14.351	19.265	22.439	9.512	7.398	9.631	32.184	10.614	4.004	11.057	4.416	4.216	11.826	20.215	7.369	219.440	15.729
2024	4.711	14.969	19.720	23.090	9.674	7.536	9.862	32.920	10.910	4.036	11.258	4.474	4.291	11.927	20.645	7.584	224.169	15.835
2025	4.817	15.612	20.186	23.760	9.838	7.677	10.099	33.674	11.215	4.069	11.463	4.533	4.367	12.028	21.085	7.806	229.001	15.941
2026	4.926	16.284	20.663	24.449	10.006	7.820	10.342	34.444	11.528	4.102	11.672	4.593	4.444	12.131	21.534	8.034	233.937	16.049
2027	5.037	16.984	21.151	25.158	10.177	7.967	10.590	35.232	11.850	4.135	11.885	4.654	4.523	12.234	21.992	8.268	238.979	16.157
2028	5.150	17.715	21.650	25.888	10.350	8.115	10.844	36.038	12.180	4.169	12.101	4.715	4.603	12.339	22.460	8.510	244.130	16.265
2029	5.266	18.477	22.162	26.639	10.526	8.267	11.104	36.863	12.520	4.203	12.321	4.778	4.685	12.444	22.938	8.759	249.392	16.375
2030	5.385	19.272	22.685	27.412	10.706	8.422	11.371	37.707	12.870	4.237	12.546	4.841	4.768	12.550	23.427	9.015	254.767	16.485
2031	5.507	20.100	23.221	28.207	10.888	8.579	11.644	38.569	13.229	4.271	12.774	4.905	4.853	12.657	23.926	9.278	260.259	16.596
2032	5.631	20.965	23.769	29.025	11.074	8.739	11.923	39.452	13.599	4.306	13.007	4.970	4.939	12.765	24.435	9.549	265.868	16.708

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

## ANEXO B – TAXA PER CAPITA DE GERAÇÃO DE RSU PELOS MUNICÍPIOS PERTENCENTES AO CGIRS-RMS

Anexo B – Taxa per capita de geração de RSU para cada município do CGIRS-RMS durante os anos de projeto.

Ano	População (hab)																	
	Alcântaras	Carré	Coreaú	Forquilha	Frecheirinha	Graça	Groaitras	Massapê	Meruoca	Moraújo	Mucambo	Pacujá	Pires Ferreira	Reritiba	Santana do Acarauí	Senador Sá	Sobral	Varjota
2023	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99
2024	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99
2025	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99
2026	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99
2027	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99
2028	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99
2029	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99
2030	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,05	0,99
2031	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,05	0,99
2032	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,05	0,99

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).



## ANEXO C – ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RSU PELOS MUNICÍPIOS PERTENCENTES AO CGIRS-RMS

ANEXO C – Estimativa da geração de RSU pelos municípios do CGIRS-RMS durante os anos de projeto.

População (hab)

Municípios

Ano	Alcântaras	Carré	Coreaú	Forquilha	Frecheirinha	Graça	Groaitras	Massapê	Meruoca	Moraújo	Mucambo	Pacujá	Pires Ferreira	Reritaba	Santana do Acarauá	Senador Sá	Sobral	Varjota
2023	4,56	14,21	19,07	22,21	9,42	7,32	9,53	32,51	10,51	3,96	11,35	4,37	4,17	11,71	20,01	7,30	208,47	15,57
2024	4,66	14,82	19,52	22,86	9,58	7,46	9,76	33,25	10,80	4,00	11,56	4,43	4,25	11,81	20,44	7,51	212,96	15,68
2025	4,77	15,46	19,98	23,52	9,74	7,60	10,00	34,01	11,10	4,03	11,77	4,49	4,32	11,91	20,87	7,73	217,55	15,78
2026	4,88	16,12	20,46	24,20	9,91	7,74	10,24	34,79	11,41	4,06	11,98	4,55	4,40	12,01	21,32	7,95	222,24	15,89
2027	4,99	16,81	20,94	24,91	10,07	7,89	10,48	35,58	11,73	4,09	12,20	4,61	4,48	12,11	21,77	8,19	227,03	16,00
2028	5,10	17,54	21,43	25,63	10,25	8,03	10,74	36,40	12,06	4,13	12,42	4,67	4,56	12,22	22,24	8,42	231,92	16,10
2029	5,21	18,29	21,94	26,37	10,42	8,18	10,99	37,23	12,40	4,16	12,65	4,73	4,64	12,32	22,71	8,67	236,92	16,21
2030	5,33	19,08	22,46	27,14	10,60	8,34	11,26	38,08	12,74	4,19	12,88	4,79	4,72	12,42	23,19	8,92	267,51	16,32
2031	5,45	19,90	22,99	27,92	10,78	8,49	11,53	38,96	13,10	4,23	13,11	4,86	4,80	12,53	23,69	9,19	273,27	16,43
2032	5,57	20,76	23,53	28,73	10,96	8,65	11,80	39,85	13,46	4,26	13,35	4,92	4,89	12,64	24,19	9,45	279,16	16,54

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

### ANEXO D – DIMENSIONAMENTO DOS BIODIGESTORES

Dados Iniciais	
Quantidade de RSO	63.000,00 Kg
Tempo de alimentação	1 dia
TDH adotado	20 dias
Média da % de ST nos RSO	21 %
Kg de RSO por Reator/dia	63.000,00 Kg
Carga do Reator	14 % de ST
Vol (Cone)	2,00 m <sup>3</sup>
Svi	20 %
Massa específica dos RSO	1.213,00 Kg/m <sup>3</sup>
Quantos reatores	1

Metano (Ferreira, 2015)	
Média de geração de CH <sub>4</sub>	0,4 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Kg
Estimativa de geração por reator	5.040,00 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /dia
Número final de reatores	4
Total de geração de metano por dia	20.160,00 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /dia

Reator cilíndrico	
Cst	13.230,00 Kg/dia
Mt	94.500,00 Kg/dia
Volume de água	31.500,00 L
	31,50 m <sup>3</sup>
Vresíduos	51,94 m <sup>3</sup> /dia
Qa	83,44 m <sup>3</sup>
Volut(Reator)	1.668,75 m <sup>3</sup>
Vol(HS)	24,00 m <sup>3</sup>
Vol(Ínóculo)	166,87 m <sup>3</sup>
VolTOTAL	1.859,62 m <sup>3</sup>
r(Reator)	6,66 m
D=h	13,33 m
	h 6,00 m
P/D ≠ H	D 19,87 m
	r(Reator) 9,93 m

## ANEXO E – COMPONENTES DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

ANEXO E – Componentes do sistema de automação para 4 biodigestores

Equipamentos	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Total (R\$)
CLP - Módulo Básico	1	2.270,00	2.270,00
Cartão de Expansão Digital	1	1.530,00	1.530,00
Cartão de Expansão Analógico	1	4.005,00	4.005,00
Cartão de Expansão Temperatura	1	4.005,00	4.005,00
Cartão de Comunicação Profibus DP	1	4.695,00	4.695,00
Conector RS485	1	1.000,00	1.000,00
Software de Programação + Cabos	1	4.000,00	4.000,00
Termopar tipo K	8	630,00	3.780,00
Sensor de pH	8	1.405,00	8.430,00
Transmissor de pH	8	1.800,00	10.800,00
Válvulas Solenóides	32	1.010,00	12.120,00
Licença de Software SCADA	1	8.000,00	8.000,00
Mão de Obra - Instalação,	1	18.000,00	18.000,00
Manutenção, Operação e Treinamento			
<b>Total</b>			<b>110.505,00</b>

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).