



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA
DE BIOGÁS PARA APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE
GRANDES GERADORES NO MUNICÍPIO DE FOZ DO IGUAÇU-PR**

BRUNA SMANIOTTO

Foz do Iguaçu
Fevereiro, 2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA DE
BIOGÁS PARA APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE GRANDES
GERADORES NO MUNICÍPIO DE FOZ DO IGUAÇU-PR**

BRUNA SMANIOTTO

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Área de concentração: Tecnologias e Processos Sustentáveis

Orientadora: Profa. Dra. Márcia Regina Becker

Foz do Iguaçu
Fevereiro, 2025

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - CENTRAL

S635

Smaniotto, Bruna.

Viabilidade técnica e econômica da implantação de uma planta de biogás para aproveitamento de resíduos orgânicos de grandes geradores no município de Foz do Iguaçu-PR / Bruna Smaniotto. - Foz do Iguaçu, 2025. 93 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu-PR, 2025.

Orientador: Márcia Regina Becker.


1. Gestão integrada de resíduos sólidos - Aplicação energética. 2. Digestão anaeróbia. 3. Energias renováveis. 4. Biocombustíveis. 5. Sustentabilidade. I. Becker, Márcia Regina. II. Título.

CDU 620.952

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA DE BIOGÁS PARA APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS NO MUNICÍPIO DE FOZ DO IGUAÇU-PR

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MARCIA REGINA BECKER**
Data: 09/05/2025 09:55:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora: Profa. Dra. Márcia Regina Becker
UNILA

Profa. Dra. Priscila Vaz de Arruda
UTFPR - Toledo

Profa. Dra. Priscila Lemes
UNILA

Foz do Iguaçu
Fevereiro, 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por tudo, sempre. Ao meu grupo de melhores amigas (Ada, Ale, Brenda, Bruna, Camila, Natália e Mariana), pelo apoio de sempre. Aos meus colegas de trabalho, que mesmo sem saber, me tiraram muitas dúvidas e me deram dicas que contribuíram para o desenvolvimento desse estudo.

Agradeço à minha professora orientadora, Márcia Becker, pela orientação, pelas dicas e pelo apoio no encaminhamento e conclusão desse estudo.

Agradeço aos fornecedores consultados para a obtenção dos custos de CAPEX e OPEX que foram considerados para as análises econômicas desse estudo, sendo Antônio Candal, da CH4 Solutions e Maycon Savoldi e Lúcio Ricken, da 3DI Engenharia, que são também colegas de profissão. Além disso, agradeço também à Vital Engenharia Ambiental, pelos dados fornecidos para a elaboração do estudo.

SMANIOTTO, Bruna. Viabilidade técnica e econômica da implantação de uma planta de biogás para aproveitamento de resíduos orgânicos de grandes geradores no município de Foz do Iguaçu-PR. 2024. 93 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Sustentabilidade) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.

RESUMO

O uso de resíduos orgânicos para produção de biogás via digestão anaeróbia é uma alternativa que agrega ao gerenciamento de resíduos valor ambiental, contribuindo para o aproveitamento energético de fontes renováveis e para a redução da emissão de gases poluentes e, conseqüentemente, alinhado a objetivos de desenvolvimento sustentável. Dessa forma, utilizar os resíduos orgânicos produzidos por grandes geradores na cidade de Foz do Iguaçu/PR, sendo eles resíduos orgânicos que são provenientes do setor hoteleiro, da Central de Abastecimento (CEASA) e das mercadorias de origem orgânica referentes às apreensões realizadas por fiscalizações aduaneiras pelo MAPA, é uma opção para serem utilizados como substratos em uma planta de biogás centralizada no município. Assim, o presente estudo realizou o levantamento quantitativo e qualitativo de resíduos produzidos por esses geradores para calcular o potencial teórico de produção de biogás e seus possíveis aproveitamentos energéticos, seja para geração de energia elétrica, térmica ou para produção de biometano para uso como combustível veicular. A partir dos resultados obtidos, foi possível estimar que o total de biogás a ser produzido é de 36.612 m³/mês, sendo esse volume possível de substituir uma quantidade de calor de 186.721.200 kcal/mês (representando 16.822 kg de GLP por mês), 82.377 kWh/mês de energia elétrica (representando o abatimento da energia elétrica consumida em 330 residências por mês com consumo médio de 250 kWh/mês) ou 20.869 m³/mês de biometano (representando 20.243 l/mês de substituição por diesel). Na análise econômica para gerar energia elétrica e comercializar no mercado livre de energia foram obtidos os valores de CAPEX de R\$ 6.005.282,00, OPEX anual de R\$ 486.098,00 e receita anual de R\$ 346.970,00, onde os resultados da análise não evidenciaram viabilidade econômica, sendo necessário investir no desenvolvimento de políticas públicas que visem incentivar a implantação de projetos desse tipo. Já para a opção de produzir biometano e substituir pelo diesel dos caminhões de coleta do município, foram obtidos os valores de CAPEX de R\$ 8.545.282,00, OPEX anual de R\$ 585.051,00 e custo evitado anual de R\$ 1.506.079,00, onde os resultados da análise foram de um *payback* simples de 7 anos e *payback* descontado de 15 anos, evidenciando a viabilidade econômica para esse cenário. Assim, os resultados deste estudo mostram o potencial significativo de aproveitamento energético dos resíduos orgânicos gerados na cidade de Foz do Iguaçu, com impacto direto na substituição de fontes convencionais de energia por fontes renováveis. A produção de biogás oferece alternativas para geração de energia elétrica, calor e combustível veicular, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável. Além disso, o projeto promove uma gestão de resíduos mais eficiente, alinhada aos princípios de economia circular e à redução de emissões de gases poluentes. Dessa forma, o uso desses resíduos orgânicos reforça o compromisso com o desenvolvimento sustentável local e regional.

Palavras-chave: Gestão de resíduos; digestão anaeróbia; aplicação energética; energias renováveis, biocombustíveis; sustentabilidade.

SMANIOTTO, Bruna. Viabilidad técnica y económica de la implementación de una planta de biogás para aprovechar residuos orgánicos de grandes generadores en el municipio de Foz do Iguaçu-PR, 2024. 93 h. Tesis (Maestría en Energía y Sostenibilidad) – Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, Foz do Iguaçu.

RESUMEN

El aprovechamiento de residuos orgánicos para producir biogás mediante digestión anaeróbica es una alternativa que agrega valor ambiental a la gestión de residuos, contribuyendo al aprovechamiento de energía procedente de fuentes renovables y reduciendo la emisión de gases contaminantes y, en consecuencia, alineada con objetivos de desarrollo sostenible. De esta manera, se utilizan residuos orgánicos producidos por grandes generadores en la ciudad de Foz do Iguaçu/PR, que son residuos orgánicos que provienen del sector hotelero, de la Central de Abastecimiento (CEASA) y de bienes de origen orgánico relacionados con incautaciones realizadas por inspecciones del despacho aduanal por MAPA, es una opción para ser utilizados como sustratos en una planta de biogás centralizada en el municipio. El presente estudio realizó un levantamiento cuantitativo y cualitativo de los residuos producidos por estos generadores para calcular el potencial teórico de producción de biogás y sus posibles usos energéticos, sea para la generación de energía eléctrica o térmica o para la producción de biometano para su uso como combustible del vehículo. De los resultados obtenidos se pudo estimar que el total de biogás a producir es de 36.612 m³/mes, siendo posible reponer con este volumen una cantidad de calor de 186.721.200 kcal/mes (que representan 16.822 kg de GLP al mes), 82.377 kWh/mes de energía eléctrica (que representa la reducción de energía eléctrica consumida en 330 hogares al mes con consumo medio de 250 kWh/mes) o 20.869 m³/mes de biometano (lo que representa 20.243 l/mes de reposición de diésel). En el análisis económico para generar energía eléctrica y comercializarla en el mercado libre de energía, se obtuvieron valores de CAPEX de R\$ 6.005.282,00, OPEX anual de R\$ 486.098,00 e ingresos anuales de R\$ 346.970,00, donde los resultados del análisis no lo demostraron viabilidad económica y es necesario invertir en el desarrollo de políticas públicas encaminadas a incentivar la implementación de proyectos de este tipo. En cuanto a la opción de producir biometano y sustituirlo por diésel de los camiones recolectores del municipio, se obtuvieron valores de CAPEX de R\$ 8.545.282,00, OPEX anual de R\$ 585.051,00 y costo evitado anual de R\$ 1.506.079,00, donde se obtuvieron los resultados del análisis. un retorno simple de 7 años y un retorno descontado de 15 años, destacando la viabilidad económica de este escenario. Así, los resultados de este estudio muestran el importante potencial de aprovechamiento energético de los residuos orgánicos generados en la ciudad de Foz do Iguaçu, con impacto directo en la sustitución de fuentes de energía convencionales por fuentes renovables, la producción de biogás ofrece alternativas para la generación de energía eléctrica, calor y combustible vehicular, contribuyendo a una matriz energética más sustentable. Además, el proyecto promueve una gestión más eficiente de los residuos, alineada con los principios de economía circular y la reducción de emisiones de gases contaminantes. De esta forma, el aprovechamiento de estos residuos orgánicos refuerza el compromiso con el desarrollo sostenible local y regional.

Palabras clave: Residuos sólidos orgánicos; gestión de residuos; digestión anaeróbica, aprovechamiento energético, biogás, viabilidad económica.

SMANIOTTO, Bruna. Technical and economic feasibility of implementing a biogas plant to use organic waste from large generators in the municipality of Foz do Iguaçu-PR, 2024. 93 p. Dissertation (Master's in Energy and Sustainability) – Federal University of Latin American Integration, Foz do Iguaçu.

ABSTRACT

The use of organic waste to produce biogas via anaerobic digestion is an alternative that adds environmental value to waste management, contributing to the use of energy from renewable sources and reducing the emission of greenhouse gases and consequently aligned with development objectives sustainable. In this way, using organic waste produced by large generators in the city of Foz do Iguaçu/PR, which is organic waste that comes from the hotel sector, the Supply Center (CEASA) and goods of organic origin related to seizures carried out by inspections customs clearance by MAPA, is an option to be used as substrates in a biogas plant centralized in the municipality. Therefore, the present study carried out a quantitative and qualitative survey of waste produced by these generators to calculate the theoretical potential for biogas production and its possible energy uses, whether for the generation of electrical or thermal energy or for the production of biomethane for use as vehicle fuel. From the results obtained, it was possible to estimate that the total biogas to be produced is 36,612 m³/month. With the volume of biogas produced is possible to replace a quantity of heat of 186,721,200 kcal/month (representing 16,822 kg of LPG per month), 82,377 kWh/month of electrical energy (representing the reduction of electrical energy consumed in 330 homes per month with average consumption of 250 kWh/month) or 20,869 m³/month of biomethane (representing 20,243 l/month of diesel replacement). In the economic analysis to generate electrical energy and sell it on the free energy market, CAPEX values of R\$ 6,005,282.00, annual OPEX of R\$ 486,098.00 and annual revenue of R\$ 346,970.00 were obtained, where the results of the analysis do not demonstrate economic viability, so in this case it is necessary to invest in the development of public policies aimed at encouraging the implementation of projects of this type. As for the option of producing biomethane and replacing it with diesel from the municipality's collection trucks, CAPEX values of R\$ 8,545,282.00, annual OPEX of R\$ 585,051.00 and annual avoided costs of R\$ 1,506,079 were obtained where the results of the analysis were a simple payback of 7 years and a discounted payback of 15 years, highlighting the economic viability for this scenario. Thus, the results of this study showing the significant potential for energy use of organic waste generated in the city of Foz do Iguaçu, with a direct impact on the replacement of conventional energy sources with renewable sources. Biogas production offers alternatives for generating electrical energy, heat and vehicle fuel, contributing to a more sustainable energy matrix. Furthermore, the project promotes more efficient waste management, aligned with the principles of circular economy and the reduction of polluting gas emissions. In this way, the use of organic waste reinforces the commitment to local and regional sustainable development.

Keywords: Waste management; anaerobic digestion; energy use; renewable energy, biofuel; sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz energética mundial.....	18
Figura 2 - Matriz energética brasileira.....	18
Figura 3 - Interesse em gerar energia por meio de RSU x Porte populacional.....	22
Figura 4 - Tecnologias de recuperação energética por meio de resíduos sólidos.....	23
Figura 5 - Mapa do Estado do Paraná.....	24
Figura 6 - Aterro Sanitário de Foz do Iguaçu.....	24
Figura 7 – Etapas da digestão anaeróbia.....	33
Figura 8 - Biodigestor de lagoa coberta.....	39
Figura 9 - Biodigestor CSRT.....	40
Figura 10 - Biodigestor UASB.....	41
Figura 11 - Número de plantas e volume de biogás produzido no Brasil.....	49
Figura 12 - Volumes de produção de biogás por substrato e principais usos.....	50
Figura 13 - Crescimento no número de plantas de biogás no Brasil.....	51
Figura 14 - Fluxo de Caixa Livre - Cenário 2.....	76
Figura 15 - Análise do VPL - Cenário 2.....	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros que influenciam o processo de digestão anaeróbia (continua).....	34
Quadro 2 - Parâmetros operacionais da digestão anaeróbia.....	36
Quadro 3 - Parâmetros operacionais para monitoramento.....	37
Quadro 4 - Critério para definição da rota de biodigestão adequada.....	42
Quadro 5 – Níveis de tratamento e purificação para diferentes aplicações do biogás.....	47
Quadro 6 – Tecnologias de remoção de CO ₂ (continua).....	47
Quadro 7 - Principais indicadores econômicos.....	53
Quadro 8 - Premissas econômicas (continua).....	60
Quadro 9 - Resíduos apreendidos pelo MAPA em 2022 e 2023.....	65
Quadro 10 - Potencial de substituição energética do biogás.....	69
Quadro 11 - CAPEX Cenário 1 – Geração de Energia Elétrica.....	70
Quadro 12 - OPEX Cenário 1 – Geração de Energia Elétrica.....	71
Quadro 13 - CAPEX Cenário 2 – Produção de Biometano.....	71
Quadro 14 - OPEX Cenário 2 – Produção de Biometano.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para definição da tecnologia de biodigestão adequada.....	42
Tabela 2 - Composição média do biogás.....	43
Tabela 3 - Fatores de Conversão.....	46
Tabela 4 - Resumo dos resultados de estudos da geração de resíduos no setor hoteleiro.....	54
Tabela 5 - Número de leitos e taxa de ocupação em 2022 e 2023 da cidade de Foz do Iguaçu.....	55
Tabela 6 - Resíduos CEASA 2022.....	63
Tabela 7 - Resíduos CEASA 2023.....	64
Tabela 8 - Quantitativo de resíduos orgânicos dos grandes geradores de Foz do Iguaçu em 2022 e 2023.....	66
Tabela 9 - Estimativas de produção de biogás por setor.....	68
Tabela 10 - Análise das receitas e lucros - Cenário 1 (continua).....	73

Tabela 11 - Análise do fluxo de caixa - Cenário 1	74
Tabela 12 - Análise das receitas e lucros - Cenário 2	75
Tabela 13 - Análise do fluxo de caixa - Cenário 2	75
Tabela 14 - Resumo indicadores econômicos cenários 1 e 2	77

LISTA DE SIGLAS

ABACEN	Associação Brasileira de Centrais de Abastecimento
ABiogás	Associação Brasileira do Biogás
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Meio Ambiente
ANELL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BLC	Biodigestor de Lagoa Coberta
C/N	Carbono/Nitrogênio
CEASA	Central de Abastecimento
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás
CNM	Confederação Nacional de Municípios
COV	Carga Orgânica Volumétrica
CSTR	<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i>
DA	Digestão Anaeróbia
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
FC	Fator de Conversão
FORSU	Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GMG	Grupo Motogerador
IB	Itaipu Binacional
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i>
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável
ONUDI	Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
RSO	Resíduo Sólido Orgânico
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SIGA	Sistema de Informações de Geração
ST	Sólidos Totais

SV	Sólidos Voláteis
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UE	União Europeia
UH	Unidade Habitacional
VIGIAGRO	Vigilância do Trânsito Agropecuário Internacional

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1.	GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL E NO MUNDO	20
2.2.	GERAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM FOZ DO IGUAÇU-PR	23
2.2.2.	CEASA	26
2.2.3.	MAPA.....	27
2.2.4.	Unidade de Demonstração Itaipu (UD ITAIPU).....	27
2.3.	DEMANDA ENERGÉTICA E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	27
2.4.	DIGESTÃO ANAERÓBIA	31
2.4.1.	Etapas da Digestão Anaeróbia	31
2.4.2.	Parâmetros da Digestão Anaeróbia	33
2.4.3.	Parâmetros Operacionais.....	35
2.4.4.	Digestato	37
2.5.	BIODIGESTORES.....	37
2.5.1.	Biodigestor de lagoa coberta (BLC).....	38
2.5.2.	Biodigestor <i>Continuous Stirred Tank Reactor</i> (CSTR).....	39
2.5.3.	Biodigestor tipo <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> (UASB).....	40
2.5.4.	Definição do tipo de biodigestor	41
2.6.	COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS	43
2.7.	APLICAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS	44
2.7.1.	Energia elétrica	44
2.7.2.	Energia térmica	44
2.7.3.	Cogeração	44
2.7.4.	Biometano.....	45
2.7.5.	Fatores de Conversão (FC)	45
2.8.	TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS.....	46
2.9.	BIOGÁS NO BRASIL	48
2.10.	OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	51
2.11.	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	53
3.	OBJETIVOS.....	54
3.1.	OBJETIVO GERAL.....	54
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	54
4.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	54
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO	54
4.1.1.	Resíduos do setor hoteleiro	54
4.1.2.	Resíduos da Central de Abastecimento	55

4.1.3.	Resíduos de Apreensões do MAPA.....	55
4.2.	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DOS RESÍDUOS DOS HOTÉIS, CEASA E MAPA	55
4.2.1.	Quantitativo dos Resíduos dos Hotéis	55
4.3.	POTENCIAL DE APLICAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS.....	56
4.3.1.	Energia Térmica.....	57
4.3.2.	Energia Elétrica	57
4.3.3.	Biometano.....	57
4.4.	PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO	58
4.5.	VIABILIDADE ECONÔMICA.....	59
4.5.1.	Indicadores Econômicos	59
4.5.2.	Cenários de Análise	59
4.5.2.1.	Cenário 1 – Geração de Energia Elétrica.....	59
4.5.2.2.	Cenário 2 – Produção de Biometano	60
4.5.3.	Premissas	60
4.5.4.	Levantamento de custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX).....	61
4.5.5.	Levantamento de Receitas e Custos Evitados	61
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
5.1.	QUANTITATIVO DE RESÍDUOS.....	63
5.2.	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO E POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	67
5.3.	POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS.....	69
5.4.	CAPEX E OPEX.....	70
5.5.	RECEITAS E CUSTOS EVITADOS	72
5.5.1.	Receita Cenário 1	72
5.5.2.	Custo Evitado Cenário 2	72
5.6.	RESULTADOS DA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	72
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
	REFERÊNCIAS.....	80
	ANEXO A – ORÇAMENTO PARA SISTEMA DE BIODIGESTÃO CH4 SOLUTIONS (CAPEX)	89
	ANEXO B – ORÇAMENTO PARA SISTEMA DE BIODIGESTÃO CH4 SOLUTIONS (OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO).....	90
	ANEXO C – ORÇAMENTO PARA SISTEMA DE BIODIGESTÃO CH4 SOLUTIONS (RECURSOS HUMANOS).....	91
	ANEXO D – ORÇAMENTOS PARA SISTEMA TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CAPEX).....	92
	ANEXO E – ORÇAMENTO PARA SISTEMA TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS (OPEX).....	93

1. INTRODUÇÃO

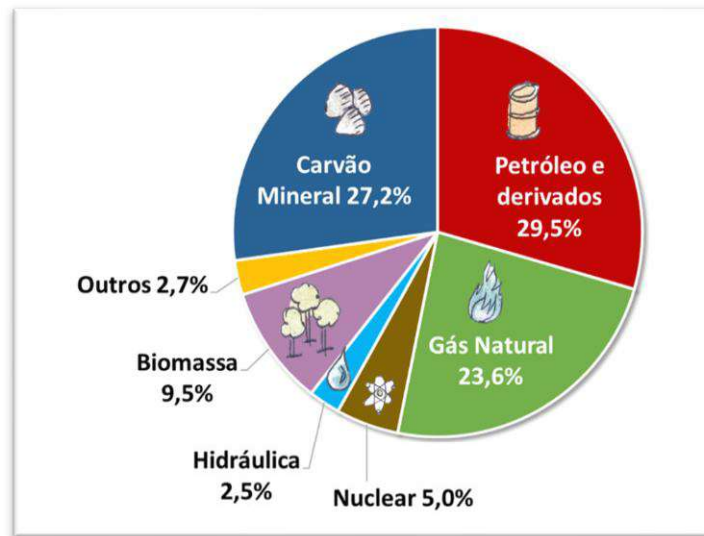
De acordo com dados levantados no ano de 2022 pela Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Meio Ambiente (2023), a média de geração de resíduos por habitante brasileiro foi de 1,04 kg de resíduo por dia em 2022 (ABREMA, 2022). O resíduo sólido urbano (RSU) é composto por resíduos orgânicos, recicláveis e rejeitos e é coletado em residências e na limpeza urbana. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 50% do RSU gerado no Brasil são orgânicos, 28% são recicláveis e 22% são rejeitos (EMBRAPA, 2022).

A disposição incorreta de resíduos sólidos pode acarretar impactos diversos, como sérios problemas ambientais, sociais e econômicos, como a poluição de águas e solos, aumento na emissão de gases de efeito estufa (GEE), crise energética, falta de espaço para implantação de novos aterros sanitários e riscos para a saúde humana (AGBEDE, 2019).

Ao passo em que grandes quantidades de resíduos sólidos são geradas, a disponibilidade de energia é uma preocupação cada vez mais atual, especialmente quando se fala em energia proveniente de fontes fósseis ou de energia convencional, pois seu uso promove o aumento nas concentrações de dióxido de carbono (CO₂) e outros GEE. Por outro lado, os combustíveis fósseis não são considerados renováveis em escala de tempo de vida humana, pois o processo de renovação natural dessas fontes pode levar milhões de anos, fazendo com que sejam finitas, principalmente considerando o atual uso intenso. Contudo, fontes não convencionais de energia estão cada vez mais ganhando incentivos para serem desenvolvidas e aplicadas, tornando-se uma alternativa atrativa para o atual contexto energético mundial, por serem consideradas limpas, emitirem menos GEE e serem consideradas inesgotáveis (EPE, 2024a).

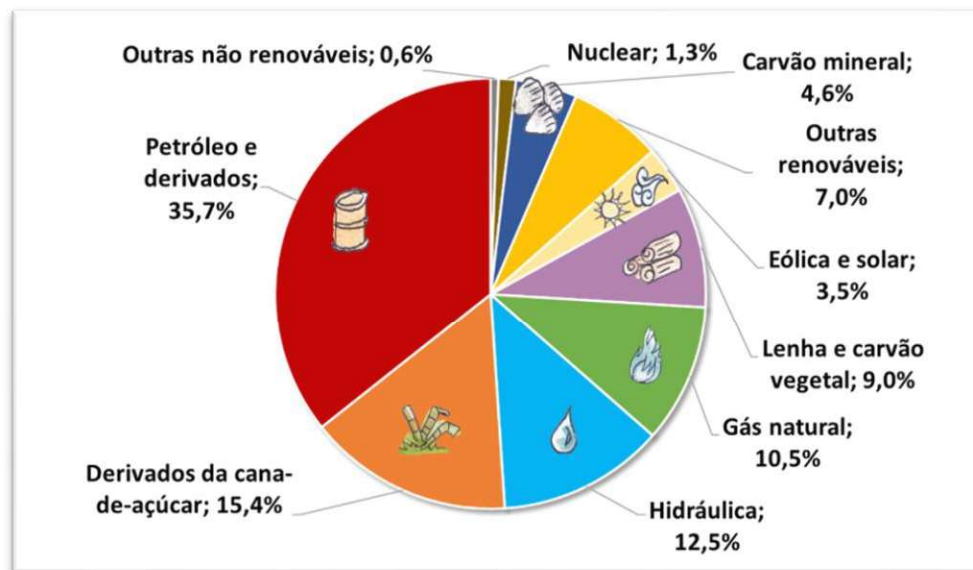
O aproveitamento energético proveniente de fontes renováveis, como os resíduos orgânicos gerados em atividades comuns em uma cidade, é uma forma de diversificar a matriz energética que, segundo dados atualizados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), é composta majoritariamente por fontes fósseis (não renováveis), como petróleo, carvão e gás natural, tanto a matriz energética mundial como a Brasileira (EPE, 2024a), conforme é possível observar nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 - Matriz energética mundial



Fonte: EPE, 2024a

Figura 2 - Matriz energética brasileira



Fonte: EPE, 2024a

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal Nº 12.305/2010, traz os princípios, objetivos e instrumentos necessários para pôr em prática métodos eficientes de gestão e gerenciamento de resíduos. O desenvolvimento sustentável e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos a partir da redução, reutilização, reciclagem, tratamento e gestão integrada de resíduos é um dos objetivos da PNRS (BRASIL, 2010d).

Sendo Foz do Iguaçu um dos 10 destinos brasileiros mais procurados por turistas, o que aumenta o número de pessoas que circulam pela cidade e, conseqüentemente, gera ainda mais

resíduos (EXAME, 2022), um estudo realizado na cidade de Menorca, na Espanha, demonstrou que há um acréscimo de 0,282% na geração de resíduos a cada 1% de aumento na população turística (SOUZA et al., 2014).

Além disso, em regiões fronteiriças, como é o caso de Foz do Iguaçu, que faz fronteira com o Paraguai e com a Argentina, existem diversas ocorrências de apreensões de materiais orgânicos durante fiscalização de órgãos públicos nas fronteiras entre os países. As apreensões podem ocorrer por diversos motivos, como, por exemplo, mercadorias sem notas fiscais, fora do prazo de validade, armazenadas e/ou transportadas de forma inadequada ou, ainda, misturadas com substâncias ilícitas.

Segundo dados da Agência Brasil de 2020, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) apreendeu 63 toneladas de produtos de origem animal e vegetal em aeroportos, aduanas, portos e postos de fronteira no ano de 2019 (Agencia Brasil, 2020). Ainda segundo a Agência Brasil, a Vigilância do Trânsito Agropecuário Internacional (Vigiagro) impediu o ingresso de 32 mil quilos de produtos de origem vegetal e 31 mil quilos de produtos de origem animal. Conforme nota do Mapa, “nos aeroportos, produtos de origem animal, como queijo, linguiça e salame, são os mais apreendidos no momento de ingresso. Já entre produtos de origem vegetal, as frutas frescas são os itens mais barrados pela vigilância do Mapa”. Quando ocorrem essas apreensões, os materiais não podem ser destinados para consumo humano, por isso precisam ser destruídos. Em muitos casos, os materiais são enviados aos aterros sanitários ou incinerados (Agencia Brasil, 2020).

Além dos aspectos técnicos, ambientais e sociais, os aspectos econômicos de um projeto de biogás são de extrema relevância para tomadas de decisão e também devem ser levados em consideração para análises de viabilidade, sendo importante avaliar os custos de implantação (CAPEX), custos de operação (OPEX) e os custos evitados e receitas advindas dos resultados do projeto (MASHHADI, 2021).

Buscando o direcionamento desses resíduos para o seu aproveitamento energético eficiente e, ao mesmo tempo para liberação de espaços que ocupam no aterro sanitário do município, o presente estudo aborda uma avaliação da viabilidade técnica e econômica da implantação de uma planta de biogás nas proximidades do aterro sanitário do município. Nesse estudo são apresentadas, de forma acurada, as características físicas desses resíduos e seus potenciais energéticos para a biodigestão. Além disso, são apresentados os resultados da viabilidade econômica, com as estimativas dos custos para implantação e operação da planta e a obtenção dos indicadores econômicos por meio dos métodos de VPL (Valor Presente Líquido) e do retorno do investimento (*payback*) com a utilização do FCL (Fluxo de Caixa Livre). Com os resultados, busca-se contribuir significativamente para a elaboração das políticas públicas do município de Foz do Iguaçu na área de gerenciamento e tratamento de resíduos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL E NO MUNDO

Considerando a geração estimada de RSU pelos brasileiros como uma média de 1,04 kg de RSU por dia em 2022, esse dado, associado aos dados de número de habitantes no Brasil divulgados pelo último Censo Demográfico, resulta em aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de RSU gerados em 2022 ou cerca de 380 kg/habitante/ano (ABREMA, 2022). Em termos de comparação, em 2022, os países da União Europeia (UE) geraram, em média, 513 kg de RSU por habitante (Eurostat, 2022).

Em 2020, 59,1% dos resíduos produzidos na União Europeia foram destinados para tratamentos de recuperação, sendo 39,9% reciclado, 12,7% utilizado em áreas escavadas com o propósito de recuperação de encostas, segurança ou paisagismo e os 40,9% restantes do total destinado para tratamento foi encaminhado para aterros sanitários (Eurostat, 2022). Já no Brasil, 61% dos RSU coletados em 2022 foram encaminhados para aterros sanitários, correspondendo a 43,8 milhões de toneladas de resíduos, porém, 39% dos resíduos ainda são encaminhados para destinos inadequados, como lixões (ABREMA, 2022), o que demonstra que ainda há um longo caminho de melhorias e desafios a serem vencidos para aumentar o percentual de resíduos a serem destinados para fins ambientalmente adequados.

Na América do Norte, os Estados Unidos da América (EUA) é um dos países que mais gera resíduos sólidos urbanos por pessoa. Em média, cada habitante dos EUA gera 800 kg de resíduos por ano. 34% dos resíduos produzidos no mundo todo são gerados pelos países mais ricos, mesmo que estes representem apenas 16% da população mundial. Ao passo em que a geração de resíduos é menor em países emergentes comparado com países mais ricos, a projeção do crescimento na geração de resíduos é esperada a crescer mais rapidamente justamente nos países menos favorecidos (Statista, 2023), indicando que políticas públicas para a correta disposição de resíduos precisam ser desenvolvidas e aplicadas igualmente ao redor do mundo.

A incorreta disposição final de resíduos pode acarretar severos danos ambientais, sociais e econômicos, como a tríade da crise planetária apresentada pela *International Solid Waste Association* (2024), sendo (i) mudança climática: a queima de lixo libera fuligem que, em contato com a superfície do oceano, absorve mais luz solar do que deveria e, conseqüentemente, contribui para acelerar os derretimentos de gelo. (ii) redução da biodiversidade: a disposição incorreta de resíduos pode contribuir para a introdução de agentes químicos no solo, na água e no ar, causando danos irreversíveis para a fauna e flora local, para a biodiversidade e inteiros ecossistemas, além de afetar a cadeia alimentar humana. (iii) poluição: milhares de pessoas morrem todos os dias vítimas

de doenças relacionadas com a gestão inadequada de resíduos, como diarreia, malária e câncer (ISWA, 2024).

De acordo com o Artigo 13 da PNRS, a origem de resíduos sólidos urbanos podem ser aqueles oriundos dos resíduos domiciliares e os de limpeza urbana. Segundo a mesma Política, os resíduos sólidos gerados em estabelecimentos comerciais podem ser classificados como resíduos sólidos domiciliares e, por consequência, como RSU, a depender de suas características (BRASIL, 2010d), como os resíduos gerados nas Centrais de Abastecimentos (CEASAS) e durante as apreensões do MAPA, por exemplo.

Dentre os estabelecimentos comerciais, têm-se os meios de hospedagem, definido no Art. 23 pela Política Nacional do Turismo, como empreendimentos ou estabelecimentos, independentemente de sua forma de constituição, destinados a prestar serviços de alojamento temporário, ofertados em unidades de frequência individual e de uso exclusivo do hóspede, bem como outros serviços necessários aos usuários, denominados de serviços de hospedagem, mediante adoção de instrumento contratual, tácito ou expresso, e cobrança de diária (BRASIL, 2008c).

Os dados mais recentes do IBGE indicam que no ano de 2016, existiam 31 mil hotéis no Brasil, somando aproximadamente 2,4 milhões de leitos, representando um acréscimo de 15% em relação ao número de estabelecimentos e de 15,4% do número de leitos, em comparação ao ano de 2015 (IBGE, 2017c). Esses dados demonstram a importância desse setor para a economia nacional, mas por outro lado, também é motivo de atenção devido ao aumento na geração de resíduos gerados pelos turistas, sendo a geração de RSU um dos maiores impactos causados pelos meios de hospedagem, sendo estimada entre 0,89 e 2,28 kg/hóspede.dia (SOUZA et al., 2014; ABDULREDHA et al., 2018; PHU et al., 2018; PIRANI et al., 2014).

No ano de 2022, a Confederação Nacional de Municípios (CNM) junto a mais de 5 mil municípios brasileiros (72% do total de municípios do país), realizou uma pesquisa de manifestação espontânea com o objetivo de analisar a situação brasileira em relação às obrigações da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

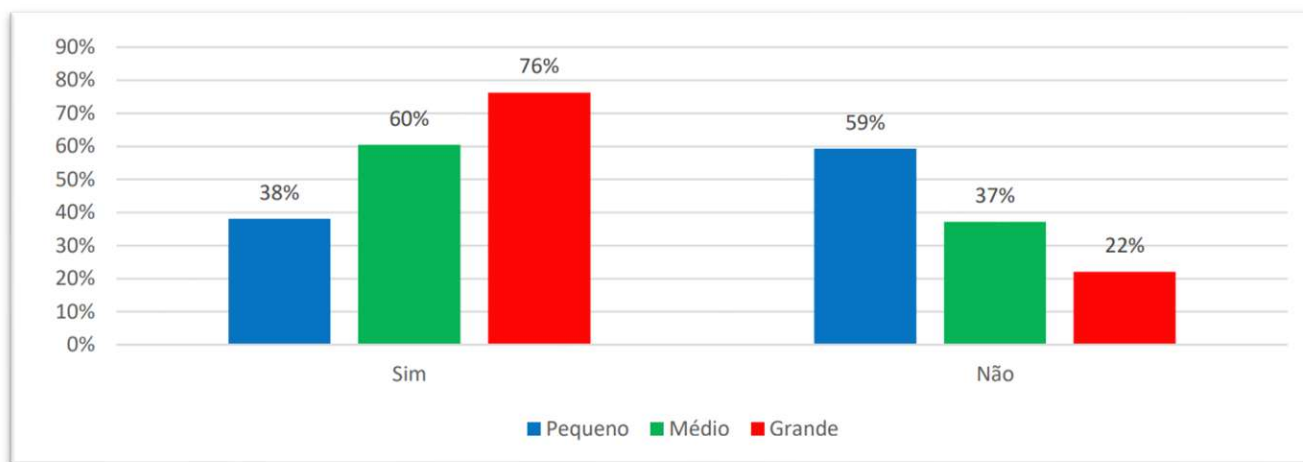
Tendo como base o parágrafo primeiro do artigo nove da PNRS a seguir:

Art. 9º. Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

§ 1º Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

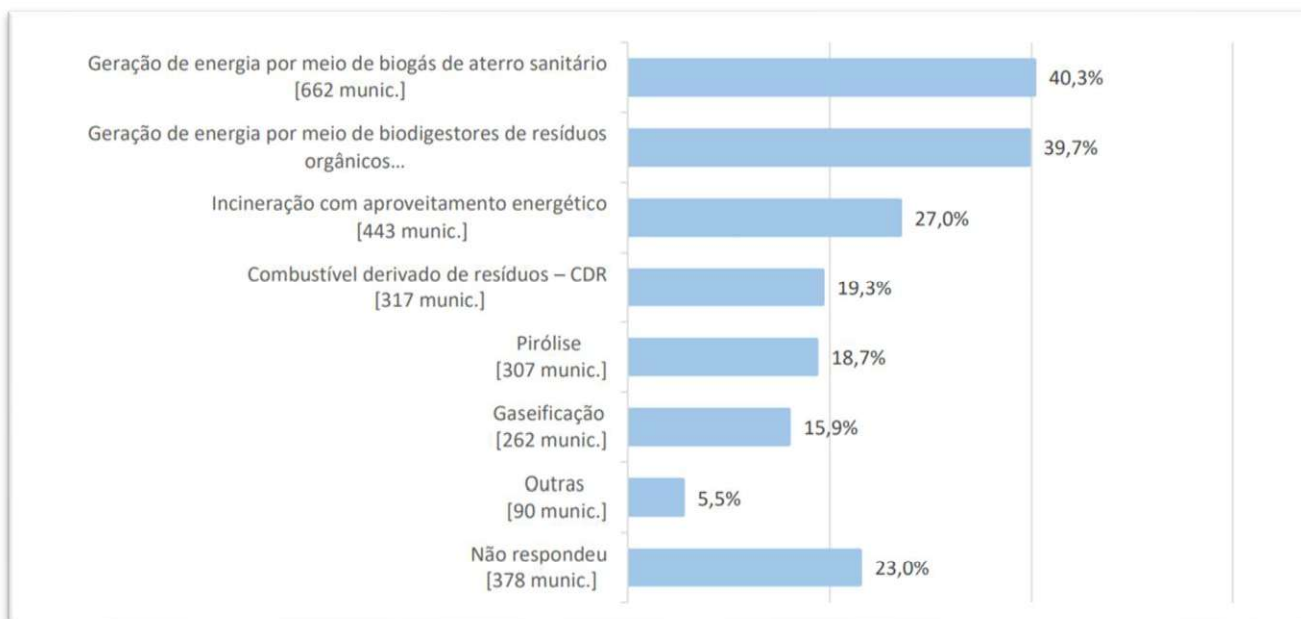
A Confederação Nacional dos Municípios (2022), sabendo do aumento no interesse pelo tema de recuperação energética de resíduos, buscou entender qual o interesse dos gestores municipais em realizar a recuperação energética com os resíduos gerados em suas áreas de atuação e quais as tecnologias consideradas para tal recuperação. Assim, os resultados da pesquisa apontaram que 41% dos municípios (1.643 municípios) consultados votaram positivamente para a possibilidade de utilizar os resíduos para gerar energia. A Figura 3 a seguir demonstra os resultados a esse questionamento, separados em pequenos, médios e grandes municípios (CNM, 2022).

Figura 3 - Interesse em gerar energia por meio de RSU x Porte populacional



Fonte: CNM, 2022

Além disso, a pesquisa também abordou sobre quais os tipos de tecnologias que os gestores municipais tinham interesse em trabalhar para a geração de energia a partir da recuperação energética dos resíduos, sendo o aproveitamento do biogás gerado naturalmente nos aterros sanitários e a produção de biogás por meio da biodigestão anaeróbia utilizando biodigestores representando 40,3% e 39,7% do interesse, respectivamente. A Figura 4 apresenta as tecnologias de aproveitamento energético de interesse dos municípios.

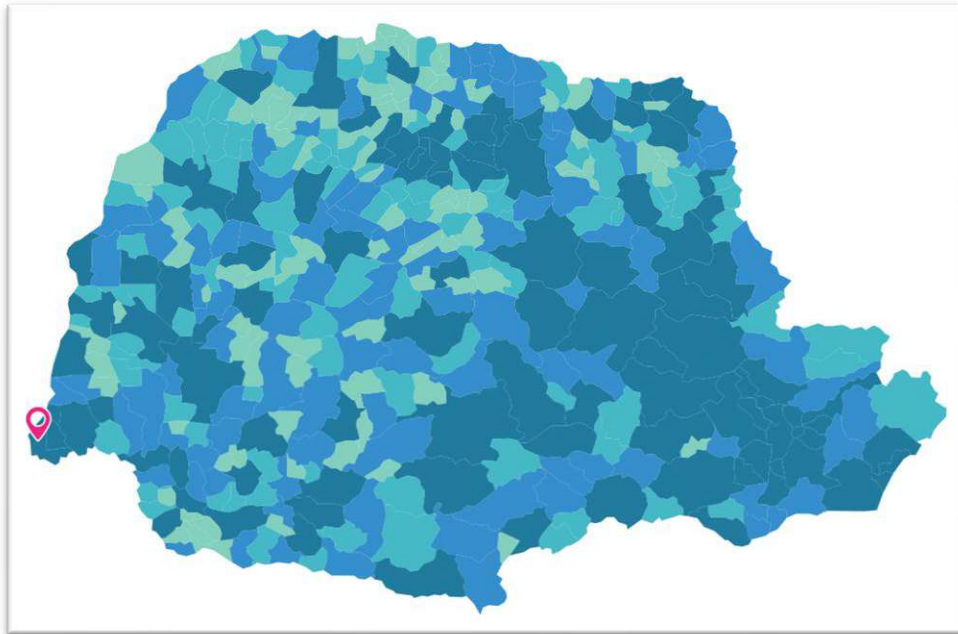
Figura 4 - Tecnologias de recuperação energética por meio de resíduos sólidos

Fonte: CNM, 2022

Diante do exposto e, tendo em vista o exponencial crescimento populacional e o consequente aumento na geração de resíduos, fica evidente a necessidade de implementação de sistemas de gestão de resíduos eficazes, que não apenas destinem esses resíduos de forma ambientalmente adequada, mas que também encontre formas de realizar o aproveitamento energético dos resíduos orgânicos como forma de reduzir o consumo de combustíveis fósseis, em conformidade com a PNRS. Grandes geradores de resíduos orgânicos do município de Foz do Iguaçu que podem contribuir com isso são o CEASA, o setor hoteleiro e as apreensões realizadas pelo MAPA.

2.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM FOZ DO IGUAÇU-PR

O município de Foz do Iguaçu fica localizado na mesorregião oeste do Estado do Paraná (Figura 5) e, segundo dados do levantamento do último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população atual da cidade é de 285.415 habitantes (IBGE, 2022a).

Figura 5 - Mapa do Estado do Paraná

Fonte: IBGE, 2022a

A coleta de lixo no município iniciou na década de 1960, com destinação para um lixão localizado no Bairro Arroio Dourado, cuja área total era de 145.981,94 m², o qual operou até o ano de 1992. Com o encerramento do lixão, em 1992, o lixo coletado no município foi destinado para a área onde atualmente fica o aterro sanitário (Bairro Porto Belo), contudo neste período era apenas um aterro controlado (FOZ DO IGUAÇU, 2024a). A Figura 6 apresenta o local de instalação do aterro sanitário de Foz do Iguaçu.

Figura 6 - Aterro Sanitário de Foz do Iguaçu

Fonte: Google Earth, 2024

A partir de 1997 o local iniciou processo de adequação para se tornar aterro sanitário e em 2002 recebeu licenciamento junto ao Instituto Água e Terra (IAT), com a Licença Ambiental de Operação nº 19.160.341-9 com vigência até 18 de abril de 2028. O aterro sanitário possui área de 258.000 m² e a sua administração e operação são realizadas pela Concessionária Pública Vital Engenharia Ambiental S/A, que por meio de contrato de concessão detém também os serviços de coleta e transporte dos resíduos sólidos urbanos (FOZ DO IGUAÇU, 2024a). Dentre os diferentes resíduos que são encaminhados para o AS como, resíduos domiciliares de limpeza urbana, são foco desse estudo aqueles do setor hoteleiro, da CEASA e das apreensões do Mapa.

2.2.1. Setor Hoteleiro

Dados de 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), apontaram que o setor de turismo acumula uma alta no crescimento de 36,9% comparando com o ano anterior, tendo como o setor hoteleiro um dos segmentos que foram impulsionados pelo aumento na receita. Esse crescimento marca o retorno das atividades turísticas após o período pré-covid-19 (BRASIL, 2022f).

Diante desses fatos, regiões turísticas, como é o caso de Foz do Iguaçu, estão mais suscetíveis à intensificação na geração de resíduos e, conseqüentemente, poderão sofrer sérias conseqüências ambientais caso o gerenciamento desses resíduos não seja eficaz.

Dentro do setor hoteleiro, os restaurantes são os maiores responsáveis pela geração de resíduos, principalmente orgânicos, visto que toda a produção das refeições oferecidas aos clientes envolve processamento de matérias-primas *in natura*, sendo que partes são desperdiçadas por não serem consideradas nas receitas, além dos desperdícios gerados no consumo dos alimentos (FONSECA e BORGES, 2006). Para que seja possível considerar os resíduos orgânicos gerados na rede hoteleira, é importante conhecer a composição gravimétrica desses resíduos, de forma a possibilitar as análises de potencial de produção de biogás.

Peruchin (2015), em seu estudo, analisou a composição gravimétrica dos resíduos sólidos gerados em um hotel de médio porte, com 74 unidades habitacionais (UH), cujo público era voltado para turismo de negócios, localizado na cidade de Pelotas, no estado do Rio Grande do Sul. Foram realizadas um total de quatro caracterizações gravimétricas, sendo selecionados os meses de alta temporada, compreendendo os meses de agosto e setembro. As quatro caracterizações foram divididas em duas semanas para cada um dos meses, sendo selecionados dias de maior e de menor ocupação. Os resíduos foram separados, agrupados por categoria (matéria orgânica putrescível, plástico, papel e papelão, vidro, metal ferroso, metal não ferroso, madeira, panos, trapos, couro e borracha, contaminante químico e biológico, misto e diversos) e pesados para

a obtenção da composição gravimétrica. Peruchin (2015) considerou o número de hóspedes e funcionários com os dados de quantidade total de resíduos gerados, o que possibilitou o cálculo da produção per capita de resíduos ($\text{kg leito}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), onde a produção média per capita resultou em $0,379 \text{ kgleito}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, sendo 49,23% a média de resíduos orgânicos, totalizando em $0,185 \text{ kgleito}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de resíduos orgânicos gerados no hotel do estudo (PERUCHIN, 2015).

Já o estudo de Elias e Tresmondi (2019) teve como objetivo determinar a composição gravimétrica dos resíduos sólidos gerados em um hotel na cidade de Americana, em São Paulo, bem como calcular a taxa média de geração per capita. O hotel do estudo possuía 80 unidades habitacionais e foi classificado como hotel *midscale*, ou seja, voltado para um público de maior renda. Para a separação dos resíduos, foram posicionados coletores (lixeiros) para que os resíduos gerados no estabelecimento fossem separados em duas opções, sendo resíduos secos (embalagens plásticas, vidro, metal, papel) e resíduos úmidos (matéria orgânica e contaminante biológico). Durante o período do estudo (aproximadamente 2 meses), foram realizadas sete caracterizações, onde os resíduos foram então pesados para a realização da composição gravimétrica e, com os dados do número de hóspedes e funcionários e do total de resíduos gerados, foi calculada a taxa de geração per capita média diária, resultando no valor de $0,533 \text{ kgleito}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, sendo a média de resíduos orgânicos de 53,25%, resultando em $0,284 \text{ kgleito}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de resíduos orgânicos gerados no hotel do estudo (ELIAS; TRESMONDI, 2019).

Quaresma (2020) também teve como objetivo realizar a composição gravimétrica de um hotel para obter os dados de geração de resíduos per capita. Esse estudo foi realizado na cidade de João Pessoa, capital da Paraíba, nordeste do Brasil, em um hotel contando com 140 unidades habitacionais. O estudo foi conduzido pelo período de 6 meses, entre os meses de outubro a abril, onde os resíduos foram separados em resíduos orgânicos, resíduos recicláveis (resíduos secos) e rejeitos. A partir da pesagem dos resíduos (quantificação) e da composição gravimétrica, assim como com os dados de número de hóspedes e funcionários, foi possível calcular a taxa de geração de resíduos per capita, que resultou em $1,343 \text{ kgleito}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, sendo a média de resíduos orgânicos de 76,12%, resultando em $1,023 \text{ kgleito}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de resíduos orgânicos gerados no hotel do estudo (QUARESMA, 2020).

2.2.2. CEASA

Segundo a Associação Brasileira de Centrais de Abastecimento (Abracen), as Centrais de Abastecimento (CEASAS) são mercados atacadistas concentrados em um único espaço para comercialização de produtos hortifrutigranjeiros (ABRACEN, 2024).

Os resíduos provenientes da CEASA de Foz do Iguaçu foram definidos como

sendo os resíduos orgânicos gerados pelas operações das baias de comercialização dos hortifrutigranjeiros da unidade, onde restos de frutas, legumes e verduras que não são comercializados por não estarem em condições adequadas para consumo humano e restos de cascas são descartados.

2.2.3. MAPA

Além dos resíduos do setor hoteleiro e dos resíduos da CEASA, aqueles provenientes de apreensões na tríplice fronteira (Brasil, Paraguai e Argentina), também são fontes de resíduos passíveis de serem consideradas em um sistema de biodigestão para produção de biogás, visto que essas apreensões são majoritariamente de resíduos vegetais e animais. Esses materiais têm composição variada como carnes, enlatados, embutidos, queijos, grãos, frutas, verduras, legumes, dentre outros. Por conta de serem considerados descaminho ou contrabando não podem ser comercializados ou consumidos, sendo na maioria das vezes encaminhados para o aterro sanitário do município.

2.2.4. Unidade de Demonstração Itaipu (UD ITAIPU)

A Unidade de Demonstração Itaipu é uma planta de biogás resultado de uma parceria entre a usina hidrelétrica e o CIBiogás (Centro Internacional de Energias Renováveis) localizada dentro das dependências da Itaipu Binacional (IB), onde é realizado o tratamento dos resíduos orgânicos dos restaurantes localizados na área da IB e de resíduos provenientes de apreensões. Essas apreensões são provenientes de fiscalizações aduaneiras na fronteira do Brasil com o Paraguai e Argentina, podendo ser por motivos de falta de legalidade no transporte ou, ainda, transporte inadequado. Dos materiais apreendidos, tudo pode ser encaminhado para a biodigestão, caracterizando-se como um substrato de composição variada, o que confere característica adequada para utilização na biodigestão (SYDNEY et al., 2021).

2.3. DEMANDA ENERGÉTICA E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Existe uma dúvida que surge quando se fala em transição energética que é: Quando começou a transição energética? Segundo Cataia e Duarte (2022), uma das possíveis respostas para essa pergunta foi a descoberta do aquecimento global, quando se começou a falar sobre a escassez do petróleo, visto que esse termo era amplamente utilizado nos estudos sobre fontes de energia nos anos 1970, 1980 e 1990 e, assim, passou a ser considerado para defender o tema da transição energética. Além disso, é imprescindível que o fato de que o atual e exagerado crescimento econômico e demanda de energia não acompanha o atual fornecimento de energia, sendo necessário e importante falar sobre diversificação da matriz energética (CATAIA e DUARTE, 2022).

A utilização de combustíveis fósseis é uma das maiores causas de emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, principalmente quando se trata do setor de transportes. Os combustíveis mais poluentes são o diesel e a gasolina, que além de poluidores são provenientes de fontes não renováveis de energia. Já os menos poluentes são o etanol e o gás natural. Na grande parte dos países de maior extensão como, China, Estados Unidos, Rússia e Canadá, o setor de transporte é dividido entre rodoviário e ferroviário. Já no Brasil, a base do transporte de cargas é rodoviária, havendo um grande consumo de combustíveis fósseis líquidos, como o diesel, que é altamente poluente e não renovável. (BRASIL, 2016e).

Globalmente, ainda há predominância no uso de combustíveis de origem fóssil, porém, em diversos países, uma boa parcela da demanda energética é suprida por biomassa, destacando a importância e a relevância do uso de fontes renováveis de energia para o alcance de uma transição energética mais sustentável (IRENA, 2019). Utilizando o setor de transporte para exemplificar, o consumo de energia proveniente de fontes renováveis para abastecer esse setor, precisa triplicar até 2030 para atender ao que se entende como desejável para atingir um cenário sustentável, segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2020).

Houve um aumento significativo na busca por energias renováveis em todo o mundo nos últimos anos. Em muitos países têm se priorizado e incentivado o uso de combustíveis alternativos para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e, conseqüentemente, reduzir as conseqüências ambientais causadas por sua queima. Nesse contexto, os biocombustíveis surgem como uma das opções mais viáveis tecnicamente e economicamente, permitindo uma diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Para melhorar a eficiência dos processos e minimizar os impactos socioambientais, estão sendo desenvolvidas e aprimoradas tecnologias de conversão de diversas fontes alternativas de energia (CAO et al., 2019). Sendo o Brasil um país com abundante renovabilidade em sua matriz energética, se torna um exemplo interessante de como resíduos orgânicos podem ser uma fonte alternativa de produção de energia renovável, possibilitando o deslocamento do uso de fontes não renováveis.

O Brasil é um país que se destaca mundialmente em termos de produção e uso de biocombustíveis, principalmente o etanol e o biodiesel, sendo o maior produtor de etanol a partir da cana-de-açúcar e o segundo maior produtor de biodiesel do mundo, fatos que contribuem diretamente na descarbonização do setor de transportes (ANP, 2020c). O incentivo na produção de biometano a partir do biogás poderá contribuir para que a diversidade de biocombustíveis disponíveis acelere a redução no uso de combustíveis fósseis, principalmente no setor de transportes.

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o biocombustível é um combustível proveniente de biomassa renovável, com capacidade para substituir fontes fósseis. Quando falamos da produção de biocombustíveis, o interesse maior é na

possibilidade de eles substituírem o petróleo. O balanço energético, que é a razão entre a energia que pode ser obtida e a necessária para obtenção do biocombustível, depende da natureza do combustível e do tipo de cultura e, devido a esse fator, existem visões otimistas e pessimistas sobre a produção de biocombustíveis, principalmente pelo fato de a cultura usada para sua fabricação concorrer com a produção de alimentos e assim elevar o preço deste último, que é o caso dos biocombustíveis de primeira geração, que utilizam derivados de soja, milho e cana-de-açúcar para sua fabricação (ANP, 2022a).

O maior incentivo a utilização de biocombustíveis no Brasil pode ser considerado como a obrigatoriedade da adição de 5% de etanol à gasolina comercializada, tendo início no ano de 1931 e tendo sido reforçada com o Plano Nacional do Álcool, em 1975, onde foi previsto o incremento progressivo de etanol à gasolina. Além disso, a introdução de veículos que começaram a rodar 100% a etanol e, ainda, o advento do motor *FlexFuel*, contribuiu ainda mais para o incentivo ao uso desse biocombustível e, conseqüentemente, para a substituição (ou ao menos a redução) no uso de combustíveis líquidos fósseis, principalmente a gasolina. Desde então, em todos os postos de combustíveis do país é possível encontrar gasolina com 27% de etanol, etanol hidratado puro e diesel com adição de até 15% de biodiesel (NOGUEIRA et al., 2021).

O uso de combustíveis alternativos de fontes renováveis em substituição aos de fontes convencionais são a resposta para o atendimento dos objetivos propostos pela *Framework Convention on Climate Change* (2023) e, nesse contexto, o Brasil se comprometeu em reduzir as emissões de GEE em 43% até 2030. Além disso, o Brasil instituiu em abril de 2021 o projeto de lei "Combustível do Futuro" (atual Lei 14.993/24) que, analogamente ao Plano Nacional do Álcool, visa a adição compulsória de biometano ao Gás Natural, como forma de incentivo à produção e uso desse biocombustível (BRASIL, 2024b).

Para a União Europeia, bem como a nível mundial, têm-se priorizado a redução da dependência por fontes fósseis de energia ao passo em que se busca por fontes alternativas e renováveis, para que seja possível uma transição energética sustentável. Uma das opções elencadas como importantes, não apenas na UE, mas também nos EUA, China e África do Sul, é o uso de resíduos orgânicos para produção de biogás, que ajudará a promover uma economia baseada em uma cadeia orgânica de suplementos (BILLING, 2017 e KUMAR, 2020).

O aumento populacional acarreta no crescimento da geração de resíduos que, por sua vez, leva à necessidade de melhorias nos sistemas de gerenciamento de resíduos e, ao mesmo tempo em que a população e a geração de resíduos aumenta, cresce também a demanda energética. Assim, a implantação de sistemas de biodigestão para produção de biogás com o aproveitamento energético de resíduos orgânicos torna-se uma alternativa importante na diversificação da matriz energética, reduzindo a atual dependência por combustíveis fósseis.

O descarte de resíduos orgânicos e sólidos urbanos está se tornando um sério problema ambiental em todo o mundo. Segundos dados do Senado Federal brasileiro, da Organização das Nações Unidas (ONU) e do Banco Mundial, a população mundial atual (aproximadamente 7 bilhões de habitantes), produz, anualmente, cerca de 1,4 bilhão de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) e a tendência é que daqui a dez anos, essa produção anual aumente para 2,2 bilhões de toneladas.

No Sistema de Informações de Geração (SIGA) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é possível encontrar dados atuais da matriz energética nacional por tipo de combustível. Atualmente, existem 629 empreendimentos que utilizam biomassa para geração de energia, o que corresponde a 17,13 mil MW instalados. Dessas 629, 443 são abastecidas por resíduos agroindustriais, 125 por resíduos florestais, 37 por resíduos sólidos urbanos (RSU), 18 por resíduos animais e 6 por biocombustíveis líquidos. Desse total, 50 são usinas a biogás, mostrando a importância do desenvolvimento e criação de mais plantas que utilizem resíduos orgânicos para produção de biogás e biometano (ANEEL, 2023).

Segundo dados da Associação Brasileira do Biogás (ABiogás) e do Instituto I17, apresentados pelo Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás (CIBiogás) no Panorama do Biogás no Brasil de 2021, o Brasil produz, atualmente, apenas 21% do potencial de produção de biogás a curto prazo, ou seja, considerando a utilização de resíduos que não apresentem obstáculos para seu uso imediato (CIBiogás, 2022a). A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) que é enviada à aterros sanitários é considerada como um potencial a curto prazo, assim como dejetos animais criados em confinamento, resíduos industriais (laticínio, abatedouros, usinas sucroenergéticas), estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários (INSTITUTO 17, 2021). Esses dados demonstram o grande potencial remanescente de biogás ainda não explorado, sendo o aproveitamento do RSO da cidade de Foz do Iguaçu-PR, um exemplo de como essa porcentagem pode ser otimizada.

Segundo o *International Renewable Energy Agency* (2019), políticas do setor de energia não estão necessariamente alinhadas com os objetivos climáticos e com a evolução da economia, ao passo em que a transição energética e os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas estão estreitamente ligadas e precisa ser vista no quadro mais amplo do desenvolvimento econômico e da sustentabilidade, além de que para que a transição seja politicamente viável e atinja sucesso a nível global, precisa ser justa e equitativa (IRENA, 2019). Para que se garanta segurança energética no país, é necessário diversificar as fontes de obtenção de energia, dando preferência para fontes mais limpas e renováveis, para que não haja dependência de recursos finitos causada, por exemplo, por vulnerabilidades climáticas (BRASIL, 2016d).

2.4. DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia (DA) é um processo bioquímico, no qual matéria orgânica é decomposta na ausência de oxigênio, onde a transformação da matéria orgânica em biogás depende da atividade conjunta de múltiplos microorganismos. Em uma usina de biogás, os produtos são o biogás e o digestato e as etapas do processo de produção de biogás são: hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese, sendo cada uma das etapas realizada por grupos distintos de microorganismos e apresentadas nos tópicos posteriores (AL SEADI, 2010; KUNZ et al., 2019).

2.4.1. Etapas da Digestão Anaeróbia

2.4.1.1. *Hidrólise*

Na primeira etapa ocorre a decomposição de compostos orgânicos complexos de alta massa molecular (lipídios, polissacarídeos e proteínas) em compostos mais simples (monômeros e oligômeros). As bactérias hidrolíticas, presentes nessa etapa, excretam enzimas extracelulares, que são as enzimas que possibilitam a hidrólise. Matérias orgânicas complexas e de difícil degradação são beneficiadas pela ação da hidrólise, pois esta é considerada etapa limitante da velocidade da digestão anaeróbia, sendo o tempo de duração da etapa de hidrólise de poucas horas para carboidratos e até alguns dias para proteínas e lipídios (AL SEADI, 2010; KUNZ et al., 2019).

2.4.1.2. *Acidogênese*

Os monômeros produzidos pela hidrólise são agora utilizados como alimentos pelas bactérias presentes na etapa da acidogênese, que produzem ácidos orgânicos de cadeia curta, como ácidos butírico, propiônico e acético, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono (AL SEADI, 2010; KUNZ et al., 2019).

2.4.1.3. *Acetogênese*

Ácidos orgânicos voláteis e álcoois são oxidados em substratos metanogênicos, como acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Essa etapa é considerada crítica para o processo de biodigestão anaeróbia devido ao aumento da pressão parcial do hidrogênio causada pela sua produção, que será, posteriormente, transformado em metano, por isso, a acetogênese e a metanogênese ocorrem em paralelo (simbiose entre dois grupos de microorganismos) (AL SEADI, 2010; KUNZ et al., 2019).

2.4.1.4. *Metanogênese*

Essa etapa ocorre em condições estritamente anaeróbias, onde o carbono da biomassa é convertido em dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) pela ação das arqueas

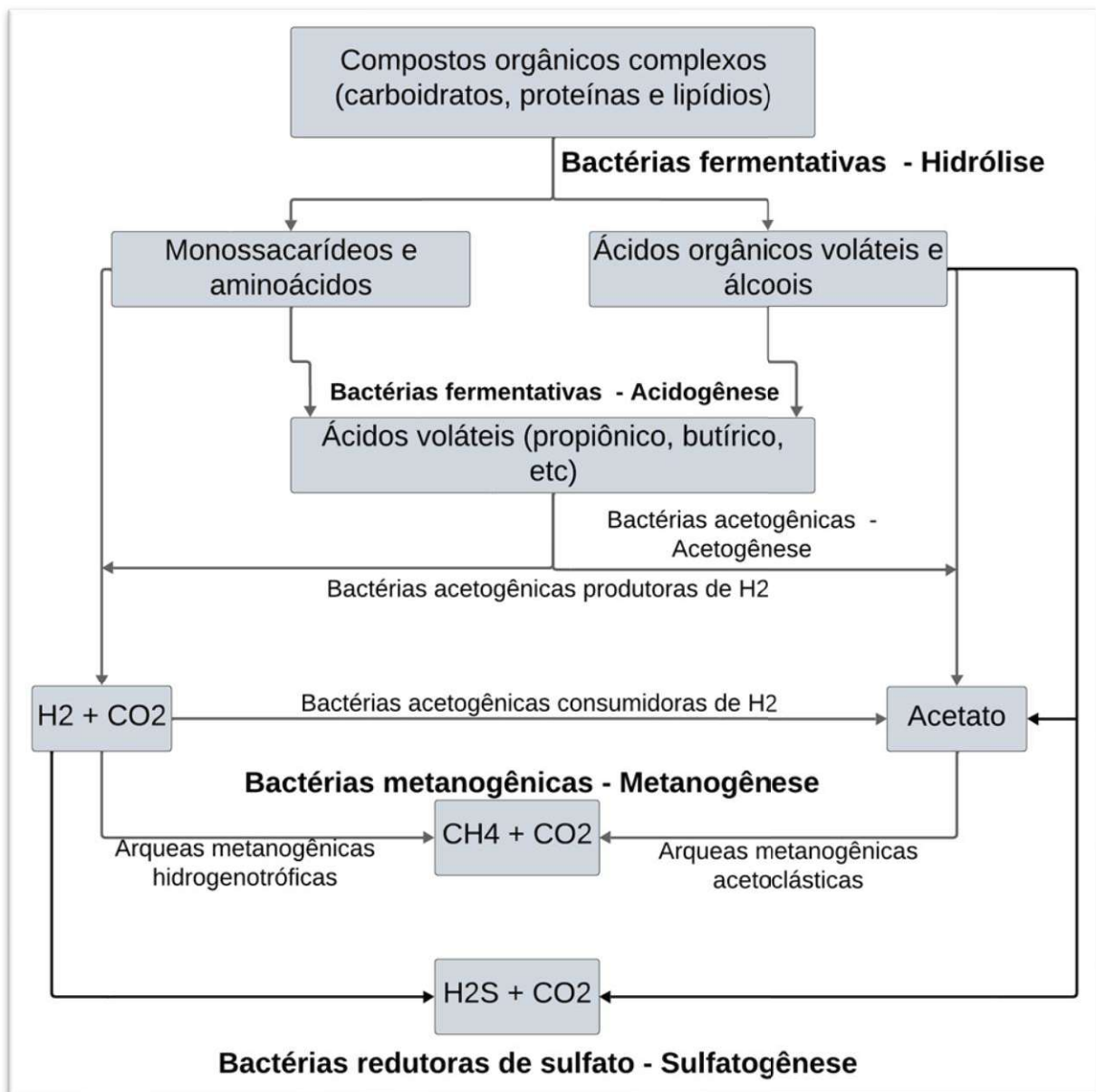
metanogênicas. Existem dois principais tipos de bactérias que formam o metano, as acetotróficas e as hidrogenotróficas. Usualmente, os autores consideram que 70% do metano é formado pela redução dos acetatos pelas bactérias acetotróficas e 30% pela conversão do hidrogênio e dióxido de carbono pelas bactérias hidrogenotróficas. Porém, para substratos agropecuários, as arqueas metanogênicas acetoclásticas, aquelas responsáveis pela redução dos acetatos, são mais sensíveis às mudanças de pH e elevadas concentrações de amônia, podendo contribuir no predomínio da produção pelas arqueas metanogênicas hidrogenotróficas. Na ausência das metanogênicas acetoclásticas, o acetato produzido durante a biodigestão é oxidado pelas bactérias homoacetogênicas produzindo CO₂ e H₂, os quais são utilizados como substrato pelas arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, produzindo metano. A metanogênese é a etapa mais sensível e mais lenta do processo e pode ser influenciada por diversos fatores operacionais, como composição dos substratos, rotina de alimentação, temperatura e pH. Mudanças bruscas nesses fatores podem cessar a produção de metano (AL SEADI, 2010; KUNZ et al., 2019).

2.4.1.5. *Sulfetogênese*

Sulfetogênese, ou redução de sulfato, é um processo onde compostos sulfurados como os sulfatos e sulfitos são reduzidos a sulfeto por meio das chamadas sulfatoredutoras. Na ausência de sulfato, as etapas da digestão anaeróbia (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese), ocorrem normalmente. Já na presença de sulfato, compostos intermediários podem se formar, acarretando alterações nas rotas metabólicas da DA, pois as bactérias sulfatoredutoras se tornam concorrentes com as bactérias acetogênicas e metanogênicas, causando redução na produção de metano (CHERNICHARO, 2007).

A Figura 7 ilustra as etapas da digestão anaeróbia.

Figura 7 – Etapas da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de CHERNICHARO, 2007.

2.4.2. Parâmetros da Digestão Anaeróbia

Para garantir as condições apropriadas aos microrganismos presentes nos sistemas de biodigestão e a eficiência da DA, é necessário levar em consideração alguns parâmetros considerados críticos, sendo eles os níveis de oxigênio, temperatura do meio, nível de pH, micro e macronutrientes (AL SEADI, 2010).

A eficácia da reprodução dos microrganismos que fazem parte da DA depende de diversos parâmetros para a maximização da produção de biogás. Além disso, todos esses parâmetros

devem ser monitorados de forma contínua. Os principais parâmetros que influenciam o processo de digestão anaeróbia são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros que influenciam o processo de digestão anaeróbia (continua)

Parâmetro	Descrição
Oxigênio	<p>Para garantir a anaerobiose, é necessário que o sistema de biodigestão esteja livre da entrada de oxigênio, pois as bactérias metanogênicas são essencialmente anaeróbias e a presença desse gás, mesmo que em pequena quantidade, já é suficiente para impedir que sobrevivam e, conseqüentemente, a produção de metano será prejudicada, com uma produção maior de dióxido de carbono.</p>
Temperatura	<p>Os processos de biodigestão podem ser classificados em</p> <ul style="list-style-type: none"> • Psicrofílicos: temperaturas inferior a 20°C); • Mesofílicos: temperaturas entre 20 a 45°C; e • Termofílicos: temperaturas entre 45 a 60°C. <p>Microrganismos metanogênicos possuem capacidade de adaptação a diferentes níveis de temperatura. Porém, para que essa adaptação ocorra de forma efetiva, é necessário que a variação seja lenta, pois mudanças bruscas e repentinas (> 2°C) podem acarretar na inibição do processo de biodigestão, por isso o controle desse parâmetro se torna essencial, para se garantir a continuidade da produção de biogás.</p> <p>A temperatura pode afetar parâmetros físico-químicos, velocidade de crescimento e metabolismo dos microrganismos, onde maiores temperaturas podem aumentar os processos de degradação, mas em contrapartida são mais onerosos no quesito consumo energético.</p> <p>Manter a estabilidade da temperatura, independentemente da faixa definida, é de suma importância para a DA e a escolha da faixa depende de diversos fatores, como o tipo de substrato e a demanda energética disponível.</p>
pH	<p>Assim como a faixa de temperatura, o pH também precisa estar em uma faixa adequada para que a DA ocorra, sendo que cada etapa da DA possui uma faixa de pH considerado ótimo, onde nas primeiras etapas a faixa é de 5,2 a 6,3 e nas últimas etapas entre 6,5 e 8,0. Em casos do pH no sistema abaixo de 6,0 ou acima de 8,3, o processo de digestão pode ser severamente inibido. A amônia produzida durante a degradação de proteínas pode influenciar no aumento do pH, enquanto o acúmulo de ácidos orgânicos voláteis pode influenciar na redução do pH. Sendo assim, é importante manter uma alimentação balanceada do biodigestor, bem como realizar o monitoramento contínuo do pH.</p>

Quadro 1 - Parâmetros que influenciam o processo de digestão anaeróbia (conclusão)

Parâmetro	Descrição
Nutrientes	<p>A taxa de crescimento dos microrganismos dentro de um sistema de biodigestão está diretamente ligada à concentração e disponibilidade de vitaminas, micro e macronutrientes. Assim, para garantir que os microrganismos se desenvolvam adequadamente e, que a produção de metano seja maximizada, é necessário garantir que haja entrada de substratos de forma balanceada (proteínas, gorduras e carboidratos), ou seja, manter uma relação carbono/nitrogênio (C/N) entre 10 a 30, visto que cada espécie de microrganismo tem suas próprias necessidades.</p> <p>Em casos de elevados teores de carbono e reduzidos teores de nitrogênio (relação C/N elevada), haverá redução na produção de metano. Já em uma relação C/N baixa, haverá formação exagerada de amônia, inibindo a biodigestão e produção de biogás.</p> <p>Além disso, o fósforo (formam o trifosfato de adenosina que transporta energia) e o enxofre (obtido pelos aminoácidos) são nutrientes igualmente importantes. Tanto em casos onde há baixa concentração de nutrientes, como em casos onde há sobrecarga de nutrientes, poderá haver inibição e distúrbios nas etapas da DA.</p> <p>A amônia (obtida pela decomposição de proteínas) é um componente nutricional com uma função essencial para o crescimento dos microrganismos anaeróbios, porém, é necessário ter o controle do processo para que os níveis não ultrapassem 80 mg/L, pois pode ser tóxica e inibitória em concentrações elevadas, principalmente para as bactérias metanogênicas.</p> <p>Diante temperatura e pH elevados, os níveis de amônia se elevam, podendo acarretar em inibição e até o colapso do sistema, tornando importante o monitoramento desses parâmetros continuamente.</p>

Fonte: AL SEADI, 2010; KUNZ et al., 2019; MDR, 2010a.

2.4.3. Parâmetros Operacionais

Além dos parâmetros da DA apresentados, existem outros parâmetros necessários de serem monitorados antes e durante o início do processo da digestão anaeróbia, que são chamados de parâmetros operacionais e precisam ser respeitados para garantir o correto funcionamento dos biodigestores (KUNZ et al., 2019).

O Quadro 2 apresenta os principais parâmetros operacionais da DA, bem como a forma de obtê-los.

Quadro 2 - Parâmetros operacionais da digestão anaeróbia

Parâmetro	Descrição
Carga Orgânica Volumétrica	A Carga orgânica volumétrica (COV) indica a quantidade máxima de substratos a serem adicionados diariamente por unidade de volume do biodigestor. A COV adequada garante as condições ideais para o desenvolvimento dos microrganismos, além de garantir a estabilidade do sistema. Em casos de alimentação maior do que a ideal, haverá acúmulo de ácidos no sistema, causando inibição. Já em casos de baixa alimentação, ou seja, baixa COV, haverá reduzida taxa de degradação e, conseqüentemente, baixa produção de biogás. Para definir a COV adequada, é necessário relacionar com o modelo de biodigestor, tecnologias aplicadas e tipos de substratos.
Tempo de Retenção Hidráulica	O tempo de retenção hidráulica (TRH) é expresso em dias e representa o tempo em que os substratos ficam dentro do biodigestor, ou seja, é a razão entre o volume do biodigestor e a vazão de alimentação. É importante garantir um TRH adequado para que microrganismos não sejam “lavados” para fora do biodigestor antes do tempo, tornando curto o tempo em que as bactérias estão fazendo a degradação e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade de produção de biogás. Para resíduos orgânicos, o TRH considerado adequado, segundo Beaux (2005), é na faixa de 20 a 30 dias (BEAUX, 2005).
Produtividade, rendimento e taxa de degradação	A produtividade é representada pela taxa de produção de biogás em relação ao volume do biodigestor. O rendimento indica o volume de produção de biogás em relação à quantidade de substrato alimentada. A taxa de degradação representa a eficiência do aproveitamento do substrato no biodigestor.
Agitação	Para que haja contato adequado e suficiente entre o substrato e os microrganismos, é necessário que ocorra a homogeneização da biomassa dentro do biodigestor. Uma maneira eficiente de garantir essa homogeneização é a agitação, que além da mistura adequada, também evita a formação de crostas e camadas, que reduz a área de contato dos microrganismos e obstrui a passagem dos gases. O nível de agitação precisa ser controlado para evitar agitação intensa, pois isso pode destruir comunidades de microrganismos.
Alcalinidade	A alcalinidade é a capacidade que um sistema possui de evitar alterações bruscas no pH, ou seja, capacidade de tamponamento.
AI/AP	A relação AI/AP representa a relação entre o acúmulo de ácidos orgânicos voláteis (AI) e alcalinidade (AP).

Fonte: Fonte: AL SEADI, 2010; KUNZ et al., 2019; MDR, 2010a.

Além dos parâmetros mencionados no Quadro 2, o Quadro 3 apresenta parâmetros operacionais importantes a serem monitorados em plantas de biogás.

Quadro 3 - Parâmetros operacionais para monitoramento

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Determinação
Temperatura	T	°C	Medida durante a operação
Pressão	P	mbar	Medida durante a operação
Capacidade	V	m ³ /dia; t/dia	Dimensionado em projeto
Volume do reator	V _r	m ³	Dimensionado em projeto
Produção de biogás	V	m ³ /dia	Medido durante a operação
Tempo de retenção hidráulica	TRH	Dias	Dimensionado em projeto
Carga Orgânica Volumétrica	COV	kg ST/m ³ .dia	Dimensionado em projeto
Concentração de metano no biogás	CH ₄	%	Medida durante a operação

Fonte: Adaptado de AL SEADI, 2010.

2.4.4. Digestato

Digestato é o nome dado ao efluente resultante da digestão anaeróbia, sendo possível realizar tratamentos para remoção de nutrientes e lançar em corpos hídricos ou, ainda, utilizá-lo como fertilizante orgânico na agricultura, sendo que para cada aplicação haverá aspectos técnicos e econômicos envolvidos (KUNZ et al., 2019).

As características e composição do digestato dependem da composição e variabilidade dos substratos que são utilizados na DA, bem como no tipo de biodigestor e nas tecnologias empregadas para pré-tratamento dos substratos e pós-tratamento do digestato (KUNZ et al., 2019).

Para a aplicação do digestato no solo como fertilizante é necessário realizar análises do solo para que sejam aplicadas doses adequadas do digestato e não ultrapassar os limites necessários de adubação e, de forma análoga, para lançamento do digestato tratado em copor hídrico, é necessário seguir os parâmetros de lançamentos exigidos pelos órgãos ambientais competentes (KUNZ et al., 2019).

2.5. BIODIGESTORES

O biodigestor, um equipamento com isolamento interno de ar, onde ocorre a decomposição da matéria orgânica e a consequente produção de biogás, é o coração de uma planta de

biogás. Além de ser isolado para não haver entrada de ar, outras características típicas são o sistema de alimentação de substratos, sistema de saída de digestato, sistemas de agitação e de aquecimento. O material construtivo pode variar entre concreto, aço, fibra de vidro, membranas plásticas, entre outros (AL SEADI, 2010).

Para definir o tipo de biodigestor mais adequado para um projeto, diversos fatores devem ser levados em consideração, pois o modelo a ser definido está diretamente ligado ao seu processo de fermentação (MDR, 2010a). Além disso, deve ser analisado qual regime de alimentação será seguido, qual será a forma de alimentação dos substratos, qual a concentração de sólidos totais da biomassa e qual o tipo de mistura ou agitação (KUNZ et al., 2019).

A seguir serão apresentados os principais tipos de biodigestores utilizados em plantas de biogás no Brasil.

2.5.1. Biodigestor de lagoa coberta (BLC)

Biodigestor de lagoa coberta (BLC) possui formato de tanque, geralmente retangular, escavado no solo. O solo é impermeabilizado com material geossintético, comumente policloreto de vinila (PVC) ou polietileno de alta densidade (PEAD) e a cobertura do tanque é feita com o mesmo tipo de material geossintético utilizado na impermeabilização do solo. O material geossintético precisa ter baixa permeabilidade a fluídos e gases, além de ser flexível para possibilitar o armazenamento do biogás (KUNZ et al., 2019), conforme Figura 8.

Esse tipo de biodigestor é muito utilizado na área rural, para aproveitamento energético dos efluentes gerados na criação de animais. Devido a sua simples construção e operação, é considerado de baixo nível tecnológico e são mencionados também como modelo “canadense” ou “biodigestor de lona”. Ainda devido à simples construção e operação, geralmente não há sistema de aquecimento, agitação e gestão de lodo, implicando em limitações quanto à eficiência na produção de biogás, principalmente em regiões de clima mais frio e na limitação em relação ao tipo de substrato que pode ser alimentado, principalmente quanto ao teor de sólidos totais (ST), que se limita a teores de até 3% de ST e ao teor da carga orgânica volumétrica (COV), entre 0,3 a 0,5 kgSVm⁻³d⁻¹ (KUNZ et al., 2019).

Figura 8 - Biodigestor de lagoa coberta

Fonte: ONUDI, 2019c

2.5.2. Biodigestor *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR)

Reator com tanque agitado continuamente ou, do inglês, *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR), popularmente chamado de Biodigestor CSTR, é um modelo de biodigestor que trabalha com cargas orgânicas volumétricas entre 1 a 4 kgSVM³d⁻¹, tendo seu conteúdo interno homogeneizado com um sistema de agitação. A configuração desse modelo de biodigestor permite o tratamento de substratos com teores de sólidos elevados, comparado com o modelo BLC e, por isso, é comumente utilizado em plantas de biogás que utilizam misturas de diferentes substratos (codigestão). O sistema de agitação presente nos biodigestores CSTR auxilia no aumento da área de contato entre a matéria orgânica e os microrganismos, garantindo maior eficiência na produção de biogás, bem como o sistema de aquecimento, que também colabora para a estabilização do processo (KUNZ et al., 2019). Esse modelo de biodigestor possui alimentação contínua, ou seja, matéria orgânica precisa ser adicionada com periodicidade determinada e, dessa forma, produz biogás de forma ininterrupta (AL SEADI, 2010). Em relação à forma construtiva, esse modelo de biodigestor é construído, geralmente, de aço ou concreto armado, sendo a prova de ar, com isolamento térmico, sistema de aquecimento, agitação e sistema de remoção de lodo. A cúpula do biodigestor pode ser construída do mesmo material do restante do biodigestor, sendo o biogás produzido armazenado em reservatórios externos (gasômetros externos), conforme Figura 9. Outra opção é a cúpula produzida por membrana flexível, onde uma parcela do biogás produzido fica armazenado na própria cúpula (AL SEADI, 2010).

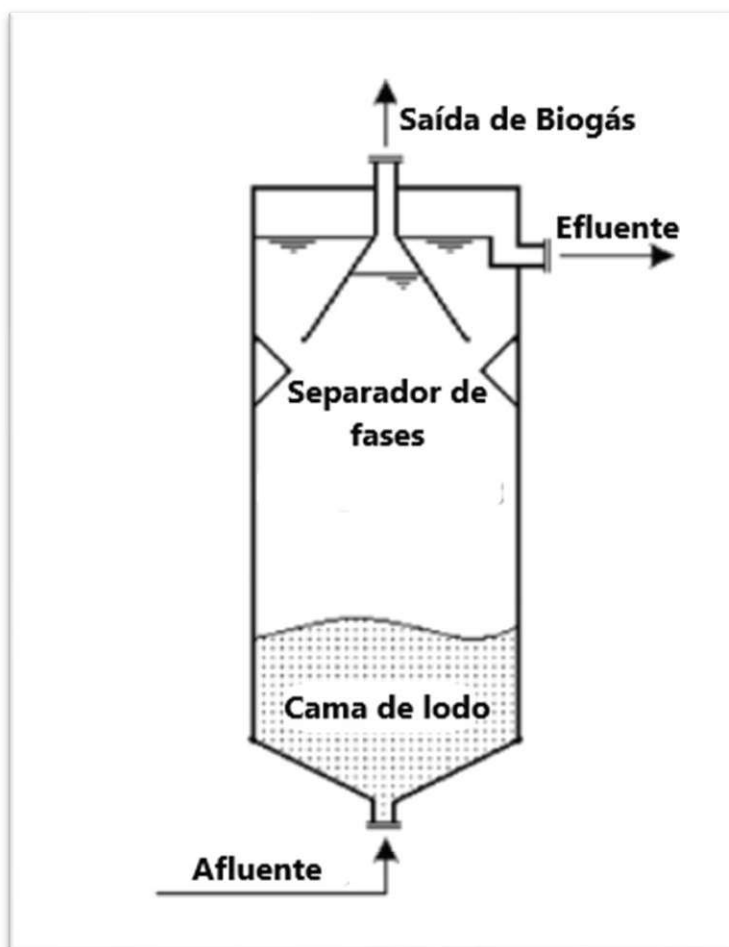
Figura 9 - Biodigestor CSRT

Fonte: Zorg Biogas, 2024.

2.5.3. Biodigestor tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB)

A abreviatura UASB deriva do termo em inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*. Biodigestores UASB caracterizam-se pela condução ascendente do afluente por meio de uma camada de lodo até o topo do tanque, onde está localizado um separador de fases, conforme Figura 10. O tempo de retenção hidráulica (TRH), para esse modelo é reduzido, em comparação com os modelos BLC e CSTR, sendo de apenas poucas horas a poucos dias (entre 4 e 72 horas). Além disso, suportam cargas orgânicas elevadas (de 0,5 a 8,0 kgSVm³d⁻¹ ou 2 a 32 kgDQOsolúvelm⁻³d⁻¹), especialmente em condições em que a matéria orgânica se encontra solubilizada. Em comparação com BLC e CSTR, os modelos UASB trabalham com os menores teores de ST, sendo <2%, reduzindo as opções de tipos de substratos que podem ser tratados, sendo mais empregados para a biodigestão anaeróbia de efluentes, especialmente esgoto doméstico. Este tipo de biodigestor realiza a distribuição do fluxo de alimentação e dispensa a recirculação do efluente para promover a fluidificação, pois o gás produzido na camada de lodo é suficiente para manter o lodo em suspensão e garantir uma mistura adequada (KUNZ et al., 2019).

Figura 10 - Biodigestor UASB



Fonte: Adaptado de CHERNICHARO, 2007

2.5.4. Definição do tipo de biodigestor

Por ser o coração da planta de biogás, é necessária a definição correta do modelo de biodigestor a ser utilizado no projeto (KUNZ et al., 2019). O projeto de uma planta de biogás parte, basicamente, da quantidade e do tipo de biomassa que será utilizada. Essas informações, juntamente aos atributos da matéria-prima, como sua característica físico-química, permitem a definição da tecnologia de biodigestão adequada para o projeto.

Cada substrato possui especificidades que precisam ser avaliadas e analisadas para a escolha da melhor opção de tecnologia de biodigestão para o projeto. Os parâmetros: sólidos totais, sólidos voláteis e carga orgânica volumétrica da biomassa, trazem informações valiosas para a escolha do biodigestor, sendo importante considerá-los no processo de tomada de decisão.

- Sólidos Totais (ST): O teor de sólidos totais dos substratos é um dos principais parâmetros a ser avaliado, visto que diferentes teores de ST acarretam na seleção de biodigestores distintos.

Além da concentração de ST na entrada do sistema, também é importante levar em consideração o teor de ST na saída, para avaliar a eficiência na degradabilidade do sistema.

- Sólidos Voláteis (SV): O teor de sólidos voláteis representa a porção dos substratos que será degradada pelos microrganismos anaeróbios e posteriormente convertida em biogás.
- Carga Orgânica Volumétrica (COV): A carga orgânica volumétrica representa a quantidade de sólidos voláteis (kg) alimentada para cada metro cúbico do volume de biodigestor disponível por dia. A COV é, portanto, medida em $\text{kgSVm}^{-3}\text{d}^{-1}$.

O primeiro critério é determinar se o substrato é considerado bombeável ou empilhável, ou seja, úmido ou seco. Para isso, é analisado o teor de ST inicial dos substratos. O Quadro 4 auxilia na tomada de decisão da tecnologia de biodigestão que melhor se adequa ao projeto, sendo válido mencionar que os limites de ST podem variar de acordo com as legislações específicas de cada país ou região (AL SEADI, 2010).

Quadro 4 - Critério para definição da rota de biodigestão adequada

Critério	Parâmetro	Classificação
Teor de ST dos substratos	ST < 15%	digestão úmida
	ST entre 20-40%	digestão seca

Fonte: ONUDI, 2021e; AL SEADI, 2010.

Após a definição da rota tecnológica de biodigestão a ser adotada, define-se a tecnologia de biodigestão. Nessa etapa, analisa-se a concentração de sólidos totais e a carga orgânica volumétrica que serão fornecidas ao sistema (Tabela 1).

Tabela 1 - Critérios para definição da tecnologia de biodigestão adequada

Tecnologia de biodigestão	Sólidos totais (ST)	Carga orgânica volumétrica (COV) ($\text{kgSVm}^{-3}\text{d}^{-1}$)
UASB	ST < 2%	0,5 a 8,0
BLC convencional	ST < 3%	0,3 a 0,5
CSTR	ST < 12%	1 a 4

Fonte: Adaptado de KUNZ et al., 2019

Após a definição pelo tipo de biodigestor adequado, é necessário levar em consideração um fator tecnológico que estará diretamente relacionado à tecnologia de biodigestão e aos resultados obtidos em análises laboratoriais para o potencial de produção de biogás. Ou seja, considerando que resultados laboratoriais indicam valores obtidos em condições controladas e

otimizadas, é necessário aplicar um fator de segurança nos valores na estimativa do potencial de produção de biogás, sendo recomendado um fator de 60% para biodigestores do tipo BLC e de 80% para os do tipo CSTR (ONUUDI, 2022d).

2.6. COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

O gás produzido pela decomposição orgânica é uma mistura gasosa que consiste principalmente em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de conter vapor de água e vários outros gases em pequenas quantidades. O metano é o componente mais relevante dessa mistura, pois é responsável pelo poder calorífico do biogás e, portanto, sua proporção afeta diretamente seu poder combustível. O controle seletivo do processo oferece pouca flexibilidade para ajustar a composição do gás, a qual depende principalmente do tipo de substrato utilizado. Além disso, a quantidade de metano é afetada por fatores do processo, como a temperatura, a carga orgânica volumétrica, tempo de retenção hidráulica, assim como eventuais distúrbios no processo (MDR, 2010a).

Os níveis de lipídios, proteínas e carboidratos presentes nos substratos alimentados no biodigestor, além das condições físicas e químicas, é que vão determinar o potencial de produção de metano produzido. A presença do gás sulfeto de hidrogênio (H_2S) desempenha um papel crucial na qualidade da mistura gasosa. Seu teor não deve ser excessivamente alto, pois mesmo em concentrações reduzidas, o H_2S pode inibir o processo de digestão. Além disso, altas concentrações de H_2S no biogás podem causar corrosão em instalações de cogeração e caldeiras (MDR, 2010a). A Tabela 2 apresenta a composição média do biogás.

Tabela 2 - Composição média do biogás

Componente	Símbolo	Conteúdo (% volume)
Metano	CH_4	50-75
Dióxido de carbono	CO_2	25-45
Vapor d'água	H_2O	2 (20°C) -7 (40°C)
Oxigênio	O_2	<1
Nitrogênio	N_2	<2
Amônia	NH_3	<1
Hidrogênio	H_2	<1
Sulfeto de hidrogênio	H_2S	<2

Fonte: Adaptado de AL SEADI, 2010.

2.7. APLICAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS

O gás metano, por seu grande potencial poluidor (maior que o potencial poluidor do dióxido de carbono), contribui de forma negativa nas consequências do efeito estufa e aquecimento global. Assim, se lançado diretamente para a atmosfera, causa efeitos ambientais e para a qualidade da saúde e vida da população (GARCILASSO, et al., 2018). Uma forma de evitar ou minimizar esses efeitos, é o aproveitamento energético do metano, com seu direcionamento para aplicações energéticas, reduzindo, dessa forma, os impactos ambientais.

O biogás é um gás versátil, podendo ser considerado para sua utilização como produção de energia elétrica, energia térmica ou, ainda, como substituto a combustíveis líquidos automotivos. O nível de pureza do biogás vai depender do fim energético a ser considerado e das exigências tecnológicas de sistemas e equipamentos (GARCILASSO, 2018). Os detalhes em relação aos tipos de tratamento e purificação do biogás serão explanados nos próximos tópicos.

2.7.1. Energia elétrica

O biogás pode ser utilizado para a produção de energia descentralizada com sistemas combinados de calor e eletricidade – cogeração, e o excedente de eletricidade pode ser injetado na rede interligada ou vendido para consumidores livres (GARCILASSO, 2018).

Para produzir energia elétrica a partir do biogás, um dos tipos de equipamentos mais comumente utilizados é o grupo motogerador (GMG), que são máquinas térmicas que convertem a energia química do biogás em energia mecânica por meio da queima do biogás e, por fim, ocorre a conversão em energia elétrica por meio do gerador, com eficiência elétrica média de 37% (ONU, 2020a).

2.7.2. Energia térmica

Energia térmica é a forma mais simples de aproveitamento energético do biogás, pois é realizado sua queima direta em queimadores ou boilers, mais comumente utilizado para aquecimentos em fazendas e pequenas propriedades, podendo ser considerado seu uso no local onde é produzido ou, ainda o transporte do biogás para seu uso em outros locais (AL SEADI, 2010).

2.7.3. Cogeração

Um dos usos mais comuns do biogás para energia térmica é em conjunto com usinas de geração de energia elétrica, na cogeração, onde energia elétrica e térmica são geradas simultaneamente, sendo majoritário o uso de motores de combustão acoplados a um gerador nesses tipos de usinas. Para possibilitar a recuperação da energia térmica dos gases de combustão e escape

na cogeração, são utilizados trocadores de calor, circuito de arrefecimento e óleo lubrificante, dispositivos hidráulicos, elétrica e de controle (MDR, 2010a).

A cogeração é um uso padrão em muitos países que possuem o setor de biogás desenvolvido e, por isso, considerada como um uso eficiente do biogás para geração de energia elétrica e térmica. O calor produzido pode ser considerado para aquecer a biomassa dentro dos biodigestores, além de também ser considerado para usos em processos industriais, atividades agropecuárias ou aquecimento de ambientes. (AL SEADI, 2010).

2.7.4. Biometano

Biometano, segundo a ANP, é um biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás que, atendendo às exigências de qualidade das resoluções da ANP, é considerado análogo ao gás natural e, assim, podendo substituí-lo, seja como combustível veicular ou para injeção na rede de gás natural (ANP, 2020b).

O uso de biometano como substituto aos combustíveis fósseis é uma forma de ampliar a matriz energética ao passo em que se gera benefícios socioeconômicos e ambientais. Em países da Europa, o uso de biometano como combustível veicular e para injeção na rede já é uma realidade bem desenvolvida, permitindo o amplo abastecimento da população (MDR, 2010a).

2.7.5. Fatores de Conversão (FC)

A fim de se obter o potencial de produção de biogás dos três grandes geradores apresentados no capítulo 2.2, foram considerados fatores de conversão resultantes de diferentes estudos. Para resíduos provenientes de restos de alimentos de restaurantes (Hotéis) e para resíduos de origem animal provenientes do MAPA foi considerado o estudo apresentado por Sydney (2021), onde foram realizadas análises laboratoriais para obtenção do potencial de produção de biogás para resíduos de restaurantes e para resíduos de carne (origem animal) (SYDNEY et al., 2021). Além do fator de conversão, o estudo de Sydney também apresenta o teor de sólidos (ST) para resíduos orgânicos de restaurantes, de 22%, o qual será considerado como base para o dimensionamento do sistema de biodigestão, considerando a diluição com água para atingir o teor de 12%, conforme Tabela 1.

Já para a porção considerada de origem vegetal dos resíduos de apreensão do MAPA e para os resíduos do CEASA, foi considerado o fator de conversão obtido nos estudos de Edwiges (2017) que analisou em laboratório o potencial de produção de biogás para resíduos de frutas, verduras e legumes (EDWIGES et al., 2017). A Tabela 3 apresenta os fatores de conversão

considerados para esse estudo.

Tabela 3 - Fatores de Conversão

Setor	Fator de Conversão
Hotéis	144 m ³ biogás / t RSO Hotéis
CEASA	33 m ³ biogás / t RSO CEASA
MAPA Origem vegetal	33 m ³ biogás / t RSO CEASA vegetal
MAPA Origem animal	244 m ³ biogás / t RSO CEASA animal

Fonte: MAPA, 2024; SYDNEY, 2021; EDWIGES, 2017.

2.8. TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

Os principais componentes a serem removidos da composição do biogás são o gás sulfídrico (H₂S), que é corrosivo para grande parte dos equipamentos presentes em plantas de biogás e a umidade, que influencia no poder calorífico, podendo prejudicar o processo de queima (GRACILASSO, 2018)

O nível de tratamento e purificação que o biogás precisa ser submetido vai depender da aplicação energética a ser considerada. Em casos de aplicação do biogás para aproveitamento térmico, o biogás não precisa de tratamentos robustos, sendo necessário apenas a remoção de umidade e remoção de sulfeto de hidrogênio. Para aplicação do biogás para geração de energia elétrica ou cogeração é necessário remover a umidade, sulfeto de hidrogênio e siloxanos (a depender da origem do biogás) (KUNZ et al., 2019).

A aplicação do biogás para biometano veicular ou para injeção na rede de gás natural necessita, além do tratamento para remoção de umidade, sulfeto de hidrogênio e siloxanos, também a remoção do dióxido de carbono, conhecido como purificação ou, do inglês, como “*upgrading*”. A purificação é necessária para que o biometano atinja os níveis adequados de metano e demais componentes para ser considerado análogo ao gás natural (AL SEADI, 2010).

O Quadro 5 apresenta os requisitos de tratamento e purificação para diferentes aplicações energéticas do biogás e o Quadro 6 apresenta as principais tecnologias de purificação de biogás.

Quadro 5 – Níveis de tratamento e purificação para diferentes aplicações do biogás

Qualidade do biogás	Tratamento	Purificação	Aplicação
35-70% CH ₄	Sim	Não necessita	Energia térmica, mecânica e elétrica
94-99% CH ₄	Sim	Sim	Injeção na rede de gás natural, combustível veicular e células de combustível

Fonte: Adaptado de KUNZ et al., 2019.

Quadro 6 – Tecnologias de remoção de CO₂ (continua)

Tecnologia	<i>Water Scrubbing</i>	<i>Pressure Swing Adsorption (PSA)</i>	Membranas
Descrição	O biogás é injetado na base da coluna de absorção sob pressão e temperatura controlados. O CO ₂ , em função da diferença de solubilidade é absorvido fisicamente no solvente (água), sendo removido e enviado com a solução líquida para a coluna de regeneração. O metano passa pela coluna e é coletado na base superior da coluna.	O biogás é submetido a colunas pressurizadas contendo adsorvente. Nesse processo, (devido ao tamanho dos poros, porosidade e afinidade do adsorvente) o adsorvente retém as moléculas de CO ₂ em sua estrutura, permitindo que boa parte do metano passe livremente pela coluna até o topo onde é capturado.	Esta tecnologia visa passar a corrente de gás por membranas que possuem diferentes permeabilidades. A seletividade e a permeabilidade das membranas permitem que o CO ₂ seja separado da corrente de gás em um sistema operando com pressão elevada.
Forma/necessidade de regeneração	Regeneração por injeção de ar/modulação de pressão.	Regeneração por modulação de pressão.	Não regenerável.
Necessidade de pré-tratamento	H ₂ S: Permite concentrações moderadas, parte pode ser removida durante a purificação; O ₂ , N ₂ , H ₂ : Não são removidos durante o processo; VOC: Permite concentrações moderadas, parte pode ser removida durante o processo de purificação; NH ₃ : Necessária remoção antes da etapa de purificação.	H ₂ S: Permite apenas baixas concentrações, necessário tratamento anterior a etapa de purificação; O ₂ , N ₂ , H ₂ : O ₂ e N ₂ podem ser parcialmente separados com o CO ₂ , porém o H ₂ permanece no fluxo de gás após a purificação; VOC: Necessária uma etapa de tratamento antes da purificação; NH ₃ : Necessária uma etapa de tratamento antes da purificação.	H ₂ S: Permite baixas concentrações, parte sairá com o gás purificado; O ₂ , N ₂ , H ₂ : Parte é removida com o CO ₂ e parte sai junto com o fluxo de gás; VOC: Permite concentrações moderadas, parte pode ser removida no processo; NH ₃ : Deve ser removida antes da etapa de purificação
Pressão (bar)	5 – 9	4 – 8	10 – 20

Quadro 6 – Tecnologias de remoção de CO₂ (conclusão)

Tecnologia	<i>Water Scrubbing</i>	<i>Pressure Swing Adsorption (PSA)</i>	Membranas
Consumo de energia (kWh/Nm³ biometano)	0,20 - 0,30	0,20 - 0,30	0,20 - 0,30
Eficiência	>97% CH ₄	95 - 98% CH ₄	95 - 98% CH ₄
Perda de CH₄	1%	1 - 5%	0,50%
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiência na remoção de CO₂; - Possibilidade de remoção simultânea de H₂S e CO₂ (quando a concentração de H₂S for inferior a 300 ppm); - Fácil operação; - Tecnologia consolidada e difundida; - Capacidade de ajustes a partir do controle de pressão e temperatura; - Capacidade de regeneração; - Baixa perda de metano; - É tolerante a impurezas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiência na remoção de CO₂; - Tecnologia compacta; - Possibilidade de regeneração. 	<ul style="list-style-type: none"> - Simples operação; - Simples construção; - Alta confiabilidade; - O fluxo de tratamento do gás pode ser aumentado sem que grandes custos de investimento sejam necessários; - Podem ser obtidos CO₂ com elevada pureza.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Investimento relativamente alto; - Custo de operação alto; - Susceptível a crescimento bacteriano, podendo causar problemas no sistema; - Possibilidade de formação de espuma; - Baixa flexibilidade em relação a variação da composição do gás de entrada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto custo de investimento e operação; - É necessário um controle de processo mais rigoroso; - Perdas de metano consideráveis caso a purga não seja reinjetado no sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> - As membranas podem ter baixa seletividade de CH₄; - São necessárias várias etapas (módulos) para que se chegue em uma pureza elevada.

Fonte: ONUDI, 2020b.

2.9. BIOGÁS NO BRASIL

De acordo com o Panorama do Biogás 2023, publicado pelo Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), houve um acréscimo de 32% no número de plantas de biogás no Brasil (338 novas unidades) em relação ao ano de 2022, representando, atualmente, 1365 plantas. Esse crescimento representa 21% de aumento no volume de biogás produzido no ano de 2023 no Brasil. A Figura 11 ilustra os dados informados.

Figura 11 - Número de plantas e volume de biogás produzido no Brasil

Fonte: CIBiogás, 2024

O biogás produzido provém de diferentes setores, sendo o setor agropecuário o maior representante, com 80% das plantas, representando 20% do total do volume de produção de biogás. O setor industrial e o setor de saneamento (Resíduos Sólidos Urbanos e Esgoto), apesar de representarem apenas 19% no número de plantas, representam 80% no volume de produção de biogás. Desse total de plantas, 86% realizam o aproveitamento energético do biogás para geração de energia elétrica, seguido de 9% para produção de biometano, 3% para energia térmica e menos de 1% para energia mecânica (CIBiogás, 2024). A Figura 12 ilustra os dados informados.

Figura 12 - Volumes de produção de biogás por substrato e principais usos

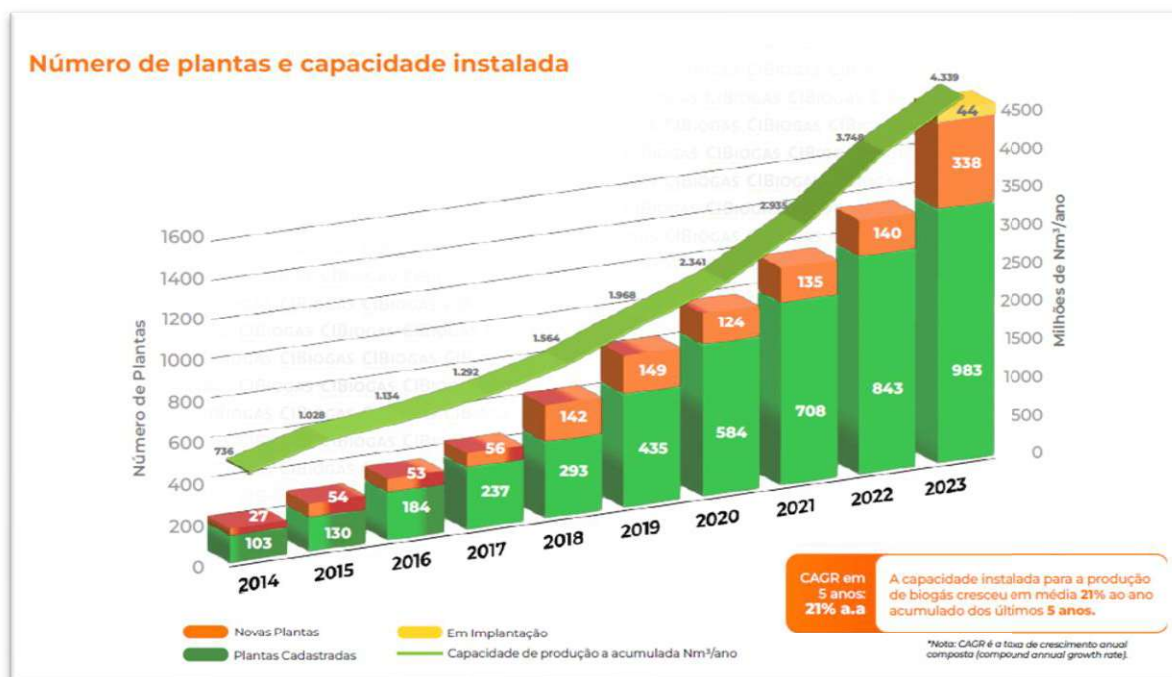


Fonte: CIBiogás, 2024

Dentre os estados brasileiros, o Paraná se destaca pelo crescimento no número de plantas, tendo ultrapassado o estado de Minas Gerais, que no Panorama do Biogás 2022 era o primeiro colocado. Assim, o Paraná obteve um crescimento de 54% no número de plantas de biogás. Já em termos de volume de produção de biogás, os estados de São Paulo e Rio de Janeiro se destacam, devido aos grandes aterros sanitários onde é realizado o aproveitamento energético do biogás (CIBiogás, 2024b).

Os dados do Panorama do Biogás 2023 mostram o perene crescimento do número de plantas de biogás no Brasil desde 2014, ano em que foi realizado o primeiro levantamento de dados do setor, representando uma taxa de crescimento anual de 21% ao ano, como pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - Crescimento no número de plantas de biogás no Brasil



Fonte: CIBiogás, 2024

Esses dados apresentam claramente como o setor de biogás tem crescido nos últimos 10 anos no Brasil, colocando em destaque a importância do investimento dessa aplicação energética para a diversificação da matriz energética nacional e, conseqüentemente, ampliando as opções de fontes de energias renováveis (CIBiogás, 2024).

2.10. OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Projetos de biocombustíveis contribuem diretamente para o alcance dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), da Organização das Nações Unidas (ONU), pois possuem um papel relevante no cenário nacional e atendem aos objetivos afirmados nas agendas de alcance de metas de descarbonização, como os assumidos pelo Brasil na COP21 e COP26. Dentro disso, o biogás pode contribuir de forma significativa, com o ODS 2 (Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável), ODS 3 (Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades), ODS 7 (Energia limpa e acessível: Garantir o acesso a fontes de energia renovável, sustentável e moderna para todos), ODS 8 (Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo, e trabalho decente para todos), ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 13 (Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos) (SOARES, 2022).

O setor agropecuário, assim como apresentado no Panorama do Biogás 2023, representa 80% das plantas de biogás no Brasil. Sendo assim, os resíduos produzidos na agricultura,

principalmente os dejetos de animais, podem ser considerados para a produção de biogás quando tratados em sistemas de biodigestão, reduzindo o potencial poluidor que possuem, contribuindo para que a agricultura brasileira se torne mais sustentável. Esse biogás pode ser considerado como fonte de energia térmica, elétrica ou até combustível veicular nas propriedades rurais, reduzindo o consumo de fontes fósseis. Além do biogás, o digestato também é um produto de interesse na agricultura e pode ser aplicado no solo como biofertilizante, diminuindo o consumo por fertilizantes químicos convencionais, reduzindo os gastos com essa aquisição e promovendo o fechamento de um ciclo ambiental e sustentável na área rural (SOARES, 2022).

Além dos resíduos da agropecuários, outras fontes de resíduos, muitas vezes fontes poluidoras, também podem ser consideradas de serem tratadas em sistemas de biodigestão para produção de biogás, onde o biogás estará atuando para reduzir impactos ambientais, melhorando a qualidade de vida e assegurando bem-estar para todos, sendo um exemplo para essa aplicação o uso de resíduos provenientes da indústria de açúcar e etanol, conhecido como vinhaça, que tem alto poder poluidor se disposta diretamente no ambiente, mas que tem grande potencial de produção de biogás e biometano caso tratado em sistemas de biodigestão (SOARES, 2022).

O crescimento em número de plantas de biogás e biometano apresentados no Panorama do Biogás 2023 exemplifica como o ODS 7 é o principal objetivo em que o biogás mais se destaca. O biometano pode ser um forte aliado para a descarbonização do setor de transporte no Brasil, assim como já vem acontecendo de forma intensa em países da Europa, como Suécia, Holanda e Dinamarca (SOARES, 2022).

O potencial teórico de produção de biogás no Brasil é de 84,6 bilhões de metros cúbicos, segundo a ABiogás. Já a capacidade instalada de produção de biogás no Brasil, segundo o levantamento do CIBiogás é de apenas 4,1 bilhões de metros cúbicos, ou seja, menos de 5%. Tendo isso em vista e sabendo da possibilidade de utilizar resíduos de diversos setores para produção de biogás e biometano, há um longo caminho e muita oportunidade para a expansão desse setor e para a promoção de geração de energia de fontes sustentáveis e rentáveis, contribuindo diretamente com o objetivo 7 (SOARES, 2022).

O consumo de energia está diretamente atrelado ao crescimento e desenvolvimento econômico, pois ao passo em que o país cresce e se desenvolve, a demanda energética aumenta. Para garantir que esse crescimento econômico seja sustentável, as fontes de energia consideradas para suprir o crescimento da demanda energética necessitam ser cada vez mais provenientes de fontes limpas e renováveis para promover o desenvolvimento socioeconômico e ambiental, trazendo, mais uma vez, o biogás como protagonista para essa solução, contribuindo com o desenvolvimento de cidades sustentáveis e reduzindo a emissão de gases causadores do efeito estufa.

2.11. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Uma das metodologias mais utilizadas para realizar análise de viabilidade econômica é o fluxo de caixa, onde são relacionados pagamentos, ou saídas (CAPEX e OPEX) e recebimentos, ou entradas (receitas ou custos evitados) (MACEDO e CORBARI, 2014). Assim, a partir dos resultados obtidos é possível tomar decisões do ponto de vista econômico e financeiro do negócio, a fim de se obter a resposta de construir ou não o empreendimento (ALVES e De MERA, 2021).

O Quadro 7 apresenta os principais indicadores econômicos e conceitos relacionados à análise do fluxo de caixa.

Quadro 7 - Principais indicadores econômicos

Indicador	Descrição	Fórmula
Valor Presente Líquido (VPL)	É uma metodologia que consiste em avaliar o valor presente definido dos fluxos de caixa, ou seja, é o somatório dos valores presentes das entradas descontando o somatório das saídas. Em caso de VPL com valores positivos, a alternativa analisada é considerada viável economicamente, caso contrário, se torna inviável (PUCCINI, 2016).	$VPL = - I.I + \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{1+K^t}$ <p>Onde, I.I = Investimento Inicial (CAPEX); K = custo do capital ou taxa mínima de atratividade; n = tempo de desconto do último fluxo de caixa; t = tempo de desconto de cada entrada de caixa; FCt = fluxo de caixa no t-ésimo período.</p>
Taxa Interna de Retorno (TIR)	É o valor que vai tornar o VPL = 0 em um determinado momento, ou seja, é a taxa que iguala os valores presentes das entradas e das saídas de caixa (PUCCINI, 2016).	$VPL = - I.I + \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{1+i^t} = 0$ <p>Onde, I.I = Investimento Inicial (CAPEX); i = taxa de juros; n = tempo de desconto do último fluxo de caixa; t = tempo de desconto de cada entrada de caixa; FCt = fluxo de caixa no t-ésimo período.</p>
Payback	É o tempo que o investimento leva para que o investimento inicial seja pago (TONIELO et al., 2022).	$Payback = \frac{Investimento\ inicial}{Fluxo\ de\ caixa}$

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Verificar, por meio de uma análise técnica e econômica, a viabilidade de implantação de uma planta de biogás centralizada em Foz do Iguaçu, para produção de biogás com o tratamento de resíduos orgânicos provenientes de hotéis, CEASA e de fontes de apreensões pelo MAPA para aproveitamento energético.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar o referencial teórico acerca da geração de resíduos, demanda energética, produção, tratamento e aplicação energética do biogás;
- Levantar a quantidade de resíduos orgânicos produzidos pelo setor hoteleiro, CEASA e apreensões do MAPA no período de 2022 e 2023;
- Estimar o potencial de produção de biogás com os resíduos orgânicos do setor hoteleiro, CEASA e apreensões do MAPA;
- Estimar o potencial de aplicação energética do biogás para geração de energia elétrica, térmica e biometano;
- Analisar a viabilidade econômica para aplicação energética do biogás para gerar energia elétrica e biometano.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

4.1.1. Resíduos do setor hoteleiro

A composição gravimétrica dos resíduos orgânicos utilizadas nesse estudo foi feita a partir dos estudos de Peruchin (2015), Elias e Tresmondi (2019) e Quaresma (2020), conforme descrito no item 2.2.1 e resumido na Tabela 4.

Tabela 4 - Resumo dos resultados de estudos da geração de resíduos no setor hoteleiro

Estudo	Total de resíduos (kgleito ⁻¹ dia ⁻¹)	% de resíduos orgânicos (%)	Total de resíduos orgânicos (kgleito ⁻¹ dia ⁻¹)
Peruchin	0,379	49,23%	0,185
Elias e Tresmondi	0,533	53,25%	0,284
Quaresma	1,343	76,12%	1,023
Média			0,497

Fonte: PERUCHIN, 2105; ELIAS E TRESMONDI, 2019; QUARESMA, 2020.

Segundo dados do Município de Foz do Iguaçu (2024b), existem 28.980 leitos de hotel na cidade onde, em 2023, a taxa média de ocupação foi de 76% (FOZ DO IGUAÇU, 2024b). A Tabela 5 apresenta os dados de número de leitos e ocupação para os anos de 2022 e 2023 para o setor hoteleiro da cidade.

Tabela 5 - Número de leitos e taxa de ocupação em 2022 e 2023 da cidade de Foz do Iguaçu

Ano	Número de leitos	Taxa média de ocupação
2022	28.254	65%
2023	28.980	76%

Fonte: FOZ DO IGUAÇU, 2024b.

4.1.2. Resíduos da Central de Abastecimento

Como forma de quantificar os resíduos gerados na CEASA de Foz do Iguaçu, foram utilizados como referências os dados da Vital Engenharia Ambiental, empresa responsável pela coleta dos resíduos urbanos da cidade, para os anos de 2022 e 2023.

4.1.3. Resíduos de Apreensões do MAPA

Os resíduos orgânicos apreendidos pelo MAPA são divididos entre os de origem animal (queijo, linguiça, carnes, salame) e entre produtos de origem vegetal (frutas, verduras e legumes). Os dados de apreensões foram obtidos a partir de solicitação *online* pelo sistema Fala.BR (Plataforma Integrada de Ouvidoria e Acesso à Informação) do Governo Federal, onde foram disponibilizados dados para os anos de 2022 e 2023 e apresentadas as quantidades, a origem (animal ou vegetal), além de dados da destinação dos resíduos.

4.2. POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DOS RESÍDUOS DOS HOTÉIS, CEASA E MAPA

4.2.1. Quantitativo dos Resíduos dos Hotéis

Segundo Smaniotto e Becker (2024), os resíduos provenientes dos hotéis são aqueles provenientes das atividades das cozinhas e restaurantes, tanto relacionados ao preparo dos alimentos, quanto ao desperdício causado pelos hóspedes e usuários durante as refeições. Assim, para estimar o potencial de produção de biogás desses resíduos gerados por grandes setores do município de Foz do Iguaçu, foram considerados, para o caso dos resíduos produzidos pelos hotéis, os dados do número de leitos e da taxa de ocupação fornecidos pelo Sindicato dos Hotéis, Restaurantes, Bares e Similares (Sindhotéis) para os anos de 2022 e 2023, conforme já apresentado na Tabela 5. Para

alcançar um fator de geração de resíduos por número de leitos, foram levados em consideração os estudos de Elias e Tresmondi (2019), Peruchin (2015) e Quaresma (2020) onde a médias dos resultados desses estudos resultou em 0,497 kg de resíduo orgânico produzido diariamente por leito do de hotel, sendo essa média considerada para a obtenção do quantitativo de resíduos orgânicos gerados no setor hoteleiro de Foz do Iguaçu, segundo a equação (1) e segundo Smaniotto e Becker (2024), onde foi mencionado que os resíduos provenientes dos hotéis são aqueles provenientes das atividades das cozinhas e restaurantes, tanto relacionados ao preparo dos alimentos, quanto ao desperdício causado pelos hóspedes e usuários durante as refeições (SMANIOTTO; BECKER, 2024).

$$\text{RSO hotéis} = (\text{N}^\circ \text{ de leitos}) \times (\text{Taxa média de ocupação anual}) \times (\text{Geração de resíduo por leito})$$

(equação 1)

Onde,

RSO hotéis = Resíduos sólidos orgânicos de hotéis

A estimativa total de produção de biogás foi realizada segundo a equação 2.

$$\text{Produção de biogás} = (\text{RSO hotéis} \times \text{FC Sydney restaurante}) + (\text{RSO MAPA animal} \times \text{FC Sydney carne}) + ((\text{RSO CEASA} + \text{RSO MAPA vegetal}) \times \text{FC Edwiges})$$

(equação 2)

Onde,

RSO hotéis = Resíduos sólidos orgânicos de hotéis

RSO = Resíduos sólidos orgânicos de hotéis

FC Sydney restaurante – Fator de conversão de Sydney para resíduos de restaurantes

RSO MAPA animal = Resíduos sólidos orgânicos do MAPA de origem animal

FC Sydney carne – Fator de conversão de Sydney para carnes

RSO CEASA = Resíduos sólidos orgânicos do CEASA

RSO MAPA vegetal = Resíduos sólidos orgânicos do MAPA de origem vegetal

FC Edwiges = Fator de conversão de Edwiges

4.3. POTENCIAL DE APLICAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS

No estudo do potencial de aplicação energética do biogás considerou-se sua utilização para gerar energia elétrica, energia térmica e produção de biometano.

4.3.1. Energia Térmica

Para fins de cálculos estimativos do potencial de geração de energia térmica pelo biogás, foi considerada a demanda energética disponível pelo biogás e a sua substituição pelo gás liquefeito de petróleo (GLP), comparando os poderes caloríficos inferiores (PCI) de ambos os gases, de acordo com as equações 3 e 4.

$$\text{Demanda energética disponível} = (\text{Volume do biogás} \times \text{PCI do biogás}) \quad (\text{equação 3})$$

Onde,

$$\text{Demanda energética disponível} = \text{kcal/mês}$$

$$\text{Volume do biogás} = \text{m}^3/\text{mês}$$

$$\text{PCI do biogás} = \text{kcal/m}^3$$

$$\text{Equivalência energética GLP} = \text{Demanda energética disponível} / \text{PCI GLP} \quad (\text{equação 4})$$

Onde,

$$\text{Equivalência energética GLP} = \text{kg/mês}$$

$$\text{Demanda energética disponível} = \text{kcal/mês}$$

$$\text{PCI GLP} = \text{kcal/kg}$$

4.3.2. Energia Elétrica

Para fins de cálculos estimativos do potencial de geração de energia elétrica pelo biogás, foi considerada a eficiência elétrica média de 37% (ONUDI, 2020a) e o fator de conversão médio (FC) de geração de energia elétrica por m^3 de biogás de $6,05 \text{ kWh/m}^3$, apresentado pelo CIBiogás, com base em diferentes autores (CIBiogás, 2018c), segundo equação 5.

$$\text{Energia elétrica} = \text{Volume de biogás} \times 6,05 \text{ kWh/m}^3 \times 37\% \quad (\text{equação 5})$$

Onde,

$$\text{Energia elétrica} = \text{kWh/mês}$$

$$\text{Volume de biogás} = \text{m}^3/\text{mês}$$

$$\text{FC elétrica} = \text{kWh/m}^3$$

4.3.3. Biometano

Para fins de cálculos estimativos do potencial de produção de biometano, foi considerada média de qualidade do biogás, conforme Tabela 2, e a eficiência de sistema de refino, conforme Quadro 6, segundo equação 6.

Biometano = Volume de biogás x teor de metano do biogás x eficiência de refino (equação 6)

Onde,

Biometano = m³/mês

Volume de biogás = m³/mês

Teor de metano do biogás = % CH₄

Eficiência de refino = %

4.4. PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO

Para dimensionar o sistema de biodigestão proposto para esse estudo, foram consideradas as seguintes informações:

- Vazão de substratos (quantidade de resíduos);
- TRH de 30 dias (Quadro 2);
- Teor de ST e diluição, conforme tópico 2.7.5;
- Tabela 1 para a seleção do tipo de biodigestor;
- Cálculo do volume do biodigestor (Quadro 2).

Para estimar a quantidade de água necessária para diluir os resíduos de 22% de ST para aproximadamente 12% de ST, foi considerada uma média ponderada entre a quantidade de resíduo e seu teor de sólidos em relação ao teor de sólidos aproximado de 1% para a água, segundo a

equação 7.

$$(V_{\text{RSO}} \times ST_{\text{RSO}}) + (V_{\text{A}} \times ST_{\text{A}}) = (V_{\text{RSO}} + V_{\text{A}}) \times 12\% \text{ (equação 7)}$$

Onde,

V_{RSO} = Volume de RSO (t/dia equivalente a m³/dia)

ST_{RSO} = Sólidos Totais do RSO = 22 %

V_{A} = Volume de água (t/dia equivalente a m³/dia)

ST_{A} = Sólidos Totais da água = 1 %

12% = Teor de ST almejado para a mistura

Assim, a equação 8 foi utilizada para calcular o volume do sistema de biodigestão.

$$V_{\text{B}} = \text{TRH} \times Q \text{ (equação 8)}$$

Onde,

V_{B} = Volume do sistema de biodigestão (m³)

TRH = dias

Q = vazão de substratos (m³/dia ou t/dia)

4.5. VIABILIDADE ECONÔMICA

4.5.1. Indicadores Econômicos

Para analisar os indicadores econômicos, foram delimitados 2 cenários, sendo um dos cenários referente a geração de energia elétrica e o outro para produção de biometano.

A definição por esses dois cenários levou em consideração os dados apresentados na Figura 12, onde é possível observar que, atualmente, 57% do volume de biogás produzido no Brasil é destinado para gerar energia elétrica, 37% para produção de biometano e somente 4% para energia térmica e o restante (<2%) para energia mecânica (CIBiogás, 2024). Os cenários serão descritos a seguir.

4.5.2. Cenários de Análise

4.5.2.1. *Cenário 1 – Geração de Energia Elétrica*

O cenário 1 considera a utilização da totalidade do biogás para geração de energia elétrica em grupo motogeradores movidos a biogás. Para tanto, serão consideradas as etapas necessárias de tratamento e purificação especificadas no Quadro 5.

Para fins de análise econômica, será considerada a comercialização da energia

gerada para cooperativas, como forma de obtenção de receitas.

4.5.2.2. Cenário 2 – Produção de Biometano

O cenário 2 considera a utilização da totalidade do biogás para produção de biometano. Para tanto, serão consideradas as etapas necessárias de tratamento e purificação especificadas no Quadro 5.

Para fins de análise econômica, será considerado o uso de biometano em substituição ao diesel atualmente utilizado para abastecer os caminhões que realizam a coleta de lixo do município, como forma de obtenção de custos evitados.

4.5.3. Premissas

Para realizar a análise de viabilidade econômica, foram consideradas premissas do ponto de vista econômico. O Quadro 8 apresenta as premissas adotadas.

Quadro 8 - Premissas econômicas (continua)

Premissa	Valor	Observações
Horizonte de análise	20 anos	Tempo máximo para retorno do investimento (payback)
Taxa de juros	11,4% a.a	Considerando a taxa de juros aplicada pelo BNDES para projetos de energias renováveis (BNDES, 2024).
TMA	11,25 % a.a	Definida com base na taxa de juros praticada pelo mercado, como a Taxa SELIC (ANDRICH et al., 2014).
% de Financiamento	100%	Considerando que o valor total do projeto será financiado pelo BNDES e considerando que o valor será pago em um período de 10 anos.
Inflação	4,76%	considerados os valores acumulados no período de setembro de 2023 até outubro de 2024 (IBGE, 2024b)
REIDI	9,25%	suspensão da incidência das contribuições para PIS (1,65%) e COFINS (7,6%) sobre as receitas decorrentes das aquisições de equipamentos (MDR, 2021b)

Quadro 8 - Premissas econômicas (conclusão)

Premissa	Valor	Observações
Depreciação	10 a 30 anos	Considerando que os equipamentos precisarão ser totalmente substituídos em períodos variáveis de 10 a 30 anos, a depender da vida útil de cada. $\text{Depreciação} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{Vida Útil}}$ (ROA et al., 2024)
Taxa de Desconto	11,25% a.a	Taxa de Desconto = TMA (ANDRICH et al., 2014)
Impostos e Tributos	ISS = 2% a 5% (Foz do Iguaçu) CSLL = 9% IRPJ = 15% sobre o lucro líquido ajustado, com adição de 10% sobre a parcela do lucro que exceder R\$ 20.000 reais por mês. CSLL = 9% sobre o lucro líquido ajustado	Para o cenário de geração de energia elétrica há isenção do ICMS (BRASIL, 2021a). Foram considerados os tributos para Lucro Real (ARAÚJO et al., 2021).

Fonte: ANDRICH et al., 2014; BNDES, 2024; IBGE, 2024b; MDR, 2021b.

4.5.4. Levantamento de custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX)

Para possibilitar a análise econômica, foi necessário realizar o levantamento dos custos de implantação (CAPEX), custos de operação (OPEX), além dos custos com possíveis receitas advindas do projeto ou custos evitados.

Para o levantamento de CAPEX e OPEX foram consultados fornecedores do mercado que atuam nas áreas de sistemas de biodigestão, tratamento e purificação de biogás e geração de energia elétrica. Já para o levantamento dos custos evitados ou receitas, foi consultada a Vital Engenharia Ambiental e consultado preço da energia elétrica no mercado livre de energia.

4.5.5. Levantamento de Receitas e Custos Evitados

Para o cenário 1 foi considerado que haverá receita com a comercialização da energia elétrica gerada, tendo sido utilizado como base o preço médio da energia elétrica comercializada no mercado livre (CCEE, 2021).

$$RC1 = PME \times EG \quad (\text{equação 9})$$

Onde,

RC1 = Receita Cenário 1 (R\$/ano)

PME = Preço médio da energia = R\$ 351,00/MWh

EG = Energia gerada (MWh/ano)

Para o cenário 2 foi considerado que haverá custo evitado com a substituição do diesel pelo biometano para os caminhões da Vital Engenharia Ambiental que realizam a coleta do lixo do município de Foz do Iguaçu. Os valores de consumo de diesel foram consultados diretamente com a Vital Engenharia Ambiental.

$$CEC2 = V_{\text{diesel}} \times P_{\text{diesel}} \text{ (equação 10)}$$

Onde,

CEC2 = Custo Evitado Cenário 2 (R\$/ano)

V_{diesel} = Volume de diesel consumido (l/ano) = 409.344 l/ano

P_{diesel} = Preço do diesel = 6,20 R\$/l

Todos os dados levantados no tópico 4.5 serão utilizados como base para a análise econômica apresentada no tópico 5.6.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. QUANTITATIVO DE RESÍDUOS

Como foi possível observar pelos dados apresentados na Revisão Bibliográfica, existem diversos setores municipais responsáveis pela geração de resíduos orgânicos em uma cidade e, na grande maioria dos casos, esses resíduos são encaminhados aos aterros sanitários e, conseqüentemente, todo o potencial energético é desperdiçado. Como forma de realizar o aproveitamento energético de RSO gerado em uma cidade, uma opção é o seu tratamento via digestão anaeróbia em sistemas de biodigestão para produção de biogás.

5.1.1. Quantitativo de Resíduos do CEASA

Assim como qualquer outra atividade comercial, as Centrais de Abastecimento geram resíduos. No caso das CEASAS, os resíduos gerados são orgânicos, tendo em vista o tipo de comércio. Assim, são resíduos passíveis de aproveitamento energético para produção de biogás.

O quantitativo de resíduos provenientes da CEASA nos anos de 2022 e 2023 são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Resíduos CEASA 2022

Mês	Quantidade de resíduos (t/mês)
janeiro	62,85
fevereiro	67,62
março	56,15
abril	61,2
maio	35,31
junho	38,23
julho	49,1
agosto	28,23
setembro	22,56
outubro	35,78
novembro	45,51
dezembro.22	76,01
TOTAL (t/ano)	578,55
MÉDIA (t/mês)	48,21

Fonte: Vital Engenharia Ambiental, 2024b

Tabela 7 - Resíduos CEASA 2023

Mês	Quantidade de resíduos (t/mês)
janeiro	80,23
fevereiro	90,42
março	166,09
abril	87,21
maio	81,56
junho	58,34
julho	54,04
agosto	51,5
setembro	50,54
outubro	37,27
novembro	61,46
dezembro	107,50
TOTAL (t/ano)	926,16
MÉDIA (t/mês)	77,18

Fonte: Vital Engenharia Ambiental, 2024b

A produção de resíduos da CEASA se apresentou de forma crescente, de 558,55 toneladas em 2022 para 926,16 toneladas em 2023, podendo ser diferentes fatores como o próprio aumento populacional e o aumento no consumo, mencionados nesse estudo, ou mesmo o aumento de desperdício na própria CEASA.

5.1.2. Quantitativo de Resíduos do MAPA

Os dados dos resíduos de apreensões realizadas pelo MAPA são divididos entre os de origem animal (majoritariamente carnes) e os de origem vegetal (frutas, verduras e legumes). No ano de 2022, a totalidade dos resíduos apreendidos foram encaminhados ao aterro sanitário da cidade. Já no ano de 2023, parte foi encaminhada para o aterro sanitário e outra parte encaminhada para a planta de biogás do CIBiogás (UD ITAIPU) (MAPA, 2024). No ano de 2022 foram apreendidos 2.485 kg/mês em produtos, e no ano de 2023 foram 6.060 kg/mês, separados em animal e vegetal, assim como separados em relação ao destino, sendo as opções o aterro sanitário do município ou o CIBiogás (MAPA, 2024; SMANIOTTO; BECKER, 2024), onde, nesse caso, os resíduos são utilizados para produção de biogás na Unidade de Demonstração de produção de biogás localizada na área da Usina Hidrelétrica de Itaipu (SYDNEY, 2021). O Quadro 9 apresenta os dados de resíduos apreendidos pelo MAPA nos anos de 2022 e 2023, separados em resíduos de origem animal e vegetal.

Quadro 9 - Resíduos apreendidos pelo MAPA em 2022 e 2023

2022		2023			
Animal	Vegetal	Animal	Vegetal		
5.442 kg	24.373 kg	16.582 kg	56.134 kg		
Destino		Destino			
Aterro Sanitário Municipal	Aterro Sanitário Municipal	Aterro Sanitário Municipal	CIBiogás	Aterro Sanitário Municipal	CIBiogás
5.442 kg	24.373 kg	11.197 kg	5.385 kg	23.723 kg	32.591 kg

Fonte: MAPA, 2024

É possível observar que existe um crescimento no volume de resíduos apreendidos pelo MAPA, o que representa uma fonte de recebimento de resíduos constante para uma planta de produção de biogás. Em 2022, o destino dessas apreensões foi, exclusivamente, o aterro sanitário do município, causando ocupação das células destinada ao recebimento e armazenamento de resíduos. A partir de 2023, parte desse resíduo passou a ser encaminhado à planta do CIBiogás (UD ITAIPU), mostrando que são resíduos possíveis de serem considerados para alimentar um sistema de biodigestão e produzir biogás.

5.1.3. Quantitativo de Resíduos do Setor Hoteleiro

O quantitativo de resíduos gerados pelo setor hoteleiro, nos anos de 2022 e 2023 foram os seguintes, segundo equação 1:

$$\text{RSO hotéis}_{2022} = (28.254 \text{ leitos}) \times (65\%) \times (0,497 \text{ kg RSO/dia.leito})$$

$$\text{RSO hotéis}_{2022} = 9.127 \text{ kg RSO/dia}$$

$$\text{RSO hotéis}_{2022} = 273,82 \text{ t RSO/mês}$$

$$\text{RSO hotéis}_{2023} = (28.980 \text{ leitos}) \times (76\%) \times (0,497 \text{ kg RSO/dialeito})$$

$$\text{RSO hotéis}_{2023} = 10.946 \text{ kg RSO/dia}$$

$$\text{RSO hotéis}_{2023} = 328,39 \text{ t RSO/mês}$$

Observa-se um aumento significativo na produção de resíduos nos hotéis do ano de 2022 para o de 2023. Esse aumento pode ser atribuído a diferentes fatores relacionados às políticas de incentivo ao turismo e investimentos públicos e privados nesse segmento. Mesmo sendo

considerados apenas dois anos para esse estudo os investimentos e as políticas adotadas no município apontam que essas quantidades devem ser ampliadas. Esses valores crescentes indicam que os substratos são excelentes matérias primas para a produção do biogás, pois indicam que os biodigestores estarão sempre em operação.

A Tabela 8 resume o quantitativo de resíduos orgânicos proveniente de cada um dos 3 principais grandes geradores da cidade nos anos de 2022 e 2023.

Tabela 8 - Quantitativo de resíduos orgânicos dos grandes geradores de Foz do Iguaçu em 2022 e 2023

Setor	Quantidade (t/mês) - 2022	Quantidade (t/mês) - 2023
Hotéis	273,82	328,39
CEASA	48,21	77,18
MAPA origem vegetal	2,03	4,68
MAPA origem animal	0,45	1,38
TOTAL (t/mês)	324,51	411,63
MÉDIA (t/mês)	368,07	
Média (t/dia)	16	

Fonte: Foz do Iguaçu, 2024; Elias; Tresmondi, 2019; Vital Engenharia Ambiental, 2024b; Fala BR, 2024.

Conforme apresentado nesse estudo, existem grandes geradores de resíduos orgânicos na cidade de Foz do Iguaçu, sendo eles o setor hoteleiro, a CEASA e os resíduos apreendidos pelo MAPA. Os resíduos do setor hoteleiro são encaminhados para o aterro sanitário municipal, já os resíduos da CEASA são utilizados para compostagem e os resíduos do MAPA são encaminhados para o aterro ou para o CIBiogás.

O crescimento populacional somado a um estilo de vida cada vez mais consumista são fatores que influenciam diretamente no aumento da geração de resíduos, incluindo dos três setores avaliados nesse estudo, onde a gestão adequada desses resíduos é um fator crucial para minimizar possíveis impactos negativos ao meio ambiente e à saúde pública (BATISTA et al., 2021; FERRÃO e MOARES, 2021). A união desses resíduos pode contribuir para a viabilização de uma planta de produção de biogás centralizada, pois são resíduos de fontes contínuas e diversas, o que contribui para o bom funcionamento de um sistema de biodigestão. Assim, com a produção de biogás, é possível considerar o aproveitamento térmico, a geração de energia elétrica ou, ainda, a produção de

biometano.

5.2. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO E POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Para calcular a quantidade de água necessária para diluir os resíduos e atingir 12% de ST, dimensionar, considerando a equação 7, temos os seguintes resultados:

$$\begin{aligned}(V_{\text{RSO}} \times \text{ST}_{\text{RSO}}) + (V_{\text{A}} \times \text{ST}_{\text{A}}) &= (V_{\text{RSO}} + V_{\text{A}}) \times 12\% \\ (16 \text{ m}^3/\text{dia} \times 22\%) + (V_{\text{A}} \times 1\%) &= (16 \text{ m}^3/\text{dia} + V_{\text{A}}) \times 12\% \\ V_{\text{A}} &= 14,5 \text{ m}^3/\text{dia}\end{aligned}$$

Assim, para calcular o volume do sistema de biodigestão para tratar os resíduos levantados nesse estudo, considerando a adição de água para diluição e considerando a equação 8, temos os seguintes resultados:

$$\begin{aligned}V_{\text{B}} &= \text{TRH} \times Q \\ V_{\text{B}} &= 30 \text{ dias} \times (16 \text{ t/dia de resíduos} + 14,5 \text{ t/dia de água}) \\ V_{\text{B}} &= 30 \text{ dias} \times 30,5 \text{ m}^3/\text{dia de substratos} \\ V_{\text{B}} &= 915 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Ou seja, é necessário um ou mais biodigestores do tipo CSTR com o volume útil total de 915 m³ para tratar todo o resíduo levantado nesse estudo, sendo importante considerar um volume maior para volume construtivo, podendo ser considerado o volume total de aproximadamente 1.000 m³.

Com base nos dados das Tabelas 3 e 8, os potenciais de produção de biogás para cada setor são apresentados na sequência, com base na equação 2.

$$\begin{aligned}\text{Biogás Hotéis}_{2022} &= (\text{RSO hotéis}_{2022} \times \text{FC Sydney RSO restaurante}) \\ \text{Biogás Hotéis}_{2022} &= (273,82 \text{ t/mês} \times 144 \text{ m}^3 \text{ biogás/ t RSO hotéis}) \\ \text{Biogás Hotéis}_{2022} &= 39.430 \text{ m}^3/\text{mês}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Biogás Hotéis}_{2023} &= (\text{RSO hotéis}_{2023} \times \text{FC Sydney RSO restaurante}) \\ \text{Biogás Hotéis}_{2023} &= (328,39 \text{ t/mês} \times 144 \text{ m}^3 \text{ biogás/ t RSO hotéis}) \\ \text{Biogás Hotéis}_{2023} &= 47.288 \text{ m}^3/\text{mês}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Biogás MAPA}_{2022} &= (\text{RSO MAPA animal} \times \text{FC Sydney carne}) + (\text{RSO MAPA vegetal} \times \text{FC} \\ &\quad \text{Edwiges})\end{aligned}$$

$$\text{Biogás MAPA}_{2022} = (0,45 \text{ t/mês} \times 244 \text{ m}^3 \text{ biogás/t RSO Sydney carne}) + (2,03 \text{ t/mês} \times 33 \text{ m}^3$$

biogás/t RSO CEASA vegetal)

Biogás MAPA₂₀₂₂ = 177 m³/mês

Biogás MAPA₂₀₂₃ = (RSO MAPA animal x FC Sydney carne) + (RSO MAPA vegetal x FC Edwiges)

Biogás MAPA₂₀₂₃ = (1,38 t/mês x 244 m³ biogás/t RSO Sydney carne) + (4,68 t/mês × 33 m³ biogás/t FC Edwiges)

Biogás MAPA₂₀₂₃ = 491 m³/mês

Biogás CEASA₂₀₂₂ = (48,21 t/mês) × (33 m³ biogás/t FC Edwiges)

Biogás CEASA₂₀₂₂ = 1.591 m³/mês

Biogás CEASA₂₀₂₃ = (77,18 t/mês) × (33 m³ biogás/t FC Edwiges)

Biogás CEASA₂₀₂₃ = 2.547 m³/mês

Assim, a Tabela 9 resume os volumes de biogás estimados para cada setor, bem como o total do volume produzido e suas médias.

Tabela 9 - Estimativas de produção de biogás por setor

Setor	Biogás (m³/mês) - 2022	Biogás (m³/mês) - 2023
Hotéis	39.430	47.288
CEASA	1.591	2.547
MAPA	177	491
TOTAL (m ³ /mês)	41.198	50.332
MÉDIA (m³/mês)	45.765	
Média com fator tecnológico de 80% para biodigestores CSTR (m³/mês)	36.612	

Fonte: A autora, 2024.

Considerando a média de produção de biogás (36.612 m³/mês) e a média de geração de resíduos (368 t/mês), obtém-se um fator médio de geração de 99 m³ de biogás por tonelada de resíduo para esse estudo, valor muito próximo do valor apresentado por McKendry (2019) de 100 a 125 m³ de biogás por tonelada de resíduos de alimentos. Analogamente, Rocha et al. (2023) chegou em um valor de 187,5 m³/t em um estudo realizado em um restaurante. Estudos mais antigos, como o de Cho e Park (1995) também chegaram a resultados semelhantes, com 104 m³ de biogás por

tonelada de resíduos alimentares. Portanto, os resultados calculados nesse estudo estão coerentes com valores encontrados em outros estudos com resíduos de mesmas características.

5.3. POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

Por fim, considerando a média do potencial de produção de biogás da Tabela 10 e as equações 3 a 6, os potenciais de substituição de biogás são apresentados na sequência e sumarizados no Quadro 9.

$$\text{Demanda energética disponível} = (\text{Volume de biogás} \times \text{PCI biogás})$$

$$\text{Demanda energética disponível} = (36.612 \text{ m}^3/\text{mês} \times 5.100 \text{ kcal/m}^3)$$

$$\text{Demanda energética disponível} = 186.721.200 \text{ kcal/mês}$$

$$\text{Equivalência energética GLP} = (\text{Demanda energética disponível} / \text{PCI GLP})$$

$$\text{Equivalência energética GLP} = 186.721.200 \text{ kcal/mês} / 11.100 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{Equivalência energética GLP} = 16.822 \text{ kg/mês}$$

$$\text{Energia elétrica} = \text{Volume de biogás} \times \text{FC elétrica}$$

$$\text{Energia elétrica} = 36.612 \text{ m}^3/\text{mês} \times 2,25 \text{ kWh/m}^3$$

$$\text{Energia elétrica} = 82.377 \text{ kWh/mês}$$

$$\text{Biometano} = \text{Volume de biogás} \times \text{teor de metano do biogás} \times \text{eficiência de refino}$$

$$\text{Biometano} = 36.612 \text{ m}^3/\text{mês} \times 60\% \text{ CH}_4 \times 95\%$$

$$\text{Biometano} = 20.869 \text{ m}^3/\text{mês}$$

Quadro 10 - Potencial de substituição energética do biogás

Aplicação energética	Potencial energético	Equivalência energética
Térmica	186.721.200 kcal/mês	16.822 kg de GLP (1.294 botijões de 13 kg por mês)
Elétrica	82.377 kWh/mês	abatimento mensal da energia elétrica consumida em 330 residências (consumo médio de 250 kWh/mês)
Biometano	20.869 m ³ /mês	313.035 km/mês (carros leves)
		20.243 l/mês de diesel

Fonte: Copergás, 2024; CIBiogás, 20018c; MME, 2017; ONUDI, 2020b.

É possível produzir, por digestão anaeróbia, 36.612 m³/mês de biogás que pode ser utilizado para diferentes fins energéticos, podendo ser aproveitado seu potencial para aproveitamento

térmico; para gerar energia elétrica ou para produzir biometano, que pode ser utilizado como combustível veicular.

Dados de 2019 da Europa, apresentados por Casasso et al. (2021), mostram que o atual maior uso do biogás é para gerar energia elétrica e térmica (cogeração), porém, plantas de biometano estão em rápido crescimento (+15%), análogo ao que vem ocorrendo no Brasil, conforme dados do Panorama do Biogás de 2023, corroborando com o mencionado no tópico 4.5.1.

Hakavati et al (2017), realizaram um estudo para avaliar qual a rota energética mais eficiente para a utilização do biogás, onde um dos resultados foi que o uso direto, ou seja, para aproveitado térmico ou gerar energia elétrica com biogás bruto, são mais eficientes, porém, essas aplicações podem ser muito restritas devido às limitações de aplicação no local ou até a inexistência de demanda por energia térmica, por exemplo.

Como observado, existem muitas possibilidades de aplicação energética do biogás, demonstrando a importância de estudos que abordem a viabilidade técnica e também econômica dessas diferentes aplicações, auxiliando na tomada de decisão para investimentos em melhorias na gestão de resíduos municipais.

5.4. CAPEX E OPEX

Os Quadros 11 a 14 apresentam os valores de CAPEX e OPEX para o cenário 1 e 2, respectivamente.

Quadro 11 - CAPEX Cenário 1 – Geração de Energia Elétrica

Parâmetro	Componentes	Custo	Referências
CAPEX Sistema de biodigestão	Tanque de mistura, 2 biodigestores CSTR, infraestrutura civil, aquecedor, container, compressores para biogás, <i>flare</i> , terraplenagem e pavimentações.	R\$ 5.105.282,00	CH4 Solutions
CAPEX Aproveitamento energético	1 Grupo Motogerador de 250 kW e Sistema de tratamento (remoção de umidade e do H ₂ S do biogás)	R\$ 900.000,00	3DI Engenharia
CAPEX TOTAL	R\$ 6.005.282,00		

Fonte: Savoldi, 2024; Candal, 2024.

Quadro 12 - OPEX Cenário 1 – Geração de Energia Elétrica

Parâmetro	Componentes	Custo	Referências
OPEX Sistema de biodigestão	Custos de manutenção da planta de biogás e consumo energético (energia elétrica)	R\$ 127.275,00 por ano	CH4 Solutions
OPEX Aproveitamento energético	Custos de manutenção do grupo motogerador	R\$ 56.423,00 por ano	EPE, 2021b
OPEX de operação (Recursos Humanos)	Custos de recursos humanos para 2 funcionários para operação e 2 funcionários para manutenção da planta	R\$ 302.400,00 por ano	CH4 Solutions
OPEX TOTAL	R\$ 486.098,00 por ano		

Fonte: Savoldi, 2024; Candal, 2024; EPE, 2021b.

Quadro 13 - CAPEX Cenário 2 – Produção de Biometano

Parâmetro	Componentes	Custo	Referências
CAPEX Sistema de biodigestão	Tanque de mistura, biodigestores CSTR, infraestrutura civil, aquecedor, container, compressores, flare, terraplenagem e pavimentações.	R\$ 5.105.282,00	CH4 Solutions
CAPEX Aproveitamento energético	Biorrefinaria (Membranas), compressores de alta pressão, resfriamento, armazenamento, abastecimento, container, instalação, comissionamento e operação assistida	R\$ 3.440.000,00	3DI Engenharia
CAPEX TOTAL	R\$ 8.545.282,00		

Fonte: Savoldi, 2024; Candal, 2024.

Quadro 14 - OPEX Cenário 2 – Produção de Biometano

Parâmetro	Componentes	Custo	Referências
OPEX Sistema de biodigestão	Custos de manutenção da planta de biogás e consumo energético (energia elétrica)	R\$ 127.275,00 por ano	CH4 Solutions
OPEX Aproveitamento energético	Filtros, óleos, carvão ativado, reposição de componentes e consumo energético (energia elétrica)	R\$ 155.376,00 por ano	3DI Engenharia
OPEX de operação (Recursos Humanos)	Custos de recursos humanos para 2 funcionários para operação e 2 funcionários para manutenção da planta	R\$ 302.400,00 por ano	CH4 Solutions
OPEX TOTAL	R\$ 585.051,00 por ano		

Fonte: Savoldi, 2024; Candal, 2024.

Comparativamente, o estudo de Martín-Hernández (2020), para uma planta de biogás que utiliza resíduos de alimentos para produzir biogás com o objetivo de produzir biometano, apresentou valores obtidos por meio de simulações matemáticas, que resultaram em um valor de CAPEX de aproximadamente R\$ 8.000.000,00 e um valor de OPEX de aproximadamente R\$ 640.000,00 por ano (valores proporcionais comparado com as quantidades de resíduos do presente estudo com o estudo de Martín-Hernández).

Para o cenário de geração de energia elétrica, os custos de CAPEX e OPEX para o aproveitamento energético (grupo motogerador a biogás) ficou próximo dos valores estimados por ONUDI (2021e), de R\$ 700.000,00 e R\$ 120.000,00 por ano, respectivamente.

5.5. RECEITAS E CUSTOS EVITADOS

5.5.1. Receita Cenário 1

$$RC1 = PME \times EG \text{ (equação 11)}$$

$$RC1 = R\$ 351,00/\text{MWh} * 988,52 \text{ MWh/ano}$$

$$RC1 = R\$ 346.970,00/\text{ano}$$

5.5.2. Custo Evitado Cenário 2

Os valores de consumo de diesel foram consultados diretamente com a Vital Engenharia Ambiental (Vital Engenharia Ambiental, 2024a). Já os valores de referência para o preço do diesel foi consultado em médias para o ano de 2024 (UOL, 2024).

Conforme Quadro 10, com o volume de biogás calculado nesse estudo é possível obter 20.869 m³/mês de biometano, que pode substituir 19.408 l/mês de diesel. Ou seja, 19.408 l/mês é o volume total de diesel possível de se substituir, que representa 57% do consumo total de diesel da Vital.

$$CEC2 = V_{\text{diesel}} \times P_{\text{diesel}} \text{ (equação 12)}$$

$$CEC2 = 20.243 \text{ l/mês} \times 12 \text{ meses/ano} \times R\$ 6,20/\text{l}$$

$$CEC2 = R\$ 1.506.079,00/\text{ano}$$

5.6. RESULTADOS DA VIABILIDADE ECONÔMICA

A partir dos dados de CAPEX, OPEX, receitas e custos evitados e, considerando as premissas econômicas elencadas no Quadro 8, foi possível obter os resultados dos indicadores econômicos apresentados no Quadro 7, por meio de planilha eletrônica de cálculos.

Comparando os valores de OPEX e de receita do cenário 1, R\$ 486.098,00 e R\$ 346.970,00, respectivamente, já é possível observar que os valores de OPEX superam os valores da receita, ou seja, já há indícios de que não haverá viabilidade econômica, pois custará mais caro operar a planta do que os valores que entrarão com lucros. Esses valores negativos podem ser causados pelo preço de comercialização da energia elétrica no mercado livre de energia, que por ser livre, os valores podem ser muito baixos, reduzindo as possibilidades de viabilidade econômica. Além disso, o Marco Legal da Energia Distribuída, apresentado pela Lei 14.300/2022 (BRASIL, 2022g), versa sobre a cobrança pelo uso da rede da concessionária de energia (componente Fio B da tarifa de energia), para projetos de geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, que até antes de 2022 não era realizada, o que passou a impactar de forma negativa nas análises de viabilidade econômica para esse tipo de projeto.

Em contrapartida, os valores de custos evitados com o diesel no cenário 2 são maiores que os custos de OPEX, R\$ 1.506.079,00 e R\$ 585.051,00, respectivamente, o que indica que poderá haver viabilidade econômica para o período de análise do estudo de 20 anos. Esses indícios puderam ser validados com os resultados que serão apresentados na sequência.

As Tabelas 10 e 11 apresentam os dados dos resultados da análise econômica o cenário 1, onde é possível observar que os valores que representam os lucros do estudo (EBTIDA), são negativos durante todo o período de análise do projeto, ou seja, o volume de biogás produzido e considerado para gerar energia elétrica e comercializar no mercado livre de energia, não traz viabilidade econômica para o projeto.

Tabela 10 - Análise das receitas e lucros - Cenário 1 (continua)

Período do projeto (anos)	Receita bruta (R\$/ano)	Impostos	ROL	OPEX	Lucros (EBITDA)
0					
1	R\$ 346.971	R\$ 122.307	R\$ 224.663	R\$ 486.098	-R\$ 261.435
2	R\$ 363.486	R\$ 128.129	R\$ 235.357	R\$ 509.236	-R\$ 273.879
3	R\$ 380.788	R\$ 134.228	R\$ 246.560	R\$ 533.476	-R\$ 286.916
4	R\$ 398.914	R\$ 140.617	R\$ 258.297	R\$ 558.869	-R\$ 300.573
5	R\$ 417.902	R\$ 147.310	R\$ 270.592	R\$ 585.472	-R\$ 314.880
6	R\$ 437.794	R\$ 154.322	R\$ 283.472	R\$ 613.340	-R\$ 329.868
7	R\$ 458.633	R\$ 161.668	R\$ 296.965	R\$ 642.535	-R\$ 345.570
8	R\$ 480.464	R\$ 169.364	R\$ 311.101	R\$ 673.120	-R\$ 362.019
9	R\$ 503.334	R\$ 177.425	R\$ 325.909	R\$ 705.160	-R\$ 379.251
10	R\$ 527.293	R\$ 185.871	R\$ 341.422	R\$ 738.726	-R\$ 397.304
11	R\$ 552.392	R\$ 194.718	R\$ 357.674	R\$ 773.889	-R\$ 416.215
12	R\$ 578.686	R\$ 203.987	R\$ 374.699	R\$ 810.726	-R\$ 436.027
13	R\$ 606.231	R\$ 213.697	R\$ 392.535	R\$ 849.317	-R\$ 456.782
14	R\$ 635.088	R\$ 223.869	R\$ 411.220	R\$ 889.744	-R\$ 478.525
15	R\$ 665.318	R\$ 234.525	R\$ 430.794	R\$ 932.096	-R\$ 501.303
16	R\$ 696.987	R\$ 245.688	R\$ 451.299	R\$ 976.464	-R\$ 525.165

Tabela 10 - Análise das receitas e lucros - Cenário 1 (conclusão)

Período do projeto (anos)	Receita bruta (R\$/ano)	Impostos	ROL	OPEX	Lucros (EBITDA)
17	R\$ 730.164	R\$ 257.383	R\$ 472.781	R\$ 1.022.944	-R\$ 550.162
18	R\$ 764.920	R\$ 269.634	R\$ 495.286	R\$ 1.071.636	-R\$ 576.350
19	R\$ 801.330	R\$ 282.469	R\$ 518.861	R\$ 1.122.646	-R\$ 603.784
20	R\$ 839.473	R\$ 295.914	R\$ 543.559	R\$ 1.176.083	-R\$ 632.524

Fonte: A autora, 2025.

Da mesma foram, a Tabela 11 apresenta os valores no fluxo de caixa do projeto do cenário 1, evidenciando, novamente, valores negativos durante todo o período de análise de 20 anos.

Tabela 11 - Análise do fluxo de caixa - Cenário 1

Período do projeto (anos)	Fluxo De Caixa Livre	Fluxo De Caixa Livre Descontado	Fluxo De Caixa Livre Descontado Acumulado = VPL
0	R\$ -	R\$ -	R\$ -
1	-R\$ 1.427.690	-R\$ 1.274.723,55	-R\$ 1.274.723,55
2	-R\$ 1.378.007	-R\$ 1.098.538,76	-R\$ 2.373.262,31
3	-R\$ 1.328.916	-R\$ 945.896,17	-R\$ 3.319.158,48
4	-R\$ 1.280.446	-R\$ 813.746,29	-R\$ 4.132.904,77
5	-R\$ 1.232.625	-R\$ 699.424,62	-R\$ 4.832.329,39
6	-R\$ 1.185.486	-R\$ 600.604,00	-R\$ 5.432.933,39
7	-R\$ 1.139.060	-R\$ 515.252,84	-R\$ 5.948.186,23
8	-R\$ 1.093.381	-R\$ 441.598,40	-R\$ 6.389.784,63
9	-R\$ 1.048.486	-R\$ 378.094,50	-R\$ 6.767.879,13
10	-R\$ 1.004.411	-R\$ 323.393,31	-R\$ 7.091.272,44
11	-R\$ 416.215	-R\$ 119.651,93	-R\$ 7.210.924,37
12	-R\$ 436.027	-R\$ 111.917,28	-R\$ 7.322.841,65
13	-R\$ 456.782	-R\$ 104.682,63	-R\$ 7.427.524,28
14	-R\$ 478.525	-R\$ 97.915,65	-R\$ 7.525.439,93
15	-R\$ 501.303	-R\$ 91.586,10	-R\$ 7.617.026,03
16	-R\$ 525.165	-R\$ 85.665,71	-R\$ 7.702.691,74
17	-R\$ 550.162	-R\$ 80.128,04	-R\$ 7.782.819,78
18	-R\$ 576.350	-R\$ 74.948,33	-R\$ 7.857.768,11
19	-R\$ 603.784	-R\$ 70.103,46	-R\$ 7.927.871,56
20	-R\$ 632.524	-R\$ 65.571,77	-R\$ 7.993.443,33

Fonte: A autora, 2025.

As Tabelas 12 e 13 apresentam os dados dos resultados da análise econômica o cenário 2, onde é possível observar que os valores que representam o lucro do estudo (EBTIDA), são positivos e crescentes durante todo o período de análise do projeto, ou seja, há viabilidade econômica para o cenário 2.

Tabela 12 - Análise das receitas e lucros - Cenário 2

Período do projeto (anos)	Receita Bruta	Impostos	ROL	OPEX	Lucros (EBITDA)
0	-	-	-	-	-
1	R\$ 1.506.063	R\$ 30.121	R\$ 1.475.942	R\$ 585.051	R\$ 890.891
2	R\$ 1.577.752	R\$ 31.555	R\$ 1.546.197	R\$ 612.899	R\$ 933.297
3	R\$ 1.652.853	R\$ 33.057	R\$ 1.619.796	R\$ 642.073	R\$ 977.722
4	R\$ 1.731.528	R\$ 34.631	R\$ 1.696.898	R\$ 672.636	R\$ 1.024.262
5	R\$ 1.813.949	R\$ 36.279	R\$ 1.777.670	R\$ 704.654	R\$ 1.073.017
6	R\$ 1.900.293	R\$ 38.006	R\$ 1.862.287	R\$ 738.195	R\$ 1.124.092
7	R\$ 1.990.747	R\$ 39.815	R\$ 1.950.932	R\$ 773.333	R\$ 1.177.599
8	R\$ 2.085.507	R\$ 41.710	R\$ 2.043.796	R\$ 810.144	R\$ 1.233.653
9	R\$ 2.184.777	R\$ 43.696	R\$ 2.141.081	R\$ 848.707	R\$ 1.292.374
10	R\$ 2.288.772	R\$ 45.775	R\$ 2.242.997	R\$ 889.105	R\$ 1.353.891
11	R\$ 2.397.718	R\$ 47.954	R\$ 2.349.763	R\$ 931.427	R\$ 1.418.337
12	R\$ 2.511.849	R\$ 50.237	R\$ 2.461.612	R\$ 975.762	R\$ 1.485.850
13	R\$ 2.631.413	R\$ 52.628	R\$ 2.578.785	R\$ 1.022.209	R\$ 1.556.576
14	R\$ 2.756.668	R\$ 55.133	R\$ 2.701.535	R\$ 1.070.866	R\$ 1.630.669
15	R\$ 2.887.886	R\$ 57.758	R\$ 2.830.128	R\$ 1.121.839	R\$ 1.708.289
16	R\$ 3.025.349	R\$ 60.507	R\$ 2.964.842	R\$ 1.175.239	R\$ 1.789.603
17	R\$ 3.169.356	R\$ 63.387	R\$ 3.105.969	R\$ 1.231.180	R\$ 1.874.789
18	R\$ 3.320.217	R\$ 66.404	R\$ 3.253.813	R\$ 1.289.784	R\$ 1.964.028
19	R\$ 3.478.259	R\$ 69.565	R\$ 3.408.694	R\$ 1.351.178	R\$ 2.057.516
20	R\$ 3.643.824	R\$ 72.876	R\$ 3.570.948	R\$ 1.415.494	R\$ 2.155.454

Fonte: A autora, 2025.

Tabela 13 - Análise do fluxo de caixa - Cenário 2

Período do projeto (anos)	Fluxo De Caixa Livre	Fluxo De Caixa Livre Descontado	Fluxo De Caixa Livre Descontado Acumulado = VPL
0	R\$ -	R\$ -	R\$ -
1	-R\$ 768.646	-R\$ 686.290,85	-R\$ 686.290,85
2	-R\$ 637.834	-R\$ 508.477,47	-R\$ 1.194.768,32
3	-R\$ 505.004	-R\$ 359.451,86	-R\$ 1.554.220,17
4	-R\$ 370.059	-R\$ 235.179,31	-R\$ 1.789.399,48
5	-R\$ 232.899	-R\$ 132.153,22	-R\$ 1.921.552,70
6	-R\$ 93.418	-R\$ 47.328,63	-R\$ 1.968.881,33
7	R\$ 48.494	R\$ 21.936,08	-R\$ 1.946.945,25
8	R\$ 192.953	R\$ 77.930,32	-R\$ 1.869.014,93
9	R\$ 340.080	R\$ 122.636,14	-R\$ 1.746.378,79
10	R\$ 490.002	R\$ 157.767,50	-R\$ 1.588.611,29
11	R\$ 1.418.337	R\$ 407.737,91	-R\$ 1.180.873,38
12	R\$ 1.485.850	R\$ 381.380,57	-R\$ 799.492,81
13	R\$ 1.556.576	R\$ 356.727,04	-R\$ 442.765,77
14	R\$ 1.630.669	R\$ 333.667,18	-R\$ 109.098,59
15	R\$ 1.708.289	R\$ 312.097,98	R\$ 202.999,39
16	R\$ 1.789.603	R\$ 291.923,08	R\$ 494.922,47
17	R\$ 1.874.789	R\$ 273.052,34	R\$ 767.974,81
18	R\$ 1.964.028	R\$ 255.401,45	R\$ 1.023.376,26
19	R\$ 2.057.516	R\$ 238.891,57	R\$ 1.262.267,83
20	R\$ 2.155.454	R\$ 223.448,94	R\$ 1.485.716,77

Fonte: A autora, 2025.

Da mesma forma, a Tabela 13 apresenta os valores no fluxo de caixa do projeto do cenário 2, evidenciando que no ano 7 da análise o fluxo de caixa livre passa a ser positivo, ou seja, no ano 7 o projeto, apesar de ainda não ter lucros, já não tem mais prejuízos. Assim, o payback simples do cenário 2 é de aproximadamente 7 anos.

Já no ano 15, além de todo o valor do financiamento do projeto ser pago, se inicia um período em que começa a haver lucros para esse cenário. Assim, o payback descontado do cenário 2 é de aproximadamente 15 anos.

A Figura 14 apresenta o gráfico da análise do fluxo de caixa livre do Cenário 2, onde é possível observar que o momento em que a linha azul cruza o eixo zero (ano 7) é o período considerado como payback simples, onde o projeto tem o VPL igual a zero.

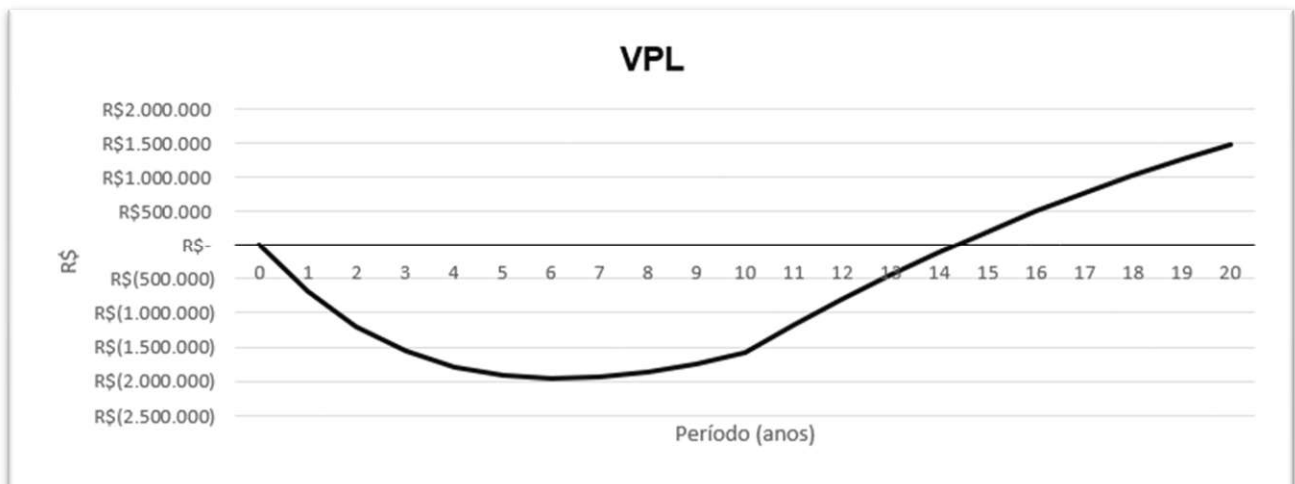
Figura 14 - Fluxo de Caixa Livre - Cenário 2



Fonte: A autora, 2025.

Já a Figura 15 apresenta o gráfico da análise do ponto de vista do VPL do cenário 2, onde é possível observar que o momento em que a linha preta cruza o eixo zero (ano 15) é o período considerado como payback descontado e, a partir daí, há lucros.

Figura 15 - Análise do VPL - Cenário 2



Fonte: A autora, 2025.

A Tabela 14 apresenta um resumo dos indicadores econômicos para os cenários 1 e 2.

Tabela 14 - Resumo indicadores econômicos cenários 1 e 2

Indicadores	Cenário 1	Cenário 2
VPL 5 anos	-R\$ 4.832.329,39	-R\$ 1.921.552,70
VPL 10 anos	-R\$ 7.091.272,44	-R\$ 1.588.611,29
VPL 15 anos	-R\$ 7.617.026,03	R\$ 202.999,39
VPL 20 anos	-R\$ 7.993.443,33	R\$ 223.448,94
Payback Simples	> 20 anos	6 – 7 anos
Payback Descontado	> 20 anos	14 - 15 anos

Fonte: A autora, 2025.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentado nesse estudo o referencial teórico acerca da geração de resíduos, demanda energética e produção, tratamento e aplicação energética do biogás para justificar aspectos técnicos da implantação de uma planta de biogás centralizada na cidade de Foz do Iguaçu, com o levantamento da quantidade de resíduos orgânicos produzidos pelo setor hoteleiro, CEASA e apreensões do MAPA. Com isso, foi possível calcular o potencial teórico de produção de biogás com os resíduos orgânicos dos setores selecionados, bem como estimar o potencial de aplicação energética do biogás para geração de energia elétrica, térmica e biometano.

A partir dos dados técnicos levantados, foi realizada consulta com fornecedores do mercado para levantamento dos custos de implantação (CAPEX) e de operação (OPEX). Além disso, foram estimados os valores de receita com a comercialização de energia elétrica e levantados os dados de consumo de diesel pela Vital Engenharia Ambiental, para embasar as receitas e custos evitados na análise econômica. Com isso, foi possível aplicar todos os dados de entrada em uma planilha eletrônica para obtenção dos indicadores econômicos que resultaram desse estudo que poderão ser considerados como base para tomadas de decisão de implantação de uma planta de biogás centralizada no município de Foz do Iguaçu.

A proposta de realizar o aproveitamento energético dos resíduos orgânicos gerados em Foz do Iguaçu pelos setores hoteleiro, CEASA e apreensões do MAPA é considerada como uma opção para um bom gerenciamento de resíduos sólidos na cidade que, em conjunto com aspectos ambientais, sociais e econômicos, atua diretamente para aumentar a vida útil do aterro sanitário municipal, bem como para ampliar a diversificação da atual matriz energética, baseada majoritariamente em fontes fósseis, reduzindo as emissões de gases poluentes.

A constância e diversidade dos resíduos orgânicos produzidos pelos geradores selecionados para esse estudo, representam uma fonte previsível de resíduos, o que justifica a viabilidade técnica da implantação de uma planta de biogás centralizada para produção e aplicação de biogás como fonte alternativa de energia.

O aproveitamento energético de resíduos orgânicos para produção de combustíveis renováveis atua na redução da dependência por combustíveis fósseis e contribui para o avanço na transição energética de forma sustentável. Além disso, é uma boa opção de gerenciamento de resíduos, o que reduz a necessidade de construção de aterros sanitários, diminui a emissão de gases poluentes, aumenta a qualidade de vida da população geral e é uma forma de geração de emprego e renda.

Apesar dos potenciais positivos do uso do biogás e biometano como fontes alternativas de energia, a ausência de políticas específicas voltadas para esses energético dificulta o avanço desse setor no Brasil, mesmo com seu potencial para complementar ou até substituir fontes

de energia não renováveis e de converter passivos ambientais em ativos econômicos. A implementação de políticas públicas, o incentivo ao desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao biogás e o fortalecimento do mercado podem ampliar a experiência no setor e aumentar a confiabilidade dos projetos de biogás no país. Um exemplo é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que reconhece a recuperação energética de resíduos sólidos como uma destinação final ambientalmente adequada. Estudos como o apresentado, contribuem para a divulgação de informações e exemplificam o que as cidades podem fazer para melhorar o gerenciamento de resíduos sólidos ao mesmo tempo em que aproveitam um potencial que seria desperdiçado com o envio dos resíduos para aterros sanitários.

Tendo em vista o crescimento populacional e, conseqüentemente a maior geração de resíduos, assim como foi possível observar nos dados coletados nesse estudo, onde de 2023 para 2024 houve aumento na geração de resíduos dos três geradores consultados, toda a análise técnica e econômica apresentada nesse estudo pode embasar novos estudos para a ampliação das fontes de resíduos analisadas, visando a obtenção de indicadores ainda mais positivos economicamente. Além disso, plantas de biogás centralizadas em uma cidade para o aproveitamento energético de resíduos orgânicos podem ser consideradas como projetos que visam o bem-estar dos contribuintes e da população em geral, não necessitando a obtenção de fins lucrativos e sendo uma forma de evolução para a concepção de políticas públicas para o setor de energias renováveis.

REFERÊNCIAS

ABDULREDHA, Muhammad et al. Estimating solid waste generation by hospitality industry during major festivals: A quantification model based on multiple regression. **Waste Management**, v. 77, p. 388–400, 2018. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/324788344_Estimating_solid_waste_generation_by_hospitality_industry_during_major_festivals_A_quantification_model_based_on_multiple_regression> Acesso em: 12 Set. 2023.

AGBEDE, O. et al. Anaerobic Conversion of Biodegradable Municipal Solid Waste to Biogas: A Review. **LAUTECH Journal of Civil and Environmental Studies**, v. 3, 2019. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/342332691_Anaerobic_Conversion_of_Biodegradable_Municipal_Solid_Waste_to_Biogas_A_Review> Acesso em: 28 Set. 2023.

AGÊNCIA BRASIL. Mapa impediu ingresso de 63 t de mercadorias proibidas em bagagens. Disponível em <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-01/mapa-impediu-ingresso-de-63-t-de-mercadorias-proibidas-em-bagagens>>. Acesso em: 24 Set. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biocombustíveis**, 2022a. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis>>. Acesso em: 22 Set. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biometano**, 2020b. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano>> Acesso em: 27 jul. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Brasil avança no setor de biocombustíveis**, 2020c. Disponível em <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/07/brasil-avanca-no-setor-de-biocombustiveis#:~:text=De%20acordo%20com%20a%20Ag%C3%Aancia,de%20petr%C3%B3leo%20em%20propor%C3%A7%C3%B5es%20vari%C3%A1veis>>. Acesso em: 03 Nov. 2024.

AL SEADI, Teodorita. **Biogas handbook**. 1.ed. Esbjerg, Denmark. University of Southern Denmark Esbjerg, 2010.

ALVES, Estéfani; De MERA. Claudia. Viabilidade econômica e financeira para a abertura de uma empresa de consultoria agrícola no município de cruz alta, RS. **RevInt - Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão**, Cruz Alta, v. 9, p. 309-322, 2021. ISSN 2358-6036, DOI: <https://doi.org/10.33053/revint.v9i1.652> Disponível em <<https://revistaelectronica.unicruz.edu.br/index.php/revint/article/view/652/424>> Acesso em: 24 Out, 2024.

ANDRICH, Emir; CRUZ, June; ANDRICH, Rene; GUINDANI, Roberto. **Finanças corporativas: análise dos demonstrativos contábeis e de investimentos**. Curitiba: Intersaberes, 2014.

ARAÚJO, Andrey et al. Planejamento Tributário Em Uma Indústria De Confeções. **Revista Visão:**

Gestão Organizacional, Caçador (SC), Brasil, v. 10, n. 2, p. 77-92, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.uniarp.edu.br/index.php/visao/article/view/2204>> Acesso em: 10 dez. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CENTRAIS DE ABASTECIMENTO. Sobre a Abracen. 2024. Disponível em: <<https://abracen.org.br/abracen/>> Acesso em: 10 dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023. Disponível em: <https://www.abesdf.com/files/ugd/d1b226_589ea11fa1ec44bd894683af0fcfa27c.pdf> Acesso em: 13 mar. 2024.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. Fundo Clima Automático. Disponível em <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima/fundo-clima-automatico>> Acesso em: 24 Nov. 2024.

BATISTA, Marcio. A framework for sustainable and integrated municipal solid waste management: Barriers and critical factors to developing countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, n. 20, p. 1-14, 2021. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/351804198_A_framework_for_sustainable_and_integrated_municipal_solid_waste_management_Barriers_and_critical_factors_to_developing_countries> Acesso em: 24 Nov. 2024.

BEUX, S. Avaliação do tratamento de efluentes de abatedouro em biodigestores anaeróbicos de duas fases. 2005. 99p. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos, Universidade de Ponta Grossa – UEPG/PR, Ponta Grossa, 2005.

BILLING, Eric.; THAREN, Daniela. Renewable methane – A technology evaluation by multi-criteria decision making from a European perspective, **Energy**, v. 139, p. 468-484, 2017. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217313580>> Acesso em: 15 mar. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional De Política Fazendária. CONVÊNIO ICMS N° 151, DE 1° DE OUTUBRO DE 2021. Autoriza as unidades federadas que menciona a conceder isenção do ICMS nas operações com máquinas, equipamentos, aparelhos e componentes para a geração de energia elétrica a partir do biogás. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2021a.

BRASIL. Lei N° 14.993, de 08 de outubro de 2024. **Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano**, 2024b. Disponível em <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/114993.htm> Acesso em: 14 dez. 2024.

BRASIL. Lei N° 11.771 de 17 de setembro de 2008. **Dispõe sobre a Política Nacional de Turismo, define as atribuições do Governo Federal no planejamento, desenvolvimento e estímulo ao setor turístico**, 2008c. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Lei/L11771.htm> Acesso em: 29 de jun. 2023.

BRASIL. Lei N° 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Brasília, DF, 2 ago.

2010d. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 15 de abr. 2024.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Probiogás**. Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil. Brasília, DF, 2016e. 74 p.

BRASIL. **Turismo acumula alta de 36,9% em 2022**, 2022f. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/viagens-e-turismo/2022/11/turismo-acumula-alta-de-36-9-em-2022>> Acesso em: 26 jan.2023.

BRASIL. LEI Nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, [...]. Brasília, DF”, 6 de janeiro 2022g. Disponível em <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20192022/2022/lei/l14300.htm> Acesso em 10 jan. 2025.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. CEEE divulga atualização da função. Disponível em <<https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/ccee-divulga-atualizacao-da-funcao-de-custo-de-deficit-para-formacao-de-preco-em-2022>> Acesso em: 20 Nov. 2024.

CANDAL, Antônio. **Solicitação de orçamento para estudo de Mestrado** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: <antonio.v.candal@gmail.com> em 17 nov. 2024.

CAO, Xincheng et al. Catalytic conversion of waste cooking oils for the production of liquid hydrocarbon biofuels using in-situ coating metal oxide on SBA-15 as heterogeneous catalyst. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 138, p. 137–144, 2019. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237018304285>> Acesso em : 28 fev. 2024.

CASASSO, Alessandro et al. Economic Viability and Greenhouse Gas (GHG) Budget of the Biomethane Retrofit of Manure-Operated Biogas Plants: A Case Study from Piedmont, Italy. **Sustainability**, v. 13, n. 14, 2021. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/353306603_Economic_Viability_and_Greenhouse_Gas_GHG_Budget_of_the_Biomethane_Retrofit_of_Manure-Operated_Biogas_Plants_A_Case_Study_from_Piedmont_Italy> Acesso em: 24 Nov. 2024.

CATAIA, Márcio; DUARTE, Luciano. Território e energia: crítica da transição energética. **Revista da anpege**. v. 18, 36, 2022. Disponível em <<https://ojs.ufgd.edu.br/anpege/article/view/16356/8900>> Acesso em 16 ago. 2023.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. Panorama do biogás no Brasil em 2021, 2022 a. Disponível em: <<https://cibiogas.eadplataforma.app/curso/panorama-do-biogas-no-brasil-em-2021>> Acesso em 28 jul. 2024.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. Panorama do biogás no Brasil em 2023, 2024b. Disponível em: <<https://cibiogas.eadplataforma.app/course/panorama-do-biogas-no-brasil-em-2023-6643dd66d6374>> Acesso em 04 jul. 2024.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. Características técnicas do biogás, 2018c. Disponível em <<https://cibiogas.eadplataforma.app/curso/plataf>> Acesso em 15 dez. 2024.

CHERNICHARO, Carlos. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA - UFMG, 2ª. Ed, 2007.

CHO, Jae ; PARK, Soon; CHANG, Ho. Biochemical methane potential and solid state anaerobic

digestion of Korean food wastes. **Bioresource Technology**, v. 52, n. 3, p. 245–253, 1995. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852495000319?via%3Dihub>> Acesso em: 25 Nov. 2024.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE GÁS (COPERGÁS). Gás Natural Industrial. Disponível em <<https://novo.copergas.com.br/gas-natural/industrial/>> Acesso em: 7 dez. 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS MUNICÍPIOS. Diagnóstico da política nacional de resíduos sólidos 2022. Disponível em: <https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2023/Estudos_tecnicos/202310_ET2022_MAMB_Diagnostico_PNRS_2022.pdf#:~:text=DIAGN%C3%93STICO%20DA%20POL%C3%8DTICA%20NACIONAL%20DE%20RES%C3%8DDUOS%20S%C3%93LIDOS%20%2D%202022,-O%20estudo%20sobre&text=A%20pesquisa%20teve%20resposta%20de,de%20recursos%20t%C3%A9cnicos%20e%20financeiros> Acesso em: 12 fev. 2023.

DELTA SANEAMENTO. O que é o tão falado reator UASB. Disponível em: <<https://deltasaneamento.com.br/o-que-e-o-tao-falado-reator-uasb/>> Acesso em: 30 jul. 2024.

EDWIGES, Thiago. **Biodigestão anaeróbia de resíduos vegetais provenientes de central de abastecimento**. 2017. 81 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2017.

ELIAS, Amanda; TRESMONDI, Ana. Gerenciamento de resíduos sólidos em estabelecimento de hospedagem: estudo de caso no município de Americana – SP. **Revista Ambiência**. v.15, n.3 p. 642-658, 2019. Disponível em < <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/4597>> Acesso em: 18 ago. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Resíduos Orgânicos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/hortalica-nao-e-so-salada/secoes/residuos-organicos>>. Acesso em: 25 mai. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Fontes de Energia**, 2024a. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>>. Acesso em: 20 mai. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão**, 2021b. Disponível em <www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno%20de%20Parâmetros%20de%20Custos%20-%20PDE%202030.pdf> Acesso em: 18 mar. 2024.

EUROSTAT. **Municipal waste statistic**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_generation> Acesso em: 15 mai. 2024.

FALA BR. **[Fala.BR] Manifestação Respondida no Sistema** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: <nao-responder.falabr@cgu.gov.br> em 12 jan. 2024.

FERRÃO, Caroline; MORAES, Jorge. Análise dos riscos ambientais e de acidentes de trabalho em serviços de coleta de resíduos sólidos urbanos. **Gestão & Produção**, v. 28, n. 1, 2021. Disponível em < www.scielo.br/j/gp/a/FXrRNVtX7qGfqKdZkVBNKMg/?format=pdf&lang=en> Acesso em: 24 Nov. 2024.

FONSECA, Marcelo; BORGES, Ana. Lixo e hospitalidade: o ensino consciente como estratégia para redução do volume de resíduos produzidos pela indústria de hospitalidade e ferramenta de captação

profissional gerando benefício social. **In: Seminário de Pesquisa em Turismo do Mercosul, Anais...** Caxias do Sul: UCS, 2006.

FOZ DO IGUAÇU. **Aterro sanitário**, 2024a. Disponível em: <<https://www5.pmfi.pr.gov.br/publicacao-1037>> Acesso em: 13 ago. 2024.

FOZ DO IGUAÇU. **Estatísticas e estudos turísticos**, 2024b. Disponível em: <<https://www.destino.foz.br/orgao-oficial/estatisticas-e-estudos-turisticos/>> Acesso em 18 jul. 2024.

FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (FCCC). Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement. Fifth session, 2023.

GARCILASSO, Vanessa et al. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano: Part. I Biogás; Part. II Biometano**. São Paulo: IEE-USP, 2018.

HAKAWATI, R et al. What Is the Most Energy Efficient Route for Biogas Utilization: Heat, Electricity or Transport? **Applied Energy**, Irlanda, v. 206, p. 1076–1087, 2017. Disponível em <<https://pureadmin.qub.ac.uk/ws/files/135497181/Document2.pdf>> Acesso em: 22 Nov. 2024.

HERNANDEZ, Edgar; GUERRAS, Lidia; MARTÍN, Mariano. Optimal technology selection for the biogas upgrading to biomethane. **Journal of Cleaner Production, Salamanca**, v. 267, n. 48. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/341348942_Optimal_technology_selection_for_the_biogas_upgrading_to_biomethane> Acesso em: 20 Nov. 2024.

INSTITUTO 17. **Biogás no Brasil: Potencial Oferta a Curto Prazo. Programa de Energia para o Brasil – BEP (Brasil)**. Relatório técnico 02-2021. São Paulo, 2021. Disponível em <<https://www.i17.eco.br/wp-content/uploads/2022/11/RT02-2021.pdf>> Acesso em: 17 abr. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**, 2022a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/foz-do-iguacu.html>> Acesso em: 28 mai.2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Inflação**, 2024b. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>> Acesso em: 24 Nov. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa de Serviços de Hospedagem: 2016. Rio de Janeiro: IBGE, 2017c. Disponível em <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100623.pdf>>. Acesso em: 20 out 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Transport Biofuels Analysis, Tracking Report, International Energy Agency. Paris, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2023/transport-biofuels>> Acesso em: 25 set. 2023.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. Global waste management outlook 2024. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44939/global_waste_management_outlook_2024.pdf?sequence=3> Acesso em: 18 jul.2024.

IRENA. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition). International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019. Disponível em <<https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>> Acesso em : 5 jun. 2024.

KUMAR, Atul; SAMADDER, S.R. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review, **Energy**, v. 197, 2020. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544220303601>> Acesso em: 3 jul. 2023.

KUNK, Airton, et al. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**, Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LIMA, Miréia et al. Análise de viabilidade econômico-financeira de um investimento em uma loja de brinquedos infantis. **Anais do VIII Simpósio de Engenharia de Produção**, São Paulo, p. 2278-2291. ISSN 2357-7592, DOI 10.5151/viisimep-315806, 2020. Disponível em <<https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/anlise-de-viabilidade-econmico-financeira-de-um-investimento-em-uma-loja-de-brinquedos-infantis-35245>> Acesso em: 24 Nov. 2024

MACEDO, Jesus; CORBARI, Ely. **Análise de projeto e orçamento empresarial**. Curitiba. Intersaberes, 2014.

MASHHADI, Arash; SAADY, Noori; BAZAN, Carlos. Predicting cost of dairy farm-based biogas plants: A North American perspective. v. 5, n.4, p. 365-375. **Journal of Energy Systems**, 2021; Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/357334757_Predicting_cost_of_dairy_farm-based_biogas_plants_A_North_American_perspective> Acesso em: 9 ago. 2024.

MCKENDRY, Peter. Overview of Anaerobic Digestion and Power and Gas to Grid Plant CAPEX and OPEX Costs. **Int J Bioprocess Biotech**, 2019. DOI:10.20911/IJBBT-109.100009. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/338693926_Overview_of_Anaerobic_Digestion_and_Power_and_Gas_to_Grid_Plant_CAPEX_and_OPEX_Costs> Acesso em: 23 Nov. 2024.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Guia prático do biogás**. 5a ed, 2010a. Disponível em < <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/guia-pratico-do-biogas.pdf>> Acesso em 28 mai. 2023.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **REIDI**, 2021b. Disponível em <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/fundos-regionais-e-incentivos-fiscais/reidi#:~:text=Criado%20pela%20Lei%20Federal%20n%C2%BA,para%20a%20habilita%C3%A7%C3%A3o%20Reidi>> Acesso em: 24 Nov. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço energético nacional**, 2017. Disponível em < www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-82/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf> Acesso em: 6 set. 2023.

NOGUEIRA, Luiz; CAPAZ, Rafael; LORA, Electo. Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 3 2021. Disponível em < <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/640/476>> Acesso em: 14 jul 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIA; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Aplicações do biogás para geração de energia elétrica**. Brasília: MCTI, 2020a. Disponível em < <https://cibiogas.eadplataforma.app/curso/aplicacoes-do-biogas-para-geracao-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 18 ago. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIA; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Biometano: biocombustível verde: guia técnico.** Brasília: MCTI. **Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira**, 2020b. Disponível em: <<https://cibiogas.eadplataforma.app/curso/guia-tecnico-biometano-biocombustivel-verde>>. Acesso em: 8 abr. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIA; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Panorama de tecnologias aplicadas no agronegócio de biogás e biometano**, 2019c. Disponível em: <<https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-04/Panorama%20de%20tecnologias%20aplicadas%20no%20agroneg%C3%B3cio%20de%20biog%C3%A1s%20e%20biometano.pdf>> Acesso em: 30 jul. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Guia prático para projetos de biogás.** Brasília: MCTI, 2022d. Disponível em: <<https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2022/09/Guia-pratico-para-projetos-de-biogas.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Sistemas de biogás e biometano: percepções de mercado no Brasil e no exterior.** Brasília: MCTI, 2021e. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2021/11/121L-NT_Sistemas-de-biogás-e-biometano.pdf> Acesso em: 01 dez. 2024.

PERUCHIN, Bianca; et al. Estudo da geração dos resíduos sólidos em hotel. **Revista Turismo Visão e Ação**. v. 17, n. 2, p. 301-322, 2015. Disponível em <www.redalyc.org/pdf/2610/261056064004.pdf> Acesso em: 25 jan. 2024.

PHU, Song; HOANG, Minh; FUJIWARA, Takeshi. Analyzing solid waste management practices for the hotel industry. **Global Journal of Environmental Science and Management**, v. 4, n. 1, p. 19-30, 2018. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/321712201_Analyzing_solid_waste_management_practices_for_the_hotel_industry> Acesso em : 19 jun. 2023.

PIRANI, Sanaa; ARAFAT, Hassan. Solid waste management in the hospitality industry: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 320–336. 2014. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/265387304_Solid_waste_management_in_the_hospitality_industry_A_review> Acesso em: 20 jul. 2023.

PUCCINI, Ernesto. **Matemática financeira e análise de investimentos**. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração. UFSC; [Brasília]: CAPES: UAB, 2016. Disponível em <<https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/643232/2/Matemática%20Financeira%20e%20Análise%20de%20Investimentos.pdf>>. Acesso em: 24 Nov. 2024.

QUARESMA, Igor; ATHAYDE, Gilson. Taxa de geração e composição de resíduos sólidos provenientes de serviço de hotelaria. , v. 10, n. 1, 2021. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/348303198_Taxa_de_geracao_e_composicao_de_residuos_solidos_provenientes_de_servico_de_hotelaria> Acesso em 20 jul. 2023.

REVISTA EXAME. As 10 cidades brasileiras preferidas pelos turistas e por quê. Disponível em: <<https://exame.com/brasil/os-10-destinos-brasileiros-preferidos-pelos-turistas/>>. Acesso em 25 Set. 2023.

ROA, Ivan et al. Economic feasibility of biogas microgeneration from food waste: potential for sustainable energy in northeastern Brazil. **Sustainability**, Pernambuco, v. 16, n. 23, novembro, 2024. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/386049622_Economic_Feasibility_of_Biogas_Microgeneration_from_Food_Waste_Potential_for_Sustainable_Energy_in_Northeastern_Brazil#fullTextFileContent> Acesso em: 25 Nov. 2024.

ROCHA, Mayesk; OLIVEIRA, Antonio; ABUD, Ana. Avaliação do potencial de geração de energia a partir de resíduos orgânicos de um restaurante popular. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, e23512139560, 2023. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/367111094_Avaliacao_do_potencial_de_geracao_de_energia_a_partir_de_residuos_organicos_de_um_restaurante_popular> Acesso em: 23 Nov. 2024.

SAVOLDI, Maycon. **Solicitação de orçamento para estudo de Mestrado** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: <maycon@3diengenharia.com> em 04 nov. 2024.

sem autor: DIESEL S-10 tem alta de 0,32% no início de novembro. **UOL**, Rio de Janeiro, 13 de novembro de 2024. cidade de publicação, dia, mês e ano. Economia. Disponível em <<https://economia.uol.com.br/noticias/estadao-conteudo/2024/11/13/diesel-s-10-tem-alta-de-032-no-inicio-de-novembro-apesar-da-petrobras-mostra-iptl.htm>> Acesso em: 7 dez. 2024.

SENADO FEDERAL. Em discussão: Rumo a 4 bilhões de toneladas por ano. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/acervo-historico/em-discussao#/residuossolidos/materia.html?materia=rumo-a-4-bilhoes-de-toneladas-por-ano.html>>. Acesso em: 22 Set. 2023.

SMANIOTTO, Bruna; BECKER, Márcia. Biogás para valorização energética dos resíduos sólidos orgânicos em Foz do Iguaçu-PR. in: **7º Congresso sul-americano de resíduos sólidos e sustentabilidade**, 2024, Curitiba-PR.

SOARES, Itânia et al. **Biogás e suas contribuições para os objetivos de desenvolvimento sustentável**. 1a ed. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1149613/1/DOC-49-final-1.pdf>> Acesso em: 16 out 2023.

SOUZA, Ricardo et al. Métodos estimativos da geração e composição de Resíduos sólidos urbanos: uma revisão. **Revista Engenharia e Construção Civil**. Curitiba, v.1, n.2, p. 24-39, 2014. Disponível em <<https://periodicos.utfpr.edu.br/recc/article/view/6624>> Acesso em: 15 jul. 2023.

STATISTA. **Average annual per capita municipal waste generated by OECD countries as of 2022**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_generation> Acesso em: 29 jun. 2024.

SYDNEY, Eduardo et al. Bioconversion of food waste to biogas. **Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products**. Springer, 2021. p.95-108.

TONIELO, Camila. et al. Avaliação econômica do empreendimento de uma empresa de construção civil. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.8, n.8, p.55555-55575, agosto, 2022 DOI:10.34117/bjdv8n8-057 Disponível em <<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/50904/38231>>. Acesso em:

24 Nov. 2024

VITAL ENGENHARIA AMBIENTAL. [Consumo de diesel pelos caminhões da frota de coleta de lixo de Foz do Iguaçu], 2024a. WhatsApp: [mensagem pessoal] 10 set. 2024. 08:13. Mensagem de WhatsApp.

VITAL ENGENHARIA AMBIENTAL. [Quantitativo de resíduos orgânicos gerados pelo CEASA de Foz do Iguaçu], 2024b. WhatsApp: [mensagem pessoal] 30 jan. 2024. 15:12. Mensagem de WhatsApp.

ZORG BIOGAS. Portfólio Vircava. 2024. Disponível em: <<https://zorg-biogas.com/about-zorg/portfolio?object=17>> Acesso em 30 jul. 2024.

ANEXO A – ORÇAMENTO PARA SISTEMA DE BIODIGESTÃO CH4 SOLUTIONS (CAPEX)

Descrição	Preço Venda (R\$)
2x Biodigestor pré-moldado em concreto armado (diâmetro 12m, altura 6,20m), radier estaqueado, inserts, pintura interna da parede na parte líquida com xypex / parte gás vitipoli, revestimento térmico, membrana de cobertura dupla, quatro agitadores, sensores, serpentinas, para-raios, escada p/ janela de visualização (ÁGUA DO CLIENTE)	R\$ 2.881.956,71
1x Pré-tanque pré-moldado em concreto armado (diâmetro 4m, altura 3,0m), radier apoiado no solo, membrana de cobertura dupla, dois agitadores, inserts, pintura interna xypex concentrado / parte gás vitipoli, sensores, serpentina, para-raios, escada para visualização. (ÁGUA DO CLIENTE)	R\$ 312.845,89
Infraestrutura Externa - Piperacks, calçada, tubulações e cabos entre edificações da usina, bomba de biomassa, medidore de vazão biomassa / digestato, válvulas, aterramento, triturador.	R\$ 242.326,12
1x Boiler 150 kW. Dentro de contêiner.	R\$ 237.393,31
1x Casa de comando em contêiner com analisador de gás, computador, CCM, ar condicionado, móveis.	R\$ 749.481,34
1x Compressor de ar comprimido para válvulas pneumáticas. Dentro de contêiner.	R\$ 45.162,99
1x Flare 200 Nm ² , base de concreto apoiado no solo	R\$ 154.061,15
Implantação em uma área de 435,00 m ² , limpeza do terreno, mobilização, canteiro de obras por 7 meses e ensaio de solo. Administração da obra por 7 meses. Projeto Executivo. Gerenciamento e Segurança do Trabalho.	R\$ 395.917,11
Terraplanagem em uma área de 575,00m ² , considerando desníveis de 2 metros. REVER QUANDO TIVER PLANIALTIMÉTRICO.	R\$ 31.003,54
Urbanização - Pavimentação das ruas com brita granítica, drenagem pluvial, cerca delimitando os platôs da usina, portão e iluminação pública.	R\$ 55.134,11
TOTAL (R\$):	R\$ 5.105.282

**ANEXO B – ORÇAMENTO PARA SISTEMA DE BIODIGESTÃO CH4 SOLUTIONS
(OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO)**

Custo de Operação e Manutenção		
Custo de Manutenção da Planta de Biogás	1,5%	52.726,78
Transporte de Pessoal e Comercial	0,00	0,00
Aluguel de Equipamentos e Veículos	0,00	0,00
Energia Elétrica por ANO	228,29	68.488,01
	SUB-TOTAL	121.214,79
Contingência	5%	6.060,74
	Total R\$	127.275,53

**ANEXO C – ORÇAMENTO PARA SISTEMA DE BIODIGESTÃO CH4 SOLUTIONS
(RECURSOS HUMANOS)**

			Brasil		Mensal	Anual
Operador planta Senior	2	2.500,00	2,10	\$ 5.250,00	\$ 10.500,00	\$ 126.000,00
Operador planta Junior (manutenção)	1	3.000,00	2,10	\$ 6.300,00	\$ 6.300,00	\$ 75.600,00
Operador planta Pleno (manutenção)	1	4.000,00	2,10	\$ 8.400,00	\$ 8.400,00	\$ 100.800,00
	4			Custo Recursos Humanos	R\$ 25.200,00	R\$ 302.400,00

ANEXO D – ORÇAMENTOS PARA SISTEMA TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CAPEX)



PURE TECH ENERGY LTDA – CNPJ 41.827.255/0001-00

Avenida Olímpio Rafagnin, 395 - Lancaster

Foz do Iguaçu/PR – CEP: 85863-495

contato@puretechenergy.com

PROPOSTA PRELIMINAR PARA FORNECIMENTO DE BIORREFINARIA PURE METHANE E COMPLEMENTARES

Objetivo: Embasar estudo para Viabilidade Técnica e Econômica da Implantação de uma Planta de Biogás para Aproveitamento de Resíduos Orgânicos no Município de Foz do Iguaçu/PR.

Condições do biogás: 60% CH₄, até 500 ppm de H₂S. Vazão de 1.500 a 1.600 Nm³/dia, operação de 8h a 10h diárias.

Escopo de fornecimento:

01 Biorrefinaria para 150~180 Nm³/h de biogás = R\$ 1.950.000,00

01 Instalação e comissionamento = R\$ 130.000,00

01 Operação Assistida por 30 dias = R\$ 50.000,00

01 Sistema de pré compressão = R\$ 40.000,00

01 Sistema de pré resfriamento = R\$ 60.000,00

01 Sistema de Compressão de biometano 250bar, 100 Nm³/h = R\$ 500.000,00

01 Container feixe para 3.000 Nm³ = R\$ 580.000,00

01 Ponto de abastecimento = R\$ 130.000,00

Cenário 2 - Energia elétrica:

1) Sistema de tratamento - Remoção de umidade e H₂S = R\$ 120.000,00

2) Geração de energia elétrica (motogerador a biogás - 250 kW) = R\$ 780.000,00

Contato: Maycon Fabio Savoldi

maycon@3diengenharia.com

45 99906-6459

ANEXO E – ORÇAMENTO PARA SISTEMA TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS (OPEX)



PURE TECH ENERGY LTDA – CNPJ 41.827.255/0001-00
Avenida Olímpio Rafagnin, 395 - Lancaster
Foz do Iguaçu/PR – CEP: 85863-495
contato@puretechenergy.com

PROPOSTA PRELIMINAR PARA FORNECIMENTO DE BIORREFINARIA PURE METHANE E COMPLEMENTARES

Objetivo: Embasar estudo para Viabilidade Técnica e Econômica da Implantação de uma Planta de Biogás para Aproveitamento de Resíduos Orgânicos no Município de Foz do Iguaçu/PR.

Tabela 1

CIDADE	Quantidade	Capacidade Sistema Refino	Horas diárias de operação	Vazão Total	Vazão de biogás diário	Concentração de Metano	Vazão de biometano ¹	Dias de operação mensal	Produção de biometano diária	Biogás Tratado Mensalmente	Produção de biometano mensal
		Nm ³ biogás/dia	horas	Nm ³ biogás/hora	Nm ³ biogás/dia	%	Nm ³ /h	dias	Nm ³ /dia	Nm ³ /mês	Nm ³ /mês
Foz do Iguaçu	1	115	24	125,0	3.000	96,0%	71	30	1.875	90.000	54.180

¹ Considerando 97% de Recovery

Tabela 2

CIDADE	Equipamento	Potência Instalada (kW)		Consumo Elétrico Estimado [kWh/100Nm ³ de Biometano]	Custo do kWh ²	Custo E.E. MENSAL	Custos de Manutenção de Equipamentos, substituição de Peças e outros consumíveis				Custo do Item de Manutenção	
		Por equipamento	Total				Filtração geral	Óleo lubrificante	Docentes adjuvantes ³ (Carvão Ativado)	Reposição (Componentes, Compressores, Sistema de Injeção, Válvulas, etc.)		
Foz do Iguaçu	PURE METHANE 125	30	30	12.688	R\$ 0,41	R\$ 5.817,90	R\$ 112,00	R\$ 330,00	R\$	4.305,52	R\$ 2.105,08	R\$ 0,24

² Considerando tarifa média industrial

³ Considerando o custo de R\$ 200/kg de carvão ativado e redução de 50% para 200g/m³ de entrada e do custo de aplicação contínuo a 100%

Tabela 3

CIDADE	Vazão de biogás diário	Dias de operação mensal	Vazão Mássica H2S DIÁRIA	Vazão Mássica H2S MENSAL	Densidade	Capacidade de Absorção	Custo/ m ³	Volume Carvão mensal	Kg carvão mensal	Custo da Reposição de carvão	Tempo reposição Cóluna 200kg
	Nm ³ biogás/dia	dias	[kg/dia]	[kg/Mês]	[kg/m ³]	[kg H2S/ m ³ de carvão]	[R\$/kg]	[m ³ /mês]	kg/Mês	R\$/Mês	Mês
Foz do Iguaçu	3.000	30	2,1	62,0	420,0	210,0	36,0	0,30	125,2	R\$ 4.505,52	1,00

Contato: Maycon Fabio Savoldi

maycon@3diengenhararia.com

45 99906-6459