



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS ORIUNDO DE
RESÍDUOS ORGÂNICOS ALIMENTARES GERADOS NA REGIÃO DA VILA C EM
FOZ DO IGUAÇU/PR**

IGOR NOGUEIRA DA SILVA

Foz do Iguaçu
2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS ORIUNDO DE
RESÍDUOS ORGÂNICOS ALIMENTARES GERADOS NA REGIÃO DA VILA C EM
FOZ DO IGUAÇU/PR**

IGOR NOGUEIRA DA SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dra. Andreia Cristina Furtado.

Foz do Iguaçu
2022

IGOR NOGUEIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS ORIUNDO DE
RESÍDUOS ORGÂNICOS ALIMENTARES GERADOS NA REGIÃO DA VILA C EM
FOZ DO IGUAÇU/PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof. Dra. Andreia Cristina Furtado
UNILA

Prof. Dr. Luis Antônio Lourenço
UNILA

Prof. Dra. Marcela Boroski
UNILA

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): IGOR NOGUEIRA DA SILVA

Curso: ENGENHARIA QUÍMICA

		Tipo de Documento
<input checked="" type="checkbox"/> graduação	<input type="checkbox"/> artigo	
<input type="checkbox"/> especialização	<input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso	
<input type="checkbox"/> mestrado	<input type="checkbox"/> monografia	
<input type="checkbox"/> doutorado	<input type="checkbox"/> dissertação	
	<input type="checkbox"/> tese	
	<input type="checkbox"/> CD/DVD – obras audiovisuais	
	<input type="checkbox"/> _____	

Título do trabalho acadêmico: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS ORIUNDO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS ALIMENTARES GERADOS NA REGIÃO DA VILA C EM FOZ DO IGUAÇU/PR

Nome do orientador(a): ANDREIA CRISTINA FURTADO

Data da Defesa: ____/____/____

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a Deus, pela sua infinita graça e misericórdia, que me fortaleceu em momentos que pensei em largar tudo, e manteve minha confiança enquanto as coisas caminhavam bem comigo.

Quero agradecer a minha família, por todo o auxílio nessa trajetória. Lembro aqui da minha mãe, que abriu mão de muitas coisas para estar junto a mim. Lembro também da minha irmã Kamila e meu cunhado Samuel, que abriram as portas de sua casa no início de tudo. Venho lembrar do meu pai Juarez, da minha irmã Daniele (que me presenteou com um livro que inspirou este trabalho), meu cunhado Roberto e meu pequenino sobrinho Daniel, que um dia entenderá o quanto também foi importante.

Quero agradecer a minha amada e futura esposa Cynthia, que teve imensa paciência comigo com o passar destes anos. Ao longo de chamadas de vídeo, ligações e mensagens, muito aperto pela saudade, mas no final tudo valerá a pena. Seremos referência para este mundo!

Não posso deixar de mencionar o agradecimento a todos os meus professores desde o pré-escolar, fundamentais para a construção não somente intelectual, mas também do cidadão. Quero lembrar aqui dos últimos, que encontrei na UNILA, todos deixaram imensa contribuição a mim.

Quero citar alguns docentes especialmente: Andreia Furtado, minha orientadora, muito obrigado pelo auxílio em cada momento da minha formação. Luís Lourenço, por ter me convidado ao projeto que direcionou a minha paixão de alinhar a engenharia química com a ciência de dados. Joanna Albuquerque, por ter me encorajado a seguir no projeto de extensão que se tornou uma alegria em concretizá-lo. Marcela Boroski, além dos ensinamentos nas disciplinas e no projeto, por ter compartilhado comigo 10 minutos de conversa quando pude então desabafar com alguém o meu péssimo momento mental em 2017. Priscila Coldebella, que conversou comigo na disciplina de TCC I a respeito desse tema, e em todos os momentos foi uma grande amiga.

Quero agradecer aos meus colegas de estudo, todos contribuíram para a minha formação de forma especial em cada trabalho, reunião, almoços...você são demais e desejo a todos muito sucesso em suas carreiras!

Quero agradecer também a psicóloga Vanessa Silvestro, que foi fundamental nas sessões semanais que tive em 2017, vivendo o pior momento mental da

minha vida. Muito obrigado, o trabalho de vocês é incrível!

Por último, quero agradecer a você, que está acessando este trabalho. Que este assunto possa ser cada vez mais difundido, pois seu potencial é enorme. Que trabalhos muito maiores e melhores que este possam vir, e que eu possa deixar a minha contribuição para a comunidade científica. Muito obrigado!

“Os teus olhos viram a minha substância ainda informe, e no teu livro foram escritos os dias, sim, todos os dias que foram ordenados a mim, quando ainda nenhum deles havia.” Sl 139:16

Bíblia Sagrada

SILVA, Igor Nogueira da. **Avaliação do potencial energético do biogás oriundo de resíduos orgânicos alimentares gerados na Região da Vila C em Foz do Iguaçu/PR.** 2019. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

RESUMO

O biogás é produzido por fontes antropogênica e natural, cuja composição provém do metano, gás carbônico e outros gases em menores porcentagens. É o principal produto da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, dentre os quais destacam-se os alimentares, cuja geração global anual é de aproximadamente 1,6 bilhão de toneladas. O biogás também é fonte energética, cujas aplicações são para conversão em energia térmica, elétrica e como combustível. O produto secundário da digestão anaeróbia é o digestato, que possui alto teor de nutrientes e pode ser aproveitado como biofertilizante. Neste contexto, a Região da Vila C em Foz do Iguaçu/PR contém uma produção anual de 3.899 ton/ano de resíduos orgânicos alimentares, que foram o substrato escolhido na modelagem de um sistema de digestão anaeróbia, para avaliação do potencial energético do biogás produzido sob dois cenários: O Cenário 1, que continha a utilização de 100% do biogás para conversão em energia térmica, com foco na substituição do gás GLP de botijões; e o Cenário 2, pela utilização de 100% do biogás para conversão em energia elétrica, com o envio de parte da energia para manutenção da planta de digestão anaeróbia e pela comercialização do excedente. Os dois cenários foram modelados no software *RETScreen Expert* com o biogás na forma de biometano e analisados como projetos de 20 anos com o auxílio de 4 parâmetros econômicos: VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno), *Payback* e fluxos de caixa acumulados. Também verificou-se a sensibilidade dos cenários e avaliados seus limites para viabilidade econômica. Além disso, calculou-se a capacidade de produção de biofertilizantes sólidos e líquidos a partir do digestato. Para o Cenário 1, obteve-se um biogás com potencial energético de 1.142.881,95 Mcal/ano, energia térmica equivalente a 70.137 kg de gás GLP ou 5.395,15 botijões. Para o Cenário 2, a capacidade de conversão em energia elétrica foi de 480.470 kWh/ano, com 89.686,2 kWh direcionados à manutenção da planta e 390.783,8 kWh para comercialização. Na análise dos cenários, o Cenário 1 sobressaiu em relação ao Cenário 2 pelo VPL, TIR e *Payback*, além de um fluxo de caixa acumulado cerca de 8 vezes maior, demonstrando maior lucratividade. Quanto à sensibilidade, o Cenário 1 apresentou um limite máximo do preço do combustível em R\$ 1,36/m³ e o valor mínimo médio do preço do botijão de gás GLP de R\$ 45,05. Para o Cenário 2, o limite máximo médio para a taxa de inflação foi 7,07% e o limite mínimo do preço da eletricidade exportada foi R\$ 523,50/MWh. Em relação a produção de biofertilizantes, verificou-se que 526.419 kg de biofertilizantes sólidos com 30% de umidade ou 3.372.981 L de biofertilizantes líquidos podem ser obtidos anualmente. A utilização do biogás proveniente de resíduos alimentares para posterior recuperação energética apresenta grande potencial de crescimento no Brasil, podendo começar em pequenas regiões e contribuir também para a redução do efeito estufa.

Palavras-chave: biogás; resíduos alimentares; energia térmica; energia elétrica; viabilidade econômica.

RESUMEN

El biogás es producido por fuentes antropogénicas y naturales, cuya composición proviene del metano, gas carbónico y otros gases en porcentajes menores. Es el principal producto de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos, entre los que destacan los alimentos, cuya generación global anual es de aproximadamente 1.600 millones de toneladas. El biogás también es fuente energética, cuyas aplicaciones son para conversión en energía térmica, eléctrica y como combustible. El producto secundario de la digestión anaeróbica es el digestato, que posee un alto contenido de nutrientes y puede ser aprovechado como biofertilizante. En este contexto, la Región de la Vila C en Foz do Iguaçu/PR contiene una producción anual de 3.899 toneladas/año de residuos orgánicos alimentarios, que fueron el sustrato escogido en la modelación de un sistema de digestión anaeróbica, para evaluar el potencial energético del biogás producido en dos escenarios: el escenario 1, que contenía el uso del 100 % del biogás para su conversión en energía térmica, con foco en la sustitución del gas GLP de bombonas; y el Escenario 2, por la utilización del 100% del biogás para la conversión en energía eléctrica, con el envío de parte de la energía para mantenimiento de la planta de digestión anaeróbica y por la comercialización del excedente. Los dos escenarios fueron modelados en el software RETScreen Expert con el biogás en forma de biometano y analizados como proyectos de 20 años con la ayuda de 4 parámetros económicos: VPN (Valor Presente Neto), TIR (Tasa Interna de Retorno), Payback y flujos de caja acumulados. También se verificó la sensibilidad de los escenarios y evaluados sus límites para viabilidad económica. Además, se calculó la capacidad de producción de biofertilizantes sólidos y líquidos a partir del digestato. Para el escenario 1, se obtuvo un biogás con potencial energético de 1.142.881,95 Mcal/año, energía térmica equivalente a 70.137 kg de gas GLP o 5.395,15 bombonas. Para el escenario 2, la capacidad de conversión en energía eléctrica fue de 480.470 kWh/año, con 89.686,2 kWh destinados al mantenimiento de la planta y 390.783,8 kWh para comercialización. En el análisis de los escenarios, el Escenario 1 sobresalió en relación al Escenario 2 por el VPN, TIR y Payback, además de un flujo de caja acumulado cerca de 8 veces mayor, demostrando mayor rentabilidad. En cuanto a la sensibilidad, el Escenario 1 presentó un límite máximo del precio del combustible en R\$ 1,36/m³ y el valor mínimo medio del precio de las bombonas de gas GLP de R\$ 45,05. Para el escenario 2, el límite máximo promedio para la tasa de inflación fue 7,07% y el límite mínimo del precio de la electricidad exportada fue R\$ 523,50/MWh. En relación a la producción de biofertilizantes, se verificó que 526.419 kg de biofertilizantes sólidos con 30% de humedad o 3.372.981 L de biofertilizantes líquidos pueden ser obtenidos anualmente. La utilización del biogás procedente de residuos alimentarios para su posterior recuperación energética presenta un gran potencial de crecimiento en Brasil, pudiendo comenzar en pequeñas regiones y contribuye también a la reducción del efecto invernadero.

Palabras clave: biogás; residuos alimenticios; energía térmica; energía eléctrica; viabilidad económica.

ABSTRACT

Biogas is produced by anthropogenic and natural sources, whose composition comes from methane, carbon dioxide and other gases in smaller percentages. It's the main product of anaerobic digestion of organic waste, among which stand out the food, whose global generation is approximately 1.6 billion tons yearly. Biogas is also an energy source, whose applications are for conversion into thermal, electrical and as a fuel. The secondary product of anaerobic digestion is digestate, which has a high nutrient content and can be used as a biofertilizer. In this context, the Vila C Region in Foz do Iguaçu/PR contains an annual production of 3,899 tons/year of organic food residues, which were the substrate chosen in the modeling of an anaerobic digestion system, to assess the energy potential of biogas produced under two scenarios: Scenario 1, which contained the use of 100% of biogas for conversion to thermal energy, focusing on the substitution of LPG gas from cylinders; and Scenario 2, by the use of 100% of biogas for conversion to electric energy, with the sending of part of the energy for maintenance of the anaerobic digestion plant and by the commercialization of the surplus. The two scenarios were modeled in the Retscreen Expert software with biogas in the form of biomethane and analyzed as 20-year projects with the aid of 4 economic parameters: NPV (Net Present Value), IRR (Internal Return Rate), Payback and accumulated cash flows. It's also verified the sensitivity of the scenarios and evaluated their limits for economic viability. In addition, the production capacity of solid and liquid biofertilizers from digestate was calculated. For Scenario 1, it's obtained a biogas with energy potential of 1,142,881.95 Mcal/year, thermal energy equivalent to 70,137 kg of LPG gas or 5,395.15 cylinders. For Scenario 2, the capacity to convert to electric energy was 480,470 kWh/year, with 89,686.2 kWh for plant maintenance and 390,783.8 kWh for commercialization. In the scenario analysis, Scenario 1 stood out in relation to Scenario 2 by NPV, IRR and Payback, in addition to an accumulated cash flow about 8 times higher, demonstrating greater profitability. Regarding sensitivity, Scenario 1 presented a maximum fuel price limit of R\$ 1.36/m³ and the minimum average value of the LPG gas price of R\$ 45.05. For Scenario 2, the average ceiling for the inflation rate was 7.07% and the minimum limit for the price of the exported electricity was R\$ 523.50/MWh. Regarding the production of biofertilizers, it was found that 526,419 kg of solid biofertilizers with 30% humidity or 3,372,981 L of liquid biofertilizers can be obtained annually. The use of biogas from food waste for further energy recovery has great growth potential in Brazil, which can start in small regions and also contributes to the reduction of the greenhouse effect.

Key words: biogas; food waste; thermal energy; electrical energy; economic viability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas da digestão anaeróbia.....	17
Figura 2 – Sistema de digestão anaeróbia simplificado.....	19
Figura 3 – Sistema de cogeração a gás.....	28
Figura 4 – Sistemas de combustão interna.....	28
Figura 5 – Região de interesse do estudo.....	31
Figura 6 – Tela inicial do software <i>RETScreen Expert</i>	33
Figura 7 – Ilustração do Cenário 1.....	37
Figura 8 – Ilustração do Cenário 2.....	37
Figura 9 – Fluxos de caixa acumulados para os cenários (Cenário 1, acima; Cenário 2, abaixo).....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aparições de termos relativos ao aproveitamento ou recuperação energética de resíduos.....	15
Quadro 2 – Características de cada tipo de pré-tratamento.....	20
Quadro 3 – Características de 4 modelos de digestores anaeróbios.....	21
Quadro 4 – Impactos dos principais contaminantes do biogás.....	22
Quadro 5 – Características do uso do biogás em diferentes lugares.....	24
Quadro 6 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de cogeração.....	29
Quadro 7 – Quantidade de RSU gerados em cada rota dos bairros da região de interesse do estudo.....	32
Quadro 8 – Dados inseridos no <i>RETSscreen Expert</i> para os dois cenários.....	39
Quadro 9 – Dados específicos presentes no Cenário 1.....	40
Quadro 10 – Dados específicos presentes no Cenário 2.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do sistema de gestão de resíduos sólidos de diversos países....	16
Tabela 2 – Produção de biogás, porcentagem de contribuição e o número de plantas para diferentes aplicações do biogás.....	25
Tabela 3 – Produção de biogás, porcentagem de contribuição e o número de plantas para diferentes fontes do biogás.....	25
Tabela 4 – Equivalência energética do biogás em comparação a outras fontes de acordo com diferentes autores.....	27
Tabela 5 – Resultados do cálculo de dimensionamento do digestor anaeróbio.....	45
Tabela 6 – Viabilidade financeira dos cenários.....	46
Tabela 7 – Análise de sensibilidade do Cenário 1.....	49
Tabela 8 – Análise de sensibilidade do Cenário 2.....	50
Tabela 9 – Dados de insumos e ajustes pelo IPCA.....	61
Tabela 10 – Custos para purificação do biogás e ajustes pelo IPCA.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1 RESÍDUOS ORGÂNICOS.....	14
3.1.1 Geração de resíduos orgânicos alimentares.....	14
3.2 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	14
3.3 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PELO MUNDO.....	15
3.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA	16
3.4.1 Hidrólise.....	17
3.4.2 Acidogênese.....	17
3.4.3 Acetogênese.....	18
3.4.4 Metanogênese.....	18
3.4.5 Sistema de digestão anaeróbia.....	18
3.4.6 Métodos de pré-tratamento de resíduos orgânicos.....	19
3.4.7 Tipos de digestores anaeróbios.....	20
3.4.8 Purificação do biogás.....	22
3.4.9 Digestato.....	22
3.5 ASPECTOS AMBIENTAIS DO BIOGÁS.....	23
3.6 PANORAMA DO BIOGÁS PELO MUNDO.....	23
3.6.1 Biogás no Brasil.....	24
3.6.2 Biogás em Foz do Iguaçu/PR.....	25
3.7 CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA.....	26
3.7.1 Energia térmica.....	26
3.7.2 Sistemas de cogeração de energia elétrica.....	27
3.7.2.1 Turbinas a gás.....	27
3.7.2.2 Sistemas de combustão interna.....	28
3.8 MÉTRICAS ECONÔMICAS PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE DE	

PROJETOS.....	29
3.8.1 Valor Presente Líquido.....	29
3.8.2 Taxa Interna de Retorno.....	29
3.8.3 Payback.....	30
4 METODOLOGIA.....	31
4.1 REGIÃO DE INTERESSE DO ESTUDO.....	31
4.2 SOFTWARE RETSCREEN EXPERT.....	32
4.3 PARÂMETROS ESTABELECIDOS PARA O ESTUDO.....	33
4.4 DIMENSIONAMENTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO.....	34
4.5 CENÁRIOS PARA A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS ORIUNDO DE RESÍDUOS ALIMENTARES DA REGIÃO DA VILA C.....	36
4.5.1 Cenário 1.....	36
4.5.2 Cenário 2.....	37
4.6 MODELAGEM DOS CENÁRIOS NO SOFTWARE RETSCREEN EXPERT.....	37
4.6.1 Dados climáticos, caracterização do biogás, custos e parâmetros financeiros presentes nos dois cenários.....	37
4.6.2 Parâmetros específicos para o Cenário 1.....	40
4.6.3 Parâmetros específicos para o Cenário 2.....	41
4.7 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS CENÁRIOS.....	42
4.7.1 Cenário 1.....	42
4.7.2 Cenário 2.....	43
4.8 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DOS CENÁRIOS.....	43
4.9 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS CENÁRIOS.....	43
4.9.1 Cenário 1.....	43
4.9.2 Cenário 2.....	44
4.10 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTES SÓLIDOS E LÍQUIDOS.....	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1 DIMENSIONAMENTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO.....	45
5.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS CENÁRIOS.....	45
5.2.1 Cenário 1.....	45
5.2.2 Cenário 2.....	46

5.3 ANÁLISE ECONÔMICA DOS CENÁRIOS.....	46
5.3.1 VPL.....	47
5.3.2 TIR.....	47
5.3.3 Payback.....	47
5.3.4 Fluxos de caixa acumulados.....	47
5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS CENÁRIOS.....	49
5.4.1 Cenário 1.....	49
5.4.2 Cenário 2.....	50
5.5 Produção de biofertilizantes.....	51
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICES.....	61
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO.....	62

1 INTRODUÇÃO

O biogás é um gás incolor, predominantemente inodoro, de baixa densidade, insolúvel, produzido basicamente por fontes antropogênica e natural, cuja constituição se dá principalmente por metano, gás carbônico e outros gases em menores concentrações. Sua descoberta ocorreu em 1667 por Thomas Shirley, no Reino Unido (CASSINI *et al.*, 2003; REIS, 2020).

O olhar para as aplicações do biogás modificou-se de forma importante ao longo das últimas décadas. Onde antes era apenas visto como subproduto da decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos, numa época de abundância de outras fontes energéticas não-renováveis, a partir da década de 1970 devido à crise energética e o aumento do preço dos combustíveis foi reavivado o interesse no biogás, especialmente em países europeus (CASSINI *et al.*, 2003).

Dentre as aplicações do biogás, destacam-se a queima direta em queimadores, fogões e caldeiras como fonte de energia térmica, a conversão em energia elétrica em grupos motogeradores, bem como a utilização como combustível veicular sob a forma de biometano (KONRAD *et al.*, 2016).

Sob o ponto de vista da produção de biogás, os resíduos orgânicos surgem como protagonistas em plantas de digestão anaeróbia. Este processo auxilia na solução de problemas ambientais, pois tais resíduos são potenciais poluidores se não tratados de forma adequada. Dentre as fontes orgânicas mais conhecidas estão os resíduos alimentares, cuja geração no Brasil em 2019 chegou a 27 milhões de toneladas e sua destinação final comumente ocorre em aterros sanitários (COLDEBELLA, 2006; EPE, 2014; PAIXÃO, 2018).

Atualmente no Brasil encontram-se 675 plantas de digestão anaeróbia, com capacidade total de 2,22 bi Nm³/ano de produção. Somente no estado do Paraná, há 146 plantas, cuja capacidade é de 208,47 mi Nm³/ano. A cidade de Foz do Iguaçu/PR, local de estudo deste trabalho, possui duas plantas, com capacidade de 208,05 mil Nm³/ano (CIBIOGÁS, 2022).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar o potencial energético do biogás oriundo da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos alimentares gerados na Região da Vila C, em Foz do Iguaçu/PR, com modelagem de dois cenários: um que utiliza 100% do biogás para conversão em energia térmica e outro que utiliza 100% do biogás para conversão em energia elétrica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a viabilidade do biogás como energia térmica para substituição de botijões com Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) utilizados em fogões e fornos, e as economias pela não necessidade de aquisição do gás GLP;
- Propor a aplicação do biogás como energia elétrica para suprir a demanda energética da planta de digestão anaeróbia e verificar os possíveis ganhos pela comercialização da energia;
- Avaliar a viabilidade econômica dos dois cenários, utilizando como parâmetros o VPL, TIR, o *Payback* e os fluxos de caixa acumulados;
- Analisar a sensibilidade financeira dos dois cenários;
- Estimar o potencial de produção de biofertilizantes sólidos e líquidos a partir do digestato.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 RESÍDUOS ORGÂNICOS

Os resíduos orgânicos referem-se à fração orgânica e constituinte de mais da metade da quantidade total de resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados no Brasil. Possuem a capacidade de degradação espontânea em ambiente natural equilibrado e são exemplos os restos de alimentos e podas, resíduos de agroindústria alimentícia, indústria madeireira, frigoríficos e lodos de estações de tratamento de esgotos (BRASIL, 2017; ZAGO; BARROS, 2019).

Por dados de geração apresentados pela Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021) e a porcentagem estimada em 51,4% de orgânicos nos RSU (BRASÍLIA, 2012), tem-se uma produção anual de aproximadamente 42 milhões de toneladas de resíduos orgânicos no Brasil.

3.1.1 Geração de resíduos orgânicos alimentares

Os resíduos alimentares são de fácil biodegradabilidade e sua origem provém de residências, estabelecimentos comerciais e feiras livres. Estima-se que 1,6 bilhão de toneladas de alimentos são desperdiçados mundialmente, com perdas econômicas bilionárias, fato este que evidencia a não possibilidade de negligência da economia circular global frente ao problema (MA *et al.*, 2020; PAIXÃO, 2018).

No contexto brasileiro, dados da Organização não Governamental Banco de Alimentos revelam que 27 milhões de toneladas de alimentos foram desperdiçados em 2019, o equivalente a 41,6 kg por habitante. De forma complementar, dados da Rede PenSSAN mostraram que em 2020, 55,2% dos domicílios brasileiros possuíam algum grau de insegurança alimentar, sendo 9% destes passando pela triste experiência da fome, o equivalente a 19 milhões de brasileiros (BANCO DE ALIMENTOS, 2022; FAO, 2022).

3.2 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/10, estabelece o conjunto de ações que norteiam a gestão dos resíduos sólidos

gerados no Brasil (BRASIL, 2010). Na descrição da Lei, há vários indicativos no intuito de estabelecer a recuperação ou aproveitamento energético dos resíduos sólidos, conforme descrição no Quadro 1:

Quadro 1 – Aparições de termos relativos ao aproveitamento ou recuperação energética de resíduos.

Referência	Descrição na Lei nº 12.305/10
Art. 3º, inciso VII	...destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ...
Art. 6º, inciso XIV	...incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético ;
Art. 9º, § 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.
Art. 15, inciso IV	...metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos;

Fonte: adaptado de BRASIL, 2010.

3.3 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PELO MUNDO

Segundo Lima (2002), a ideia da gestão de resíduos sólidos incorpora fatores como a tomada de decisões estratégicas institucionais, administrativos, operacionais, financeiros e ambientais. Quanto ao gerenciamento de resíduos sólidos, o autor ressalta que este conceito abrange fatores administrativos, gerenciais, econômicos, ambientais e de desempenho. No âmbito do desenvolvimento de um sistema de gestão voltado para resíduos sólidos, faz-se necessária a identificação de valores individuais e coletivos da sociedade.

Desta forma, cada país possui uma forma particular de exercer a gestão dos resíduos sólidos, que dependerão dos fatores mencionados anteriormente. A Tabela 1, a seguir, contém dados de diversos países sobre como cada um direciona o seu próprio sistema de gestão:

Tabela 1 – Dados do sistema de gestão de resíduos sólidos de diversos países.

País	Reciclagem	Compostagem	Recuperação energética ⁽¹⁾	Aterro sanitário
Holanda	39%	7%	42%	12%
Suíça	31%	11%	45%	13%
Dinamarca	29%	2%	58%	11%
Estados Unidos	24%	8%	13%	55%
Austrália	20%	<<1%	<1%	80%
Alemanha	15%	5%	30%	50%
Japão	15%	0%	78%	7%
Israel	13%	0%	0%	87%
França	12% ⁽²⁾	0%	40%	48%
Brasil	<8%	2%	0%	>90% ⁽³⁾
Reino Unido	8%	1%	8%	83%
Grécia	5%	0%	0%	95% ⁽³⁾
Itália	3%	10%	7%	80%
Suécia	3%	5%	52%	40%
México	2%	0%	0%	98% ⁽³⁾

(1) Basicamente incineração.

(2) As estatísticas incluem a compostagem.

(3) Incluem aterros controlados e lixões.

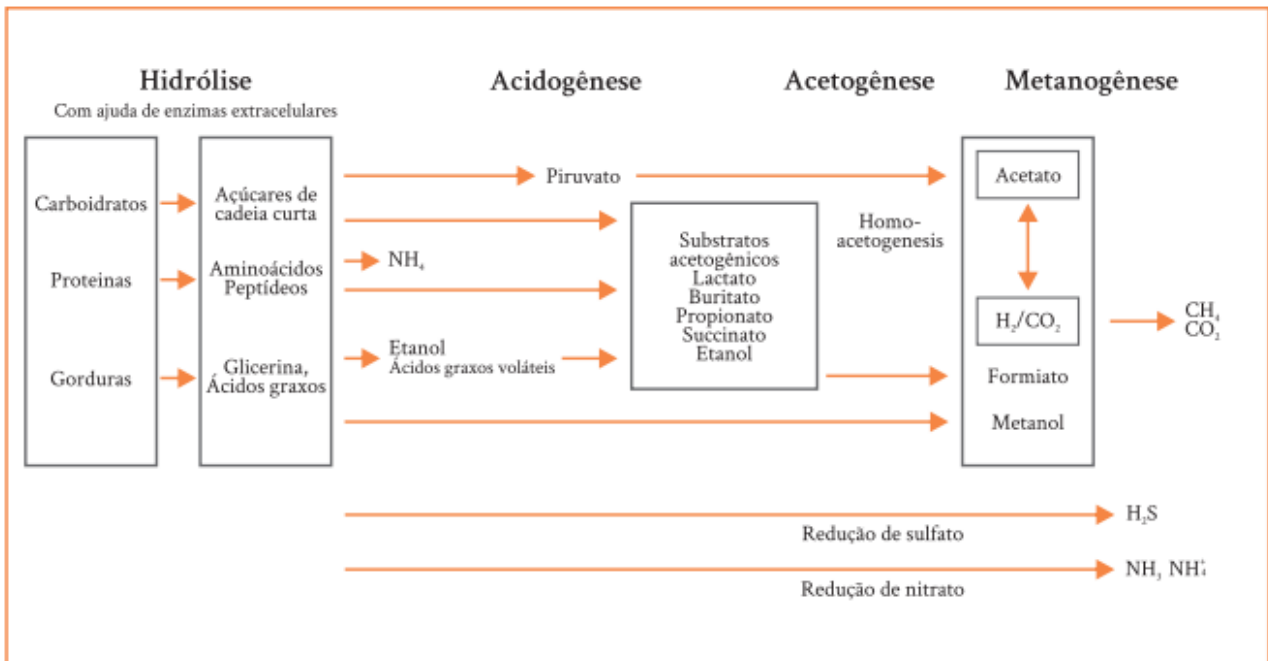
Fonte: adaptado de EPE, 2014.

Os dados apresentados na Tabela 1 apontam que países desenvolvidos como Japão, Holanda, Suíça, Dinamarca possuem sistemas de gestão exemplares com alta recuperação energética oriunda de seus resíduos sólidos e baixa disposição final em aterros sanitários. Contrariamente, países como o Brasil possuem sistemas ainda voltados para disposição em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, com desprezível recuperação energética que tais resíduos podem fornecer.

3.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA

Segundo Marchi *et al.* (2013), a digestão anaeróbia é um processo bioquímico de múltiplos estágios, com a finalidade de estabilizar diferentes tipos de matéria orgânica na ausência de oxigênio. Este processo ocorre em 4 etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 1). A seguir, encontram-se maiores detalhes de cada etapa.

Figura 1 – Etapas da digestão anaeróbia.



Fonte: KUNZ, *et al.* 2019.

3.4.1 Hidrólise

Na etapa de hidrólise, ocorre a conversão de compostos de elevada massa molecular (lipídios, polissacarídeos e proteínas) em compostos orgânicos menores (monômeros) com participação de enzimas extracelulares provenientes da excreção de bactérias hidrolíticas. A velocidade desta etapa depende diretamente do substrato, podendo ser um fator limitante para a velocidade global de degradação (KUNZ *et al.*, 2019).

3.4.2 Acidogênese

Na fase seguinte, acidogênese, ocorre a assimilação dos compostos dissolvidos da hidrólise por bactérias fermentativas e em seguida são excretados como substâncias orgânicas simples (compostos minerais como os gases H_2 , CO_2 , NH_3 e H_2S , além de ácidos graxos voláteis, álcoois e ácido láctico) (SILVA, 2009).

3.4.3 Acetogênese

Na etapa de acetogênese, os ácidos graxos voláteis e outros compostos orgânicos produzidos na etapa anterior são consumidos por bactérias acetogênicas, desencadeando reações que produzem ácido fórmico, ácido acético, dióxido de carbono e gás hidrogênio (KUNZ *et al.*, 2019).

3.4.4 Metanogênese

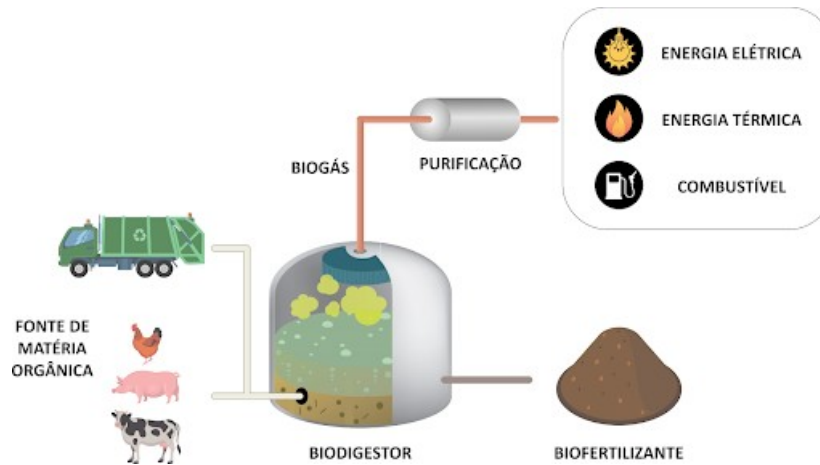
Na última etapa, metanogênese, é produzido metano oriundo dos produtos da etapa acetogênica por duas vias diferentes: em uma, as bactérias acetoclásticas utilizam acetato como fonte de energia e de carbono e na outra, as bactérias metanogênicas hidrogenotróficas utilizam dióxido de carbono como fonte de carbono (LOUZADA, 2006; MARCHI; BRESSIANI; BARBOSA, 2013; MENDONÇA, 2009).

3.4.5 Sistema de digestão anaeróbia

Um sistema de digestão anaeróbia é formado pela obtenção do substrato, podendo este provir de diversas fontes como a fração orgânica de RSU, estrume animal, resíduos industriais, agropecuários, entre muitos outros. Em seguida, o substrato pode ou não passar por uma etapa de pré-tratamento antes de ser alimentado ao digestor anaeróbio, a depender da finalidade do biogás gerado e questões econômicas (AZEITONA, 2012; MILANEZ *et al.*, 2018).

Após, os resíduos orgânicos são alimentados ao digestor anaeróbio que ao final serão gerados dois produtos: biogás e biofertilizante. Para utilização do biogás para conversão em energias térmica e elétrica ou como combustível, é necessária uma etapa de purificação de contaminantes. O biofertilizante gerado é rico em nutrientes e pode ser utilizado na agricultura (KUNZ *et al.*, 2019; VICTORINO, 2019). A Figura 2 a seguir contém uma ilustração de um sistema de digestão anaeróbia simplificado:

Figura 2 – Sistema de digestão anaeróbia simplificado.



Fonte: FOXWATER, 2022.

3.4.6 Métodos de pré-tratamento de resíduos orgânicos

A digestão anaeróbia é uma técnica muito promissora no tratamento de resíduos sólidos orgânicos pela capacidade de transformação da matéria orgânica em biogás com porcentagem de metano entre 60-70%, também pela redução da quantidade de sólidos a serem tratados ao final do processo e pela possibilidade do uso do digestato como fertilizante (CARBALLA *et al.*, 2011).

Comumente, a digestão anaeróbia é limitada por longos tempos de detenção hidráulica (20-30 dias) e/ou pela baixa eficiência geral de degradação (30-50%) apresentada na etapa de hidrólise. A fim de contornar tais problemas, sugere-se uma etapa de pré-tratamento aos resíduos orgânicos para aceleração da hidrólise e permitindo maior contato do substrato aos microrganismos anaeróbios (AZEITONA, 2012).

Os tipos de pré-tratamentos dividem-se em 4 principais grupos: térmicos; mecânicos; químicos; biológicos e enzimáticos (AZEITONA, 2012). O Quadro 2 a seguir, contém um resumo das principais características para cada tipo:

Quadro 2 – Características de cada tipo de pré-tratamento.

Tipo	Características
Térmicos	<ul style="list-style-type: none"> • As temperaturas mais comuns estão entre 60 e 180 °C; • Temperaturas elevadas diminuem a capacidade de biodegradação; • A temperatura cerca de 70 °C aumenta a atividade biológica de bactérias termofílicas; • Os pré-tratamentos térmicos induzem a um aumento da produção de metano em regime mesofílico e termofílico.
Mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> • São utilizados métodos de desintegração física do substrato; • A redução do tamanho das partículas e o aumento da superfície disponível para ação dos microrganismos, elevam a velocidade da digestão anaeróbia; • Apresentam baixos custos operacionais; • Não produz substâncias tóxicas ou inibidoras.
Químicos	<ul style="list-style-type: none"> • Dividem-se em 2 grupos: hidrólise ácida e alcalina; oxidação avançada; • Este tipo de pré-tratamento é mais eficiente e apresenta melhor custo-benefício que o tratamento térmico; • O pré-tratamento químico é eficiente na solubilização de vários substratos e pode ser combinado ao térmico.
Biológicos e enzimáticos	<ul style="list-style-type: none"> • Não são justificáveis para a utilização em resíduos orgânicos devido ao seu alto custo; • São baseados na adição de bactérias ou de enzimas específicas para impulsionamento da etapa de hidrólise.

Fonte: adaptado de AZEITONA, 2012.

3.4.7 Tipos de digestores anaeróbios

Há 4 formas de caracterizar os tipos de digestores anaeróbios: regime de alimentação (batelada ou contínuo), forma de alimentação (laminar ou ascendente), concentração de sólidos no reator (úmida < 10%; semissólida 10 a 15%; digestão sólida > 20%) e sistema de agitação (sem mistura, parcial ou completa). Além disso, há 4 modelos mais comuns no Brasil: biodigestor de lagoa coberta (BLC), biodigestor tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), biodigestor CSTR (*Continuous Stirred-Tank Reactor*) e biodigestor em fase sólida (KUNZ *et al.*, 2019). Maiores detalhes dos 4 modelos encontram-se descritos no Quadro 3, a seguir:

Quadro 3 – Características de 4 modelos de digestores anaeróbios.

Modelo	Características
Biodigestor de lagoa coberta (BLC)	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com material geossintético; • Baixa permeabilidade a fluidos e gases; • Geometria de base retangular e seção trapezoidal; • Fácil construção e operação; • Não possui sistema de aquecimento; • Tendência a acúmulo de lodo por não haver sistema de remoção de sólidos; • Efluentes de baixa concentração de sólidos (até 3% de sólidos totais) e baixa carga orgânica volumétrica.
Biodigestor tipo UASB	<ul style="list-style-type: none"> • Caracteriza-se pelo fluxo ascendente do afluente até o topo do reator; • Alta capacidade de retenção da biomassa; • Baixo tempo de detenção hidráulica (4 a 72 h); • Apresenta estabilidade em variações das características do afluente; • O afluente deve conter baixa concentração de sólidos totais (< 2%).
Biodigestor CSTR	<ul style="list-style-type: none"> • Suporta elevadas cargas orgânicas volumétricas; • Homogeneização constante pelo sistema de agitação; • Concentração de sólidos mais elevada que os outros 2 modelos; • Tempo de detenção hidráulica comumente entre 15 a 20 dias, porém depende do substrato; • Sistema de alimentação leva o material direto da estocagem e podem conter de forma acoplada sistemas de homogeneização, trituração e controle de vazão; • Possui sistema de aquecimento; • Cerca de 90% dos digestores anaeróbios da Europa são desse modelo.
Biodigestor em fase sólida	<ul style="list-style-type: none"> • Operam em batelada; • Resíduos com 20 a 40% de sólidos totais; • Devido à baixa concentração de água, um menor volume do biodigestor é requerido; • Necessita-se de bombas para recirculação do lixiviado; • Tempo de digestão entre 2 a 4 semanas; • Produtividade de biogás é 15 a 40% menor que por modelos de via úmida

Fonte: KUNZ, *et al.*, 2019.

3.4.8 Purificação do biogás

O biogás obtido do processo de digestão anaeróbia contém alguns contaminantes que afetam o seu potencial energético, dentre os quais destacam-se o sulfeto de hidrogênio (H₂S), dióxido de carbono (CO₂), água, amônia (NH₃) (KUNZ *et al.*, 2019). O Quadro 4, a seguir, contém um resumo dos impactos destes contaminantes ao biogás:

Quadro 4 – Impactos dos principais contaminantes do biogás.

Contaminante	Impactos
H ₂ S	<ul style="list-style-type: none"> • Confere mau odor, além de corrosivo e tóxico; • Quanto maior a concentração, maiores são os riscos à saúde humana; • Corrosão em tanques de armazenamento, tubulações metálicas, motores de combustão e impactos na infraestrutura de produção do biogás.
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Interferência direta no potencial energético do biogás por ser inerte na combustão e ocupação de volume.
Água	<ul style="list-style-type: none"> • Pode acumular nos dutos, ocasionando corrosão e/ou entupimento.
NH ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Ocorre liberação de óxidos de nitrogênio para a atmosfera, contribuindo para a formação de chuva ácida. Há maior presença em resíduos agrícolas.

Fonte: KUNZ *et al.*, 2019.

3.4.9 Digestato

O digestato é o material, seja sólido ou líquido, que permanece no digestor anaeróbio após todo o processo de fermentação anaeróbia. Possui a característica de ser rico em nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), além de micronutrientes, permitindo assim que seja utilizado como biofertilizante natural, substituindo os fertilizantes minerais que possuem alta capacidade de gerar impactos ambientais negativos (VICTORINO, 2019).

Quanto aos cálculos de geração de biofertilizantes, Ma *et al.* (2020) estimaram que uma tonelada de resíduos alimentares podem gerar 135 kg de biofertilizante sólido com 30% de umidade ou 865 L de biofertilizante líquido. Além disso, foi estimada a capacidade global de produção de 220 milhões de toneladas de

biofertilizantes sólidos apenas em 2018 com a relação mencionada, que supriria a demanda anual de aproximadamente 200 milhões de toneladas.

3.5 ASPECTOS AMBIENTAIS DO BIOGÁS

A produção de biogás contribui no âmbito ambiental a respeito de dois assuntos muito importantes: o efeito estufa e a poluição proveniente da exposição de resíduos. Cerca de 80% dos gases do efeito estufa são compostos por dióxido de carbono e metano, protagonistas da composição do biogás (SÃO PAULO, 2022). O metano é cerca de 22 vezes mais impactante que o dióxido de carbono para este problema ambiental e permite alternativas como (KARLSSON *et al.*, 2014):

- O metano sendo utilizado como substituinte a combustíveis fósseis ao ser queimado, gera dióxido de carbono;
- Se apenas ocorrer a queima do biogás em *flares*, há liberação de dióxido de carbono para a atmosfera e não do metano.

Em relação à poluição proveniente da exposição de resíduos, um dos produtos do processo de digestão anaeróbia é o substrato digerido, denominado digestato. Este possui alto teor de nutrientes que podem ser utilizados na agricultura como biofertilizantes, contribuindo também neste aspecto ambiental (KARLSSON *et al.*, 2014).

3.6 PANORAMA DO BIOGÁS PELO MUNDO

O biogás ainda contém pouca significância dentro do contexto da produção de energia primária no mundo. Dados de 2015 revelam que menos de 0,3% do total de energia produzida teve como origem o biogás. Em contrapartida, foi a 3º fonte de energia renovável que obteve maior taxa de crescimento anual entre 1990 e 2015, com aumento de 12,8% a.a., estando atrás apenas das energias solar fotovoltaica e eólica (MILANEZ *et al.*, 2018).

Embora o uso do biogás seja consolidado na Europa e nos Estados Unidos, nota-se um crescimento na Ásia e África nos últimos anos. O perfil europeu de uso é a partir da digestão anaeróbia de resíduos agropecuários, enquanto nos Estados Unidos provém de aterros sanitários e águas de rejeito. O Quadro 5, a seguir, contém destaques do panorama mundial do biogás:

Quadro 5 – Características do uso do biogás em diferentes países.

Local	Características do uso de biogás
Europa	<ul style="list-style-type: none"> • Entre 2009 e 2015, o número de plantas subiu de 6.000 para 17.000 plantas, 10.800 presentes na Alemanha; • Apesar deste crescimento, apenas 1,9% da geração elétrica do continente provém do biogás; • Resíduos utilizados majoritariamente são lodos de esgoto e os agropecuários; • O uso principal do biogás é para conversão em eletricidade, em segundo plano tem-se o uso como energia térmica.
Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> • Há aproximadamente 2.100 plantas de biogás, a maioria em estações de tratamento de água; • Estima-se um potencial para 13.000 plantas, com produção de 40 TWh de eletricidade; • Os resíduos provém de aterros sanitários, águas de rejeito e estrume animal; • O direcionamento do uso do biogás divide-se de forma semelhante à conversão em energia elétrica em relação à energia térmica.
China e Índia	<ul style="list-style-type: none"> • O biogás provém de digestores de pequena escala, cujo foco é para utilização em cozinhas; • Na China, há crescente número de projetos de engenharia na agricultura; • Na Índia, há dificuldades com os custos para implementação em áreas de baixa renda. Também são observadas inconstâncias no fornecimento de matérias-primas e imaturidade dos mercados nas regiões urbanas.

Fonte: MILANEZ *et al.*, 2018.

3.6.1 Biogás no Brasil

O biogás em território brasileiro ainda está em fase de maturidade como fonte renovável na matriz energética brasileira. Entre 2010 e 2016, houve um aumento de 0,01 a 0,05% na contribuição da energia no país, com aumentos de 45% a.a (EPE, 2017; MILANEZ *et al.*, 2018).

Atualmente, são 675 plantas de digestão anaeróbia com produção de 2,22 bi Nm³/ano, para 4 aplicações: energias elétrica, térmica e mecânica, além do biometano

(CIBIOGÁS, 2022). A Tabela 2, a seguir, contém dados da produção de biogás para cada aplicação, a porcentagem de contribuição e o número de plantas correspondente:

Tabela 2 - Produção de biogás, porcentagem de contribuição e o número de plantas para diferentes aplicações do biogás.

Aplicação	Produção anual (Nm ³ /ano)	Porcentagem de contribuição	Número de plantas
Energia elétrica	1,63 bi	73,42%	566
Energia térmica	184,24 mi	8,30	92
Energia mecânica	7,53 mi	0,27%	6
Biometano	399,92 mi	18,01%	11

Fonte: adaptado de CIBIOGÁS, 2022.

Quanto ao substrato do processo de digestão anaeróbia, as principais fontes utilizadas no Brasil são os RSU, resíduos de esgoto, industriais e agropecuários. A Tabela 3, a seguir, contém dados da produção de biogás para cada fonte¹, a porcentagem de contribuição e o número de plantas correspondente (CIBIOGÁS, 2022).

Tabela 3 - Produção de biogás, porcentagem de contribuição e o número de plantas para diferentes fontes do biogás.

Fonte	Produção anual (Nm ³ /ano)	Porcentagem de contribuição	Número de plantas
RSU ou esgoto	1,68 bi	75,68%	70
Resíduos industriais	332,24 mi	14,96%	87
Resíduos agropecuários	210,66 mi	9,36%	518

Fonte: adaptado de CIBIOGÁS, 2022.

3.6.2 Biogás em Foz do Iguaçu/PR

Foz do Iguaçu é uma cidade de 618,06 km² situada no sudoeste do estado do Paraná, com população estimada em 257.971 habitantes. Possui como principal trunfo econômico o turismo, devido aos seus diversos pontos turísticos, dentre os quais destacam-se as Cataratas do Iguaçu e a Usina Hidrelétrica de Itaipu. Além disso, a cidade desperta interesse por ser fronteira ao Paraguai e Argentina, pelas cidades

¹ Obs: pela forma de disposição dos dados na bibliografia consultada, os dados de RSU e esgoto estão unificados.

Ciudad Del Este e Puerto Iguazú, respectivamente (CONTE, 2013; IBGE, 2022).

No contexto do biogás, a cidade possui duas plantas cuja produção anual é de 208,05 mil Nm³/ano. Uma das plantas pertence à CIBiogás, empresa criada em 2013 e situada no Parque Tecnológico Itaipu, com o objetivo de gerir de forma inteligente os resíduos orgânicos para serem uma fonte de energia renovável e convertida posteriormente em energia térmica, elétrica ou como biometano (CIBIOGÁS, 2022).

Neste contexto, está em vigor um projeto da Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu em parceria com empresas do ramo de biogás que visa a compra de 120 biodigestores com o intuito de ampliar a vida útil do Aterro Sanitário da cidade. Os biodigestores serão distribuídos em escolas, centros de educação infantil e unidades de valorização de materiais recicláveis, com previsão de economias pelo uso do biogás em substituição ao gás GLP (PORTAL DA CIDADE, 2021).

3.7 CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA

Independentemente de qual seja a aplicação útil, o biogás proporciona renda e boas economias, com importante valor financeiro associado. Desta forma, há um crescente interesse pelo processo de digestão anaeróbia (SANTOS, 2000).

3.7.1 Energia térmica

Para utilização como energia térmica, o biogás necessita ser queimado em fogões, fornos, caldeiras, ou qualquer equipamento semelhante. No entanto, por questões de eficiência, são necessárias adaptações ou mesmo confecções de aparelhos específicos para este fim. Coldebella (2006) recomenda um aumento no diâmetro de vazão do injetor para utilização do biogás em baixa pressão quando a adaptação se faz necessária.

Quanto à estimativas de equivalência energética com outras fontes, em vista da substituição de alguma pelo biogás, alguns autores publicaram dados a respeito do assunto, conforme a Tabela 4, a seguir:

Tabela 4 – Equivalência energética do biogás em comparação a outras fontes de acordo com diferentes autores.

Fonte energética	FERRAZ & MARIEL (1980)	SGANZERLA (1983)	NOGUEIRA (1986)	SANTOS (2000)
Gasolina (L)	0,61	0,61	0,61	0,60
Querosene (L)	0,58	0,58	0,62	-
Diesel (L)	0,55	0,55	0,55	0,60
GLP (kg)	0,45	0,45	1,43	-
Álcool (L)	-	0,79	0,80	-
Carvão mineral (kg)	-	0,74	0,74	-
Lenha (kg)	-	1,54	3,50	1,6
Eletricidade (kWh)	1,43	1,43	-	6,5

Fonte: adaptado de COLDEBELLA, 2006.

3.7.2 Sistemas de cogeração de energia elétrica

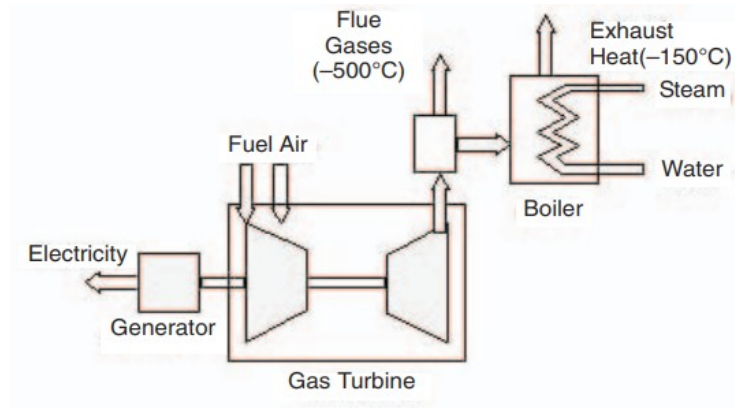
Os sistemas de cogeração tem sido aprimorados ao longo dos anos e as tecnologias mais empregadas são: turbinas a gás e sistemas de combustão interna (ÍNDIA, 2019; LOPES, 2015).

3.7.2.1 Turbinas a gás

Os sistemas de cogeração por turbinas a gás seguem o princípio do ciclo de Brayton, no qual o ar atmosférico é comprimido, aquecido e expandido, produzindo maior potência que é consumida pelo compressor ao comprimir e aquecer o ar (ÍNDIA, 2019).

Em termos quantitativos, a capacidade das turbinas a gás podem chegar até 100 MW, e para que isto aconteça, alguns gases podem ser utilizados: gás natural, óleo diesel, produtos da gaseificação do carvão, etc. Em comparação com as turbinas a vapor, as turbinas a gás são mais flexíveis, permitindo seu uso para conversões em energia térmica e elétrica (ÍNDIA, 2019). A Figura 3, a seguir, contém uma ilustração do sistema de cogeração a gás:

Figura 3 – Sistema de cogeração a gás.



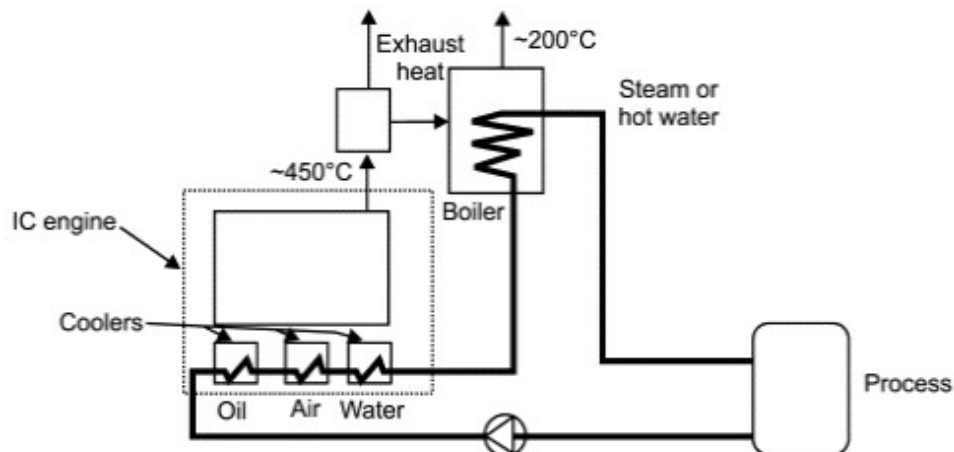
Fonte: ÍNDIA, 2019.

3.7.2.2 Sistemas de combustão interna

Os sistemas de combustão interna podem ser combinados com uma caldeira que libera calor para uma turbina a vapor para gerar calor e eletricidade. O calor originado dos sistemas de combustão interna podem ser recuperados por 4 fontes: gases de exaustão, água proveniente de jaquetas de resfriamento, óleo lubrificante para resfriamento e turbocompressores para resfriamento (ÍNDIA, 2019).

Sob o ponto de vista da eficiência, os sistemas de combustão interna podem obter eficiências de 80 a 90%, e suas capacidades abrangem um grande span, que parte desde poucos kW até a escala MW. A Figura 4, a seguir, contém uma ilustração do sistema de combustão interna:

Figura 4 – Sistemas de combustão interna.



Fonte: ÍNDIA, 2019.

Em síntese, segue o Quadro 6, que contém as vantagens e desvantagens dos sistemas de cogeração:

Quadro 6 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de cogeração.

Sistema de Cogeração	Vantagens	Desvantagens
Turbinas a gás	<ul style="list-style-type: none"> • Boa eficiência do combustível; • Relativamente baixo custo por unidade de geração elétrica; • Baixo período de gestação; • Baixas emissões; • Alta flexibilidade na operação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo do combustível; • Baixa eficiência com baixa alimentação; • Operação mais longa; • Alto custo de manutenção.
Combustão interna	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo de construção civil; • Alta eficiência elétrica; • Custo mais baixo de equipamento quando desligado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência do sistema como um todo; • Temperaturas mais baixas do vapor; • Alto custo de manutenção.

Fonte: adaptado de ÍNDIA, 2019.

3.8 MÉTRICAS ECONÔMICAS PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE DE PROJETOS

3.8.1 Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido representa as movimentações do fluxo de caixa ao longo de um projeto de investimento trazidas para a data zero. É realizada a soma dos valores líquidos em um número especificado de períodos do projeto trazidos para a data zero, descontados a uma mesma taxa de juros, chamada de Taxa Mínima de Atratividade (TMA), também denotada “taxa de desconto”. Para a tomada de decisão do investidor, considera-se: $VPL > 0$, aceita-se o projeto; $VPL < 0$, rejeita-se o projeto; $VPL = 0$, o projeto é indiferente a uma alternativa (FRANCO; GALLI, 2007; URTADO *et al.*, 2009).

3.8.2 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno é a taxa que ocasiona um VPL igual a 0, em outras palavras, é a taxa que torna o valor atual das entradas líquidas de caixa igual ao

investimento do início do projeto. O critério utilizado na tomada de decisão é a comparação com a Taxa Mínima de Atratividade: se $TIR > TMA$, o investimento é atrativo economicamente; se $TIR < TMA$, o investimento não é atrativo; se $TIR = TMA$, o investimento é indiferente (FRANCO; GALLI, 2007; SOLARVIEW, 2021).

3.8.3 Payback

O *Payback* é o número de períodos (dados em meses, anos, etc.) em que o fluxo de caixa acumulado seja positivo, ou seja, é o tempo em que há o retorno do investimento inicial do projeto. O critério para utilização do *Payback* depende diretamente do investidor: se o *Payback* for maior que o período estabelecido pelo investidor, o investimento não torna-se atrativo; se menor, é atrativo; se igual, o investimento é indiferente (SOLARVIEW, 2021).

Quadro 7 – Quantidade de RSU gerados em cada rota dos bairros da região de interesse do estudo.

Rota	Bairros	Pesagem média mensal (ton)
121	Itaipu C e Lot. Bela Vista I e II.	255,92
122	Jd. Ipê I, II e III, Jd. Norma, Jd. Jasmim, Cidade Nova I e II e Lot. Universitário.	254,24
123	Jd. Itaipu, Jd. Florença, Jd. Califórnia, Porto Belo, Jd. Olívia, Jd. Marisa e Lot. Budel.	258,16

Fonte: FOZ DO IGUAÇU, 2019.

As rotas mencionadas fazem parte do Setor 7, setor este que envolve ao todo 8 rotas. Adentrando no assunto a respeito dos resíduos orgânicos, a porcentagem média de orgânicos dentre os resíduos sólidos urbanos para o Setor 7 é de 45,46%, conforme Foz do Iguaçu (2019).

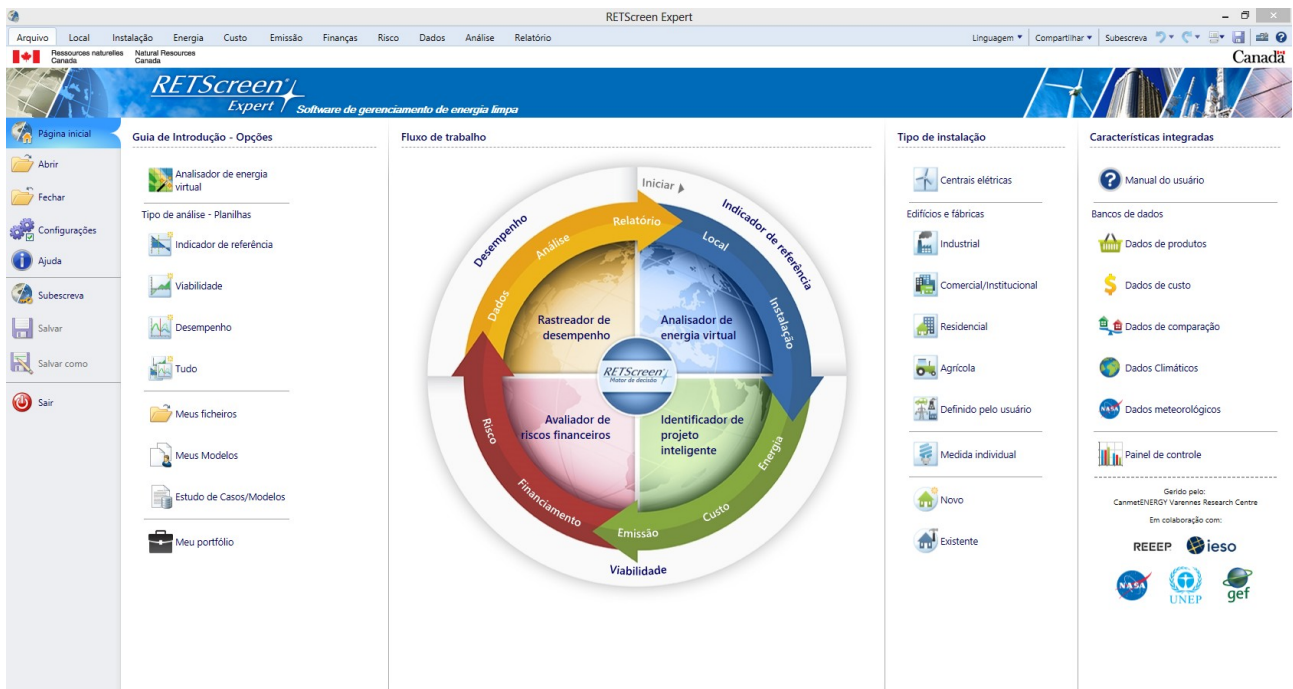
Com os dados descritos no Quadro 7, foi possível obter alguns importantes resultados da quantidade gerada de resíduos sólidos urbanos nas 3 rotas. O total mensal gerado foi de 768,32 ton/mês, que permite inferir que foram gerados 25,61 ton/dia. Ao tomar a porcentagem de 45,46% citada no parágrafo anterior, tem-se 11,64 ton/dia de resíduos orgânicos.

Uma das considerações deste estudo foi que a produção de biogás com a alimentação de resíduos orgânicos ao digestor anaeróbio ocorreu durante 335 dias por ano. Sendo assim, ao longo desse período de tempo, determinou-se a quantidade de 3.899,4 ton/ano de resíduos orgânicos gerados na Região da Vila C para aplicação em um digestor anaeróbio.

4.2 SOFTWARE RETSCREEN EXPERT

O software *RETScreen Expert* (2016), é a mais recente versão do original “*RETScreen*” criado em 1998 pelo governo do Canadá com o intuito de facilitar cálculos de viabilidade técnica e econômica de projetos que envolvem o conceito de “energia limpa” (RETSCREEN, 2021). A Figura 6, a seguir, contém uma ilustração da tela inicial do software:

Figura 6 – Tela inicial do software *RETScreen Expert*.



Fonte: o autor, 2022.

O software permite verificar a viabilidade de projetos na forma de usinas, indústrias, estruturas comerciais, residências, estruturas agrícolas, entre outros. A análise econômica (incluindo VPL, TIR e *Payback*) é realizada de forma automática à medida que o usuário insere os custos relacionados à instalação. Também são fornecidos dados de emissão na forma de créditos de carbono para inserção na análise. Uma ferramenta fundamental do software é a análise de sensibilidade e risco do projeto, ideal para identificar seus limites.

Todas as funcionalidades citadas estão presentes na versão gratuita do software, porém caso o usuário desejar salvar o seu projeto para acessá-lo posteriormente, é necessária a contratação da versão *premium*.

4.3 PARÂMETROS ESTABELECIDOS PARA O ESTUDO

A seguir, encontram-se descritas as considerações para as etapas posteriores deste trabalho:

- Para estimar o potencial de produção de biogás, foi considerado que toda a fração orgânica provém de resíduos alimentares;

- Foram considerados 335 dias por ano de produção de biogás, sendo os outros 30 dias destinados à manutenção do sistema;
- Foi considerado que o resíduo encontra-se nos padrões estabelecidos pelas normas vigentes para as seguintes análises físico-químicas: pH, alcalinidade total, demanda química de oxigênio (DQO), ácidos graxos, nitrogênio amoniacal e nitrogênio total;
- Foi proposto um pré-tratamento aos resíduos em um separador de sólidos a fim de remoção dos sólidos fixos (será considerado como valor zero ao final). É importante mencionar que a utilização de um separador é adequada quando a concentração de sólidos é alta, devido à possibilidade de acúmulo no biodigestor e criação de zonas mortas (DURANTI, 2022). Mesmo não sendo o caso deste trabalho, para que seja simulada uma situação da vida prática, foi proposto o pré-tratamento. Portanto, houve permanência somente dos sólidos voláteis como sólidos totais, cuja porcentagem final será considerada 15%. Esta porcentagem é atingida pela diluição dos resíduos alimentares com água;
- O modelo de digestor anaeróbico escolhido foi o CSTR, pois são mais adequados quando o teor de sólidos totais está em torno de 15%, segundo Rocha (2016);
- Foi considerado um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 30 dias, conforme Paixão (2018);
- Foi considerada a temperatura de 35 °C para os resíduos alimentares e 25 °C para a água;
- Por utilização de um fator de segurança de 10%, o valor real do digestor dimensionado teve o acréscimo desta porcentagem;
- A caracterização do resíduo, do biogás, bem como os custos, ganhos e economias, além dos cálculos de viabilidade econômica de um projeto (Valor Presente Líquido, *Payback* e Taxa Interna de Retorno) foram realizados no software *RETScreen Expert*.

4.4 DIMENSIONAMENTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO

A metodologia para dimensionamento do digestor foi adaptada pela utilizada por Paixão (2018), conforme descrição a seguir:

- Cálculo da porcentagem de sólidos voláteis nos resíduos alimentares, conforme a equação 1:

$$SV_{\text{perc}} = ST_{\text{perc}} * SV_{\text{ST}} \quad (1)$$

Onde:

SV_{perc} : porcentagem de sólidos voláteis nos resíduos alimentares;

ST_{perc} : porcentagem de sólidos totais nos resíduos alimentares, conforme a base de dados do software *RETScreen Expert*;

SV_{ST} : porcentagem de sólidos voláteis em relação à quantidade de sólidos totais, conforme a base de dados do software *RETScreen Expert*.

- Cálculo da quantidade diária de sólidos voláteis adicionada ao digestor anaeróbio, conforme a equação 2:

$$SV_{\text{diário}} = P_d * SV_{\text{perc}} \quad (2)$$

Onde:

$SV_{\text{diário}}$: quantidade diária de sólidos voláteis adicionados ao digestor anaeróbio, expressa em kg/dia;

P_d : produção diária de resíduos alimentares adicionados ao digestor anaeróbio, expressa em kg/dia;

SV_{perc} : resultado do cálculo realizado na equação 1.

- Cálculo da massa total diária a ser adicionada ao digestor anaeróbio, conforme a equação 3:

$$M_t = \frac{SV_{\text{diário}}}{ST_f} \quad (3)$$

Onde:

M_t : massa total diária a ser adicionada ao digestor anaeróbio, expressa em kg/dia;

$SV_{\text{diário}}$: resultado do cálculo realizado na equação 2;

ST_f : porcentagem final de sólidos totais, atribuindo o valor de 15%, conforme descrito no item "Considerações do estudo".

- Cálculo do volume diário de água a ser adicionado ao digestor anaeróbio, conforme a equação 4:

$$V_{\text{água}} = \frac{(M_t - P_d)}{\rho_{\text{água}}} \quad (4)$$

Onde:

M_t : resultado do cálculo realizado na equação 3;

P_d : produção diária de resíduos alimentares adicionados ao digestor anaeróbio, expressa em kg/dia;

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água a 25 °C.

- Cálculo do volume do digestor anaeróbio, conforme a equação 5:

$$V_{\text{digestor}} = \left(\left(\frac{P_d}{\rho_{\text{resíduo}}} \right) + V_{\text{água}} \right) * TDH * 1,10 \quad (5)$$

Onde:

V_{digestor} : volume do digestor anaeróbio, em m³;

P_d : produção diária de resíduos alimentares adicionados ao digestor anaeróbio, expressa em kg/dia;

$\rho_{\text{resíduo}}$: massa específica do resíduo a 25 °C;

$V_{\text{água}}$: resultado do cálculo realizado na equação 4;

TDH: tempo de detenção hidráulica, em dias;

Obs: O valor 1,10 representa o acréscimo de 10% do valor dimensionado, conforme descrito no item “Considerações do estudo”.

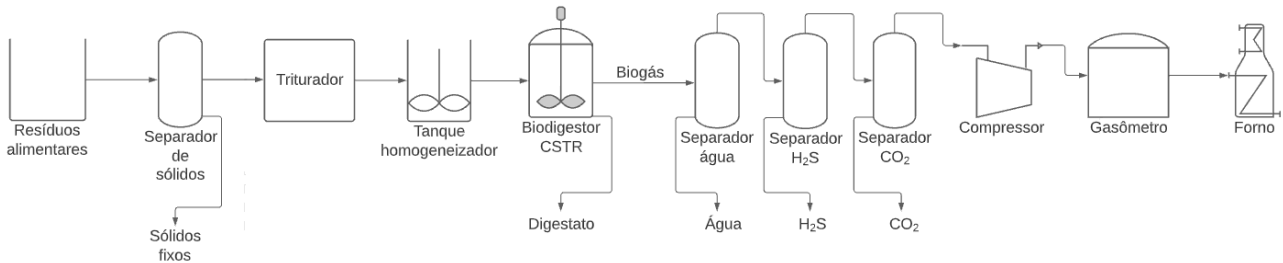
4.5 CENÁRIOS PARA A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS ORIUNDO DE RESÍDUOS ALIMENTARES DA REGIÃO DA VILA C

4.5.1 Cenário 1

O Cenário 1 contempla a utilização de 100% do biogás para conversão em energia térmica, especificamente para substituição do gás GLP contido em botijões, comumente utilizado para cocção de alimentos. Foram verificadas as possíveis

economias ao realizar esta substituição. A Figura 7 a seguir, contém uma ilustração deste cenário:

Figura 7 – Ilustração do Cenário 1.

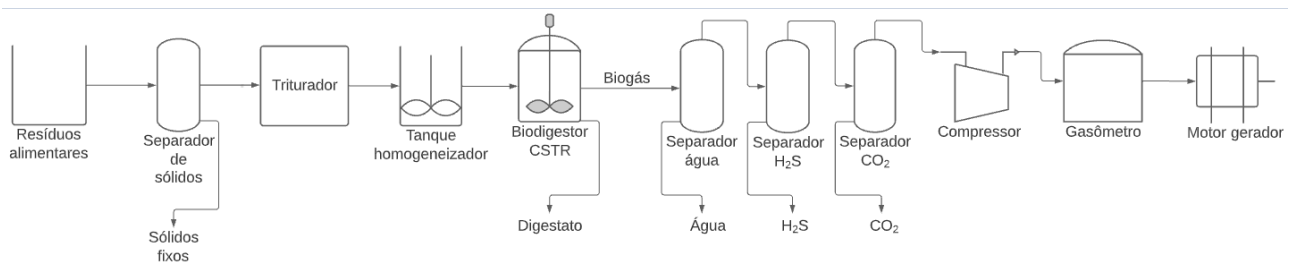


Fonte: o autor, 2022.

4.5.2 Cenário 2

O Cenário 2 contempla a utilização de 100% do biogás para conversão em energia elétrica. Foram calculados os ganhos com a comercialização da energia e descontado o valor que deixaria de ser ganhado por utilização para manutenção da própria planta. A Figura 8 a seguir, contém uma ilustração deste cenário:

Figura 8 - Ilustração do Cenário 2.



Fonte: o autor, 2022.

4.6 MODELAGEM DOS CENÁRIOS NO SOFTWARE RETSCREEN EXPERT

4.6.1 Dados climáticos, caracterização do biogás, custos e parâmetros financeiros presentes nos dois cenários

O Quadro 8 a seguir contém os dados presentes simultaneamente nos dois cenários, sob a forma de inserção no *RETScreen Expert*:

Quadro 8 – Dados inseridos no *RETSscreen Expert* para os dois cenários (continua).

Dados climáticos		
Parâmetro	Valor	Referência
Localização dos dados climáticos	Brasil - Paraná - Foz Do Iguacu Arpt	Definido pelo autor.
Localização das instalações	Brazil - Paraná - Foz do Iguacu	Definido pelo autor.
Caracterização do biogás		
Parâmetro	Valor	Referência
Unidade	Resíduos do restaurante	Definido pelo autor. Corresponde ao resíduo selecionado na base de dados do <i>RETSscreen Expert</i> que contém maior similaridade aos resíduos alimentares.
Peso médio por unidade	1.000 kg	Valor para representar as toneladas de resíduos.
Quantidade	3.899,4	Quantidade gerada anualmente de resíduos orgânicos alimentares.
Matéria seca	23,0%	Valor padrão para teor de sólidos totais, utilizado no <i>RETSscreen Expert</i> ao resíduo selecionado.
Matéria seca – sólidos voláteis	89,0%	Valor padrão para teor de sólidos voláteis em relação aos sólidos totais, utilizado no <i>RETSscreen Expert</i> ao resíduo selecionado.
Fator de produção do biogás	0,35 m ³ /kg	Valor padrão para quantidade de biogás produzido por quilograma de resíduo, utilizado no <i>RETSscreen Expert</i> ao resíduo selecionado.
Produção de biogás anual	279.373 m ³	Quantidade de biogás produzido. Cálculo realizado automaticamente pelo software.
Conteúdo de Metano (volume)	53%	Valor padrão da porcentagem de metano (volume), utilizado no <i>RETSscreen Expert</i> ao resíduo selecionado.
Temperatura	35 °C	Definido pelo autor.
Metano (item Análise final)	95%	O biogás como biometano possui entre 95-99% de metano em volume (AWE <i>et al.</i> , 2017). Foi escolhida a forma de biometano na modelagem pois aumenta o poder calorífico do biogás, gera economias no consumo de motogeradores e para prever economias pela menor probabilidade de danos à estrutura de armazenamento.

Fonte: o autor, 2022.

Quadro 8 – Dados inseridos no *RETScreen Expert* para os dois cenários (continua).

Dióxido de carbono (item Análise final)	1,9%	O biogás tratado possui entre 1-5% de dióxido de carbono em volume (AWE <i>et al.</i> , 2017). Foi definido pelo autor o valor de 1,9% pois a porcentagem recomendada para aproveitamento energético como biometano deve ser menor que 2% (KUNZ <i>et al.</i> , 2019).
Sulfeto de hidrogênio (item Análise final)	0,1%	Definido pelo autor.
Hidrogênio (item Análise final)	1,5%	Definido pelo autor.
Nitrogênio (item Análise final)	1,5%	Definido pelo autor.
Custos iniciais		
Parâmetro	Valor	Referência
Licenças e aprovações	R\$ 244.120,00	Valor aproximado para 2.000 UPF/PR, segundo orientações do Instituto Água e Terra (PARANÁ, 2010) para empreendimentos de pequeno porte. O valor do UPF/PR em Fev/22 corresponde a R\$ 122,06 (PARANÁ, 2022).
Outorga de recursos hídricos	R\$ 1.367,07	Valor correspondente a 11,2 UPF/PR em Fev/22. 5,6 UPF/PR correspondem à “Outorga Prévia” e 5,6 UPF/PR correspondem à “Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos (incl. Renovação)” (PARANÁ, 2022).
Separador de sólidos	R\$ 27.000,00	MFRural (2022).
Triturador	R\$ 58.177,88	Passaglia <i>et al.</i> (2019). Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Tanque homogeneizador	R\$ 23.271,15	Passaglia <i>et al.</i> (2019). Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Gasômetro	R\$ 11.635,58	Passaglia <i>et al.</i> (2019). Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Digestor anaeróbio 1.100 m ³	R\$ 291.500,00	Teenwin (2022). Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Compressor	R\$ 24.869,19	Santos <i>et al.</i> (2014). Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Custos fixos anuais		
Tratamento biogás - água	R\$ 7.263,70	Santos <i>et al.</i> (2014). Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Tratamento biogás – H ₂ S	R\$ 7.263,70	Santos <i>et al.</i> (2014) Demonstração do cálculo no Apêndice A.

Fonte: o autor, 2022.

Quadro 8 – Dados inseridos no *RETScreen Expert* para os dois cenários (fim).

Tratamento biogás - CO ₂	R\$ 7.263,70	Santos <i>et al.</i> (2014). Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Gastos pelo uso da água	R\$ 8.088,09	Baseado na tarifa de R\$ 5,6675/m ³ , regulamentado por Paraná (2021). Demonstração do cálculo no Apêndice A..
Análises laboratoriais (efluente e afluente)	R\$ 2.792,52	Passaglia <i>et al.</i> (2019). Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Parâmetros financeiros		
Taxa de inflação	4,40%	Foi selecionada a previsão pessimista para o IPCA no período 2023-2030 (BRASIL, 2021).
Taxa de desconto (TMA)	9,51%	Oliveira (2019).
Vida do projeto	20 anos	Valor padrão no <i>RETScreen Expert</i> .
Razão da dívida	70%	Scanella (2012).
Taxa de juros da dívida	7,2%	Oliveira (2019).
Duração da dívida	18 anos	Oliveira (2019).
Custo efetivo – imposto de renda	15%	Brasil (2020).

Fonte: o autor, 2022.

4.6.2 Parâmetros específicos para o Cenário 1

O Quadro 9 a seguir contém os dados específicos presentes no Cenário 1, sob a forma de inserção no *RETScreen Expert*:

Quadro 9 – Dados específicos presentes no Cenário 1 (continua).

Parâmetro	Valor	Referência
Tipo de instalação	Usina	Definido pelo autor.
Tipo de combustível	Biogás	Definido pelo autor.
Preço do combustível	R\$ 0,30/m ³	Valor para abarcar outras despesas não mensuradas no trabalho, como: custo de mão-de-obra, transporte, tubulações, bombeamento, manutenções e projetos para funcionamento da planta. Definido pelo autor.
Tipo de eletricidade	Preço eletricidade exportada - anual	Definido pelo autor.

Fonte: o autor, 2022.

Quadro 9 – Dados específicos presentes no Cenário 1 (fim).

Preço da eletricidade exportada	R\$ 0,00/MWh	O Cenário 1 não contempla conversão em energia elétrica. Portanto, não há receitas oriundas da comercialização de eletricidade exportada.
Custos fixos anuais		
Gastos com energia elétrica para manutenção da planta	R\$ 75.266,68	Cecchi <i>et al.</i> (2011) e ANEEL (2021). Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Gastos para obtenção do biogás	R\$ 83.811,90	Produto do preço do combustível (R\$ 0,30/m ³) pela produção de biogás anual antes do tratamento (279.373 m ³).
Economias anuais		
Economias com gás GLP	R\$ 539.515,00	Foi utilizado o preço médio de R\$ 100,00 para aquisição de um botijão de gás GLP, conforme Luna (2021). Demonstração do cálculo no Apêndice A.

Fonte: o autor, 2022.

4.6.3 Parâmetros específicos para o Cenário 2

O Quadro 10 a seguir contém os dados específicos presentes no Cenário 2, sob a forma de inserção no *RETScreen Expert*:

Quadro 10 - Dados específicos presentes no Cenário 2 (continua).

Parâmetro	Valor	Referência
Tipo de instalação	Usina	Definido pelo autor.
Tipo	Motor recíproco	Definido pelo autor.
Tipo de combustível	Biogás	Definido pelo autor.
Preço do combustível	R\$ 0,30/m ³	Valor para abarcar outras despesas não mensuradas no trabalho, como: custo de mão-de-obra, transporte, tubulações, bombeamento, manutenções e projetos para funcionamento da planta. Definido pelo autor.
Parâmetros do motor a gás gerador de eletricidade		
Tipo de eletricidade	Preço eletricidade exportada - anual	Definido pelo autor.
Preço da eletricidade exportada	R\$ 639/MWh	Valor baseado no leilão de energia A-5, ocorrido em 2021. (CAVALCANTE, 2021).
Disponibilidade	8.040 h	Número de horas equivalentes a 335 dias, tempo anual de produção de biogás.

Fonte: o autor, 2022.

Quadro 10 - Dados específicos presentes no Cenário 2 (fim).

<i>Heat rate</i> (preço do calor)	10.000 kJ/kWh	Lopes (2015).
Combustível necessário	166 kW	Valor calculado automaticamente pelo <i>RETScreen Expert</i> .
Custos iniciais (aquisição do motor)	R\$ 96.000	Foi utilizada a relação R\$ 1.600/kW de potência instalada, conforme Lopes (2015).
Custo de O&M (operação e manutenções)	0	Este valor foi definido como 0 (zero) pois já está contemplado no parâmetro “Preço do combustível”.
Consumo de combustível	155.861 m ³	Quantidade de biogás disponível após tratamento para obter um produto com 95% de metano. Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Custos fixos anuais		
Energia elétrica não vendida utilizada para manutenção da planta	R\$ 57.309,48	Cecchi <i>et al.</i> (2011). Demonstração do cálculo no Apêndice A.
Gastos para obtenção do biogás	R\$ 83.811,90	Produto do preço do combustível (R\$ 0,30/m ³) pela produção de biogás anual antes do tratamento (279.373 m ³).
Ganhos anuais		
Comercialização da eletricidade	R\$ 307.020,33	Demonstração do cálculo no Apêndice A.

Fonte: o autor, 2022.

4.7 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS CENÁRIOS

4.7.1 Cenário 1

O cálculo do potencial energético do Cenário 1 foi realizado conforme a equação 6:

$$E_{\text{term}} = Q_{\text{biogás}} * PCI_{\text{biogás}} \quad (6)$$

Onde:

E_{term} : energia térmica do biogás gerado com 95% de metano, em Mcal/ano;

$Q_{\text{biogás}}$: vazão anual de biogás, em m³/ano;

$PCI_{\text{biogás}}$: poder calorífico inferior do biogás, calculado automaticamente pelo *RETScreen Expert*. A unidade de medida padrão do software é MJ/m³, e foi utilizada a

conversão 1 MJ = 0,23885 Mcal.

4.7.2 Cenário 2

O potencial energético do Cenário 2 foi calculado de forma automática pelo software *RETScreen Expert*.

4.8 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DOS CENÁRIOS

Os dois cenários foram analisados quanto à viabilidade econômica utilizando as métricas mencionadas na seção 3.7 (Obs: para a TIR, foi considerada após impostos referente ao capital, que é de fato o interesse de um investidor; para o *Payback*, foi considerado o retorno simples), além da verificação do fluxo de caixa acumulado ao longo dos 20 anos de projeto.

4.9 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS CENÁRIOS

Para cada cenário, foram analisados dois parâmetros que influenciam diretamente em seus custos, com verificação dos valores limites que tornam o projeto viável. A seguir, encontram-se descritos os parâmetros para cada cenário:

4.9.1 Cenário 1

Para o Cenário 1, foram simulados o preço do combustível e o preço de aquisição do botijão de gás GLP, e comparados os valores pelas métricas mencionadas na seção 3.7.

As simulações do preço do combustível serão com os valores R\$ 0,10; R\$ 0,30 (valor utilizado na modelagem deste trabalho, vide Quadro 9); R\$ 0,50; R\$ 0,70 e R\$ 1,00/m³. Também foi incluída na análise o valor limite do preço do combustível que viabiliza o projeto.

As simulações do preço de aquisição do botijão de gás GLP serão com os valores R\$ 70,00; R\$ 85,00; R\$ 100,00 (valor utilizado na modelagem deste trabalho, vide Quadro 9); R\$ 115,00 e R\$ 130,00. Também foi incluída na análise o valor limite do preço de aquisição do botijão de gás GLP que viabiliza o projeto.

4.9.2 Cenário 2

Para o Cenário 2, foram simulados a taxa de inflação e o preço da eletricidade exportada, e comparados os valores pelas métricas mencionadas na seção 3.7.

As simulações da taxa de inflação foram baseadas nos valores da inflação acumulada para cada ano do presente século, ou seja, no recorte de 2001 a 2021, conforme Rico (2022). Foram simulados os valores: 2,95% (a menor inflação acumulada do recorte, ano 2017); 4,40% (valor utilizado neste trabalho, vide Quadro 8); 6,37% (média da inflação do recorte); 10,06% (inflação acumulada no ano de 2021, (IBGE, 2022)) e 12,53% (a maior inflação acumulada do recorte, ano 2002). Também foi incluída na análise o valor limite da taxa de inflação que viabiliza o projeto.

As simulações do preço da eletricidade exportada foram com os valores R\$ 479,25 (25% abaixo do valor escolhido para este trabalho); R\$ 559,13 (12,5% abaixo do valor escolhido); R\$ 639,00 (valor escolhido na modelagem deste trabalho, vide Quadro 10); R\$ 718,88 (12,5% acima do valor escolhido) e R\$ 798,75/MWh (25% acima do valor escolhido). Também foi incluída na análise o valor limite do preço da eletricidade exportada que viabiliza o projeto.

4.10 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTES SÓLIDOS E LÍQUIDOS

A estimativa será realizada ao utilizar as relações de Ma *et al.* (2020), conforme descrito no item “3.4.9 Digestato”.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DIMENSIONAMENTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO

Os resultados do cálculo de dimensionamento do digestor anaeróbio encontram-se descritos na Tabela 5, a seguir, e o procedimento de cálculo no Apêndice A.

Tabela 5 – Resultados do cálculo de dimensionamento do digestor anaeróbio.

Variável	Valor
SV_{perc}	20,47%
$SV_{diário}$	2.382,71 kg/dia
M_t	15.888,73 kg/dia
$V_{água}$	4,26 m ³ /dia
$V_{digestor}$	1.033,88 m ³

Fonte: o autor, 2022.

5.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS CENÁRIOS

5.2.1 Cenário 1

O potencial energético do Cenário 1 foi calculado pela utilização da equação 6. A vazão anual de biogás pós-tratamento é de 155.861 m³ (vide Quadro 10) e o número de dias de operação da planta para produção de biogás é de 335 dias. O poder calorífico inferior do biogás disponibilizado pelo software, dada a composição pós-tratamento (vide Quadro 8) é de 30,7 MJ/m³, que equivale a 7,33270 Mcal/m³. Portanto:

$$E_{term} = Q_{biogás} * PCI_{biogás} \quad (6)$$

$$E_{term} = 155.861 \text{ m}^3/\text{ano} * 7,33270 \text{ Mcal/m}^3 = 1.142.881,95 \text{ Mcal/ano}$$

Para estimar as economias na aquisição de gás GLP pela substituição por biogás, foi utilizada a relação baseada em Sganzerla (1983), onde 1 m³ de biogás equivale a 0,45 kg de GLP (Tabela 4). Sendo assim, 155.861 m³ de biogás equivalem a 70.137 kg de GLP.

Sabendo-se que um botijão contém em torno de 13 kg de GLP, é possível estabelecer a equivalência energética desta quantidade de biogás a 5.395,15 botijões.

Segundo Luna (2021), o preço médio de um botijão no Brasil ultrapassou R\$ 100,00, e este valor será usado para verificação das economias. Finalmente, tem-se uma economia anual de R\$ 539.515,00 pela substituição pelo biogás gerado.

5.2.2 Cenário 2

O potencial energético do Cenário 2 foi calculado automaticamente pelo software *RETScreen Expert*, cujo valor é de 480.470 kWh/ano, ou 1.434,24 kWh/dia. O consumo anual da planta foi estimado em 89.686,2 kWh (demonstração do cálculo no Apêndice A), o que permite determinar que 390.783,8 kWh foram disponibilizados para comercialização anual.

5.3 ANÁLISE ECONÔMICA DOS CENÁRIOS

Os cenários foram analisados pelo VPL, TIR e *Payback*. A Tabela 6 a seguir, contém os resultados de cada cenário, segundo o software *RETScreen Expert*.

Tabela 6 – Viabilidade financeira dos cenários.

Cenário	VPL	TIR	Payback
Cenário 1	R\$ 3.178.029	137%	2 anos
Cenário 2	R\$ 378.109	35%	3,6 anos

Fonte: o autor, 2022.

5.3.1 VPL

O Cenário 1 apresentou um VPL de R\$ 3.178.029, enquanto para o Cenário 2 foi obtido o valor R\$ 378.109. Pelos valores serem maiores que zero, os dois cenários poderiam ser aceitos por um investidor, porém a preferência seria pelo Cenário 1 por ter um VPL maior.

5.3.2 TIR

Quanto à TIR, faz-se necessária a lembrança da TMA ou Taxa de desconto, que foi escolhido o valor 9,51% neste trabalho. O Cenário 1 apresentou uma TIR de 137% após impostos do capital, enquanto para o Cenário 2 obteve-se o valor de

35%. Como os dois valores são acima da TMA, os dois cenários também são atraentes pela TIR, novamente com preferência pelo Cenário 1 por ter um maior valor.

Coutinho (2018) destaca que um projeto que possui uma TIR muito maior que de outro, contém melhores chances de crescimento. Portanto, reafirma-se a preferência pelo Cenário 1.

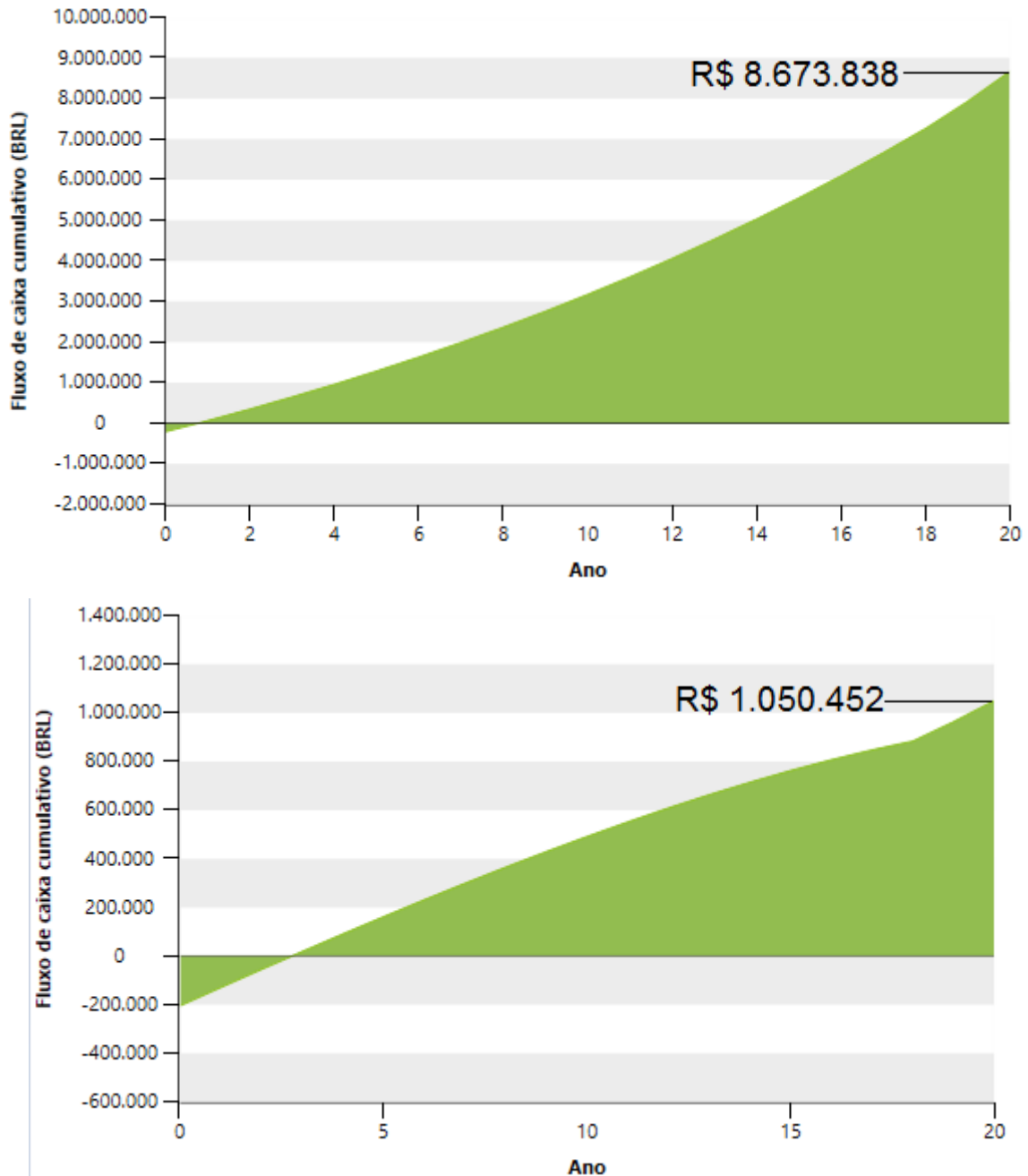
5.3.3 Payback

Quanto ao *Payback*, é importante salientar que trata-se de um parâmetro dependente da particularidade de cada investidor, porém dar-se-á preferência ao cenário de menor valor. O Cenário 1 obteve um *payback* de 2 anos, enquanto para o Cenário 2 foi obtido o valor 3,6 anos. Mais uma vez, o Cenário 1 apresenta-se mais favorável a um investimento.

5.3.4 Fluxos de caixa acumulados

Também foram obtidos os fluxos de caixa acumulados em cada cenário até os 20 anos de projeto, tempo de vida escolhido neste trabalho. A Figura 9 a seguir contém os gráficos dos fluxos de caixa:

Figura 9 – Fluxos de caixa acumulados para os cenários (Cenário 1, acima; Cenário 2, abaixo).



Fonte: o autor, 2022.

O valor acumulado após 20 anos no Cenário 1 foi cerca de 8 vezes o acumulado no Cenário 2. Isto significou que as economias geradas pela substituição dos botijões de gás GLP pelo biogás superaram e muito os gastos envolvidos para manutenção da planta (recorda-se que neste cenário há pagamento da energia elétrica), obtenção do biogás e fatores econômicos como a taxa de inflação e o imposto de renda.

Em contrapartida, este efeito ocorreu com menor intensidade no Cenário 2, devido à utilização de parte da energia gerada para manutenção da planta e que portanto deixa de ser comercializada. Embora seja uma economia, não possuiu o mesmo impacto que as economias geradas no Cenário 1, gerando menor lucratividade.

Portanto, pelos parâmetros econômicos anteriores e pela análise do fluxo de caixa, a substituição dos botijões de gás GLP pelo biogás referentes ao Cenário 1 mostraram-se mais viáveis a um investimento do que a conversão em energia elétrica proposta no Cenário 2. Porém, as duas formas de aplicação são lucrativas e interessantes para o tratamento de resíduos orgânicos alimentares.

5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS CENÁRIOS

5.4.1 Cenário 1

Para o Cenário 1, foi escolhido o preço do combustível e o preço médio do botijão GLP como parâmetros para análise da sensibilidade. Faz-se necessária a recordação de que o preço do combustível refere-se ao valor para abarcar outras despesas não mensuradas no trabalho e que são necessárias para obtenção do biogás. A Tabela 7 contém os resultados referentes à sensibilidade do Cenário 1. Obs: o teste padrão deste trabalho está grifado em negrito e o valor limite em vermelho. Este procedimento será o mesmo para as tabelas subsequentes desta seção.

Tabela 7 – Análise de sensibilidade do Cenário 1 (continua).

Preço do combustível			
Preço	VPL	TIR	Payback
R\$ 0,10/m ³	R\$ 3.773.801	161%	0,64 ano
R\$ 0,30/m³	R\$ 3.178.029	137%	0,76 ano
R\$ 0,50/m ³	R\$ 2.579.408	113%	0,93 ano
R\$ 0,70/m ³	R\$ 1.982.212	89%	1,2 anos
R\$ 1,00/m ³	R\$ 1.086.417	53,1%	2 anos
R\$ 1,36/m³	R\$ 4.489	9,7%	11,5 anos
Preço médio do botijão GLP			
Valor	VPL	TIR	Payback
R\$ 45,05	R\$ 829	9,6%	11,7 anos

Fonte: o autor, 2022.

Tabela 7 – Análise de sensibilidade do Cenário 1 (fim).

R\$ 70,00	R\$ 1.446.679	67,5%	1,6 anos
R\$ 85,00	R\$ 2.311.642	102%	1 ano
R\$ 100,00	R\$ 3.178.029	137%	0,76 ano
R\$ 115,00	R\$ 4.041.568	172%	0,6 ano
R\$ 130,00	R\$ 4.906.531	207%	0,49 ano

Fonte: o autor, 2022.

O preço do combustível possui como valor limite R\$ 1,36/m³, o que significa que qualquer valor acima deste, em média, ao longo do projeto, faz com que a TIR seja menor que a TMA (9,51%) e o VPL torne-se negativo, inviabilizando o interesse do investidor. No contexto prático, tomando como referência os 279.373 m³ gerados anualmente de biogás, tem-se um gasto limite de R\$ 379.947,28 com insumos para obtenção do biogás.

A respeito do preço médio do botijão de gás GLP, o valor limite é de R\$ 45,05. Qualquer valor menor do que este inviabilizaria a substituição do gás GLP pelo biogás, pois tornaria a TIR menor que a TMA e um VPL negativo. Porém, segundo Nunes (2021) a alta de preços deve continuar no futuro dada a conjuntura do petróleo em alta e o dólar em disparada no Brasil, reforçando o interesse pelo Cenário 1.

5.4.2 Cenário 2

Para o Cenário 2, foram analisadas a taxa de inflação e o preço da eletricidade exportada. A Tabela 8 contém os resultados referentes à sensibilidade do Cenário 2:

Tabela 8 - Análise de sensibilidade do Cenário 2 (continua).

Taxa de inflação			
Taxa	VPL	TIR	Payback
2,95%	R\$ 534.278	38,4%	2,6 anos
4,40%	R\$ 378.109	35%	2,8 anos
6,37%	R\$ 114.420	-3,7%	2,9 anos
7,07%	R\$ 322	9,5%	3 anos
10,06%	- R\$ 636.631	Negativa	3,5 anos
12,53%	- R\$ 1.371.954	Negativa	Não alcançável

Fonte: o autor, 2022.

Tabela 8 - Análise de sensibilidade do Cenário 2 (fim).

Preço da eletricidade exportada			
Valor	VPL	TIR	Payback
R\$ 479,25/MWh	- R\$ 144.294	Negativo	Não alcançável
R\$ 523,50/MWh	R\$ 46,74	9,5%	6,5 anos
R\$ 559,13/MWh	R\$ 116.233	19%	4,5 anos
R\$ 639,00/MWh	R\$ 378.109	35%	2,8 anos
R\$ 718,88/MWh	R\$ 637.161	49,1%	2 anos
R\$ 798,75/MWh	R\$ 897.609	62,8%	1,6 anos

Fonte: o autor, 2022.

A taxa de inflação média durante o projeto de 7,07% representa o limite para viabilidade de investimento no Cenário 2. Qualquer valor acima deste inviabilizaria o interesse do investidor, que é o caso da taxa no fim do ano de 2021, na casa dos 10,06%. Sabe-se que a taxa de inflação é diretamente influenciada por todos os setores da economia e de difícil previsão. Porém, se cumprida a visão pessimista até 2030 de 4,40%, se vê um cenário de viabilidade com retorno ao investidor, porém não ainda suficiente para ser mais rentável que o Cenário 1.

Quanto ao preço da eletricidade exportada, o valor R\$ 523,50/MWh apresentou-se como limite para o investimento. O valor base do estudo foi o de R\$ 639,00/MWh, utilizado no Leilão de Energia A-5, realizado em setembro de 2021. Em caso do acerto em contrato por um valor menor que R\$ 523,50/MWh, sob as condições apresentadas neste trabalho, o investimento torna-se inviável.

5.5 Produção de biofertilizantes

É importante recordar as relações trazidas por Ma *et al.* (2020): 135 kg de biofertilizantes sólidos com 30% de umidade ou 865 L de biofertilizantes líquidos podem ser gerados com uma tonelada de resíduos alimentares. Recorda-se também que a geração anual de resíduos estimada neste trabalho foi de 3.899,4 ton.

Portanto, 526.419 kg de biofertilizantes sólidos com 30% de umidade ou 3.372.981 L de biofertilizantes líquidos com potencial de serem gerados anualmente a partir do digestato. É mais uma possibilidade de fonte de renda ou de economia dentro do modelo de negócio que permite o sistema de digestão anaeróbia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi possível determinar o potencial energético do biogás proveniente dos resíduos orgânicos alimentares da Região da Vila C em Foz do Iguaçu/PR, com a descrição de dois cenários: o Cenário 1, que destinou o biogás para utilização como energia térmica pela substituição de botijões de gás GLP e o Cenário 2, que priorizou a utilização como energia elétrica.

Para o Cenário 1, verificou-se que o potencial de energia térmica foi de 1.142.881,95 Mcal/ano. Em relação ao gás GLP, o biogás modelado equivale energeticamente a 5.395,15 botijões, gerando economias anuais de R\$ 539.515,00. Para o Cenário 2, o biogás pode ser convertido em 480.470 kWh/ano ou 1.434,24 kWh/dia, sendo 89.686,2 kWh/ano destinados à manutenção da planta e 390.783,8 kWh/ano disponíveis para comercialização.

Sob o ponto de vista dos cenários como projetos para investimento, o Cenário 1 apresentou-se mais favorável pela análise do VPL, TIR, *Payback* e dos fluxos de caixa acumulados, com um valor em caixa sendo em torno de 8 vezes o valor do Cenário 2, demonstrando maior lucratividade na substituição dos botijões de gás GLP pelo biogás.

Quanto à sensibilidade dos cenários, o Cenário 1 apresentou um limite do preço do combustível em R\$ 1,36/m³, o que significa que os gastos anuais com insumos para obtenção do biogás não poderiam superar o valor de R\$ 379.947,28. Além disso, o valor médio do preço do botijão de gás GLP não poderia ser menor que R\$ 45,05 para viabilidade do projeto.

Em relação ao Cenário 2, a taxa de inflação média durante os 20 anos de projeto não poderia superar o limite de 7,07%, enquanto o preço da eletricidade exportada não poderia ser menor que R\$ 523,50/MWh para que o projeto ainda fosse aceitável ao investidor.

No que diz respeito à capacidade de produção de biofertilizantes, verificou-se que 526.419 kg de biofertilizantes sólidos com 30% de umidade ou 3.372.981 L de biofertilizantes líquidos podem ser gerados anualmente a partir do digestato, abrindo possibilidades para mais uma fonte de renda ou de economia.

Quanto ao software *RETScreen Expert*, sua utilização foi fundamental para automatização dos cálculos dos cenários e das sensibilidades, permitindo ao autor muitos aprendizados no olhar econômico de um projeto, com valorização de detalhes

importantes que podem ser aplicáveis à vida do engenheiro químico.

A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos alimentares possui grande potencial para aplicação em diversos contextos. Soluções para os desperdícios de alimentos necessitam ser postas em prática e a técnica exposta neste trabalho pode auxiliar neste processo, não somente pela recuperação energética, mas também por contribuir para a redução do efeito estufa.

O Brasil possui total capacidade de se tornar referência mundial no assunto do biogás, mas são necessários esforços de todas as esferas do poder público para que seja alterado o atual sistema de gestão dos resíduos orgânicos no geral, para um que valorize o aproveitamento energético.

Por fim, para trabalhos futuros sugere-se a inserção de custos para a produção e ganhos com a comercialização dos biofertilizantes, e também de créditos de carbono, funcionalidade calculada pelo software *RETScreen Expert*. Outra possibilidade é a inclusão do biometano na análise, como combustível para automóveis. De forma complementar, outros substratos poderiam ser testados e realizadas comparações aos resultados deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE (São Paulo). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 18 fev. 2022.
- ANEEL. **RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 2.886, DE 22 DE JUNHO DE 2021**. 2021. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20212886ti.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.
- AWE, Olumide Wesley; ZHAO, Yaqian; NZIHOU, Ange; MINH, Doan Pham; LYCZKO, Nathalie. A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. **Waste And Biomass Valorization**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 267-283, 9 jan. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-016-9826-4>. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01619254/file/a-review-of-biogas-utilisation.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2022.
- AZEITONA, Débora Cristina Lopes. **Efeitos de Pré-tratamentos Térmicos na Digestão Anaeróbia Termófila de Resíduos de Casca de Batata**. 2012. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia e Segurança Alimentar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/8521/1/Azeitona_2012.pdf. Acesso em: 02 fev. 2022.
- BANCO DE ALIMENTOS (São Paulo). **ONG Banco de Alimentos**. 2022. Disponível em: <https://bancodealimentos.org.br/>. Acesso em: 26 fev. 2022.
- BRASIL. IFI. **Relatório de Acompanhamento Fiscal**. 2021. Disponível em: https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/589004/RAF52_MAI2021_1_Contexto_macro.pdf. Acesso em: 01 fev. 2022.
- BRASIL. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2010.
- BRASIL. MMA. **Gestão de Resíduos Orgânicos**. 2017. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gest%C3%A3o-de-res%C3%ADduos-org%C3%A2nicos.html#o-que-sao-residuos-organicos>. Acesso em: 22 fev. 2022.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **IRPJ (Imposto sobre a renda das pessoas jurídicas)**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/tributos/IRPJ>. Acesso em: 23 jan. 2022.
- BRASÍLIA. IPEA. **Brasil coleta 183,5 mil toneladas de resíduos sólidos/dia**: coleta de lixo urbana é superior a 98% das casas, mas na área rural o índice é de 33%. 2012. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=13932. Acesso em: 18 fev. 2022.
- CARBALLA, Marta; DURAN, Cecilia; HOSPIDO, Almudena. Should We Pretreat Solid Waste Prior to Anaerobic Digestion? An Assessment of Its Environmental Cost.

Environmental Science & Technology, [S.L.], v. 45, n. 24, p. 10306-10314, 15 nov. 2011. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es201866u>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es201866u>. Acesso em: 21 fev. 2022.

CASSINI, S.T. et al. (2003) “Secagem e Higienização de Lodos com Aproveitamento de Biogás”. In: Cassini, S.T. Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Rio de Janeiro: PROSAB, cap. 5, p. 122-123.

CAVALCANTE, Irna. **Leilão de energia terá valores entre R\$ 191/MWh e R\$ 639/MWh**. 2021. Disponível em: <https://www.opovo.com.br/noticias/economia/2021/08/25/leilao-de-energia-tera-valores-entre-rs-191-mwh-e-rs-639-mwh.html>. Acesso em: 12 jan. 2022.

CECCHI, Franco; Bolzonella, David; Fatone, Francesco. Mass & Energy balances around full scale plants for food waste anaerobic digestion. *In: ADSW&EC*, 2011, Viena. Disponível em: http://www.valorgas.soton.ac.uk/Pub_docs/IWA%20Vienna%202011/Presentation%203%20Bolzonella%20Mass%20&%20Energy%20balance%20VALORGAS%20ADSW&EC%20Vienna%202011.pdf. Acesso em: 26 jan. 2022.

CIBIOGÁS. **Biogas Data**. 2022. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiNjQxYjg4NjgtMTI0NC00NTk2LTk5OTQtMjFkNmMxZjM1ZTk5liwidCI6ImMzOTg3Zml3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9>. Acesso em: 21 fev. 2022.

COLDEBELLA, Anderson. **The viability of using Biogas from bovine culture and swine culture to the generation of electric power and irrigation for rural properties**. 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

CONTE, Cláudia Heloiza. O turismo de Foz do Iguaçu (Paraná, Brasil) e sua inserção dentro da rede internacional de cidades. **Turismo e Sociedade**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 408-423, 14 maio 2013. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/tes.v6i2.29459>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/turismo/article/view/29459>. Acesso em: 18 fev. 2022.

COUTINHO, Thiago. **Veja como analisar seus rendimentos com a Taxa Interna de Retorno**. 2018. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/taxa-interna-de-retorno>. Acesso em: 26 fev. 2022.

CNI. Recuperação energética de resíduos sólidos: um guia para tomadores de decisão. **Confederação Nacional da Indústria**. Brasília, 2019.

DURANTI, Anderson. **A presença de sólidos fixos em reatores biológicos**. 2022. Disponível em: <https://www.linkedin.com/in/anderson-duranti-b53281222/recent-activity/shares/>. Acesso em: 01 fev. 2022.

EPE. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. **Empresa de Pesquisa Energética – Ministério de Minas e Energia**. Rio de Janeiro, 2014.

EPE. Balanço Energético Nacional. **Empresa de Pesquisa Energética – Ministério de Minas e Energia**. Rio de Janeiro, 2017.

FAO. **Brasil em resumo**. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/fao-no-brasil/brasil-em-resumo/pt/>. Acesso em: 26 fev. 2022.

FOXWATER. **Biodigestor e biometano**. 2022. Disponível em: <https://www.foxwater.com.br/247/biodigestor-e-biometano-o-que-e-um-biodigestor>. Acesso em: 25 fev. 2022.

FOZ DO IGUAÇU. PREFEITURA MUNICIPAL DE FOZ DO IGUAÇU - PR. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1z2iu2CrjExwrMRvAHZZywKURSM1uK8rC>. Acesso em: 15 jan. 2022.

FRANCO, A. L.; GALLI, O. C. **Método para análise de investimentos: alternativa para classificação de projetos com prazo e volume de recursos diferentes**. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007.

G1. **Dólar é cotado a R\$ 5,30 e fecha janeiro com queda de quase 5%**: nesta segunda-feira (31), moeda norte-americana registrou recuo de 1,57%, a R\$ 5,3054. cotação foi a menor desde 22 de setembro do ano passado.. Nesta segunda-feira (31), moeda norte-americana registrou recuo de 1,57%, a R\$ 5,3054. Cotação foi a menor desde 22 de setembro do ano passado.. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2022/01/31/dolar.ghtml>. Acesso em: 05 fev. 2022.

GOOGLE. 2022. Foz do Iguaçu. [s.l.]: Google Maps. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/Foz+do+Igua%C3%A7u,+PR/@-25.5171112,-54.6170033,12z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x94f690ebae530a43:0x21979473b4c4a952!8m2!3d-25.5163356!4d-54.5853764>. Acesso em: 01 fev. 2022.

IBGE. **Foz do Iguaçu**. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/foz-do-iguacu/panorama>. Acesso em: 22 fev. 2022.

ÍNDIA. BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY. **Cogeneration**. 2019. Disponível em: <https://beeindia.gov.in/sites/default/files/2Ch7.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2022.

KARLSSON, Tommy *et al.* **Manual básico de biogás**. Lajeado: Univates, 2014. 70 p. Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf. Acesso em: 24 fev. 2022.

KONRAD, O.; AKWA, J. V.; KOCH, F. F.; LUMI, M.; TONETTO, J. F. Quantification and characterization of the production of biogas from blends of agro-industrial wastes in a largescale demonstration plant. **Acta Scientiarum Technology** (Online), v. 38, p. 415-421, 2016.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; AMARAL, André Cestonaro do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2019. 209 p. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1108617>. Acesso em: 12 jan. 2022.

LIMA, J. D. **Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. João Pessoa, ABES. 2002.

LOPES, Alexandre Oliveira Filippo. **Geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos orgânicos portuários**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento Energético, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Alexandre_Oliveira_Filippo_Lopes.pdf. Acesso em: 30 jan. 2022.

LOUZADA, A. G. **Avaliação da atividade metanogênica específica de lodos com condicionamento hidrolítico provenientes do sistema UASB + Bfs**. Orientador: Dr. Sérgio Túlio Alves Cassini. 2006. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2006. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp051812.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2022.

LUNA, Denise. **Preço médio do gás de cozinha ultrapassa R\$ 100; gasolina sobe 3,3% nos postos**. 2021. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/estado-conteudo/2021/10/19/preco-medio-do-gas-de-cozinha-ultrapassa-r-100-gasolina-sobe-33-nos-postos.htm>. Acesso em: 07 fev. 2022.

MA, Yingqun; SHEN, Yanqing; LIU, Yu. Food Waste to Biofertilizer: a potential game changer of global circular agricultural economy. **Journal Of Agricultural And Food Chemistry**, [S.L.], v. 68, n. 18, p. 5021-5023, 22 abr. 2020. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02210>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jafc.0c02210>. Acesso em: 15 fev. 2022.

MARCHI, M. E. V.; BRESSIANI, P. A.; BARBOSA, P. M. **Digestão anaeróbia de resíduos orgânicos para cozinha industrial dos restaurantes Latife**. Orientador: Dr. Ronan Cleber Contrera. 2013. 48 p. Projeto de formatura (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=9495. Acesso em: 17 jan. 2022.

MENDONÇA, E. F. **Tratamento anaeróbio de efluentes oriundos da bovinocultura de leite em biodigestor tubular**. Orientadora: Maria Hermínia Ferreira Tavares. 2009. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Cascavel, 2009. Disponível em: <http://tede.unioeste.br:8080/tede/handle/tede/306>. Acesso em: 17 jan. 2022.

MFRURAL. **Separador de Sólidos**. 2022. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/169937/separador-de-solidos>. Acesso em: 28 jan. 2022.

MILANEZ, Artur Yabe *et al.* Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. **Bndes Setorial**, Brasília, v. 1, n. 47, p. 221-276, mar. 2018. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15384/1/BS47__Biogas__FECHADO.pdf. Acesso em: 21 fev. 2022.

NUNES, Vicente. **Gás de cozinha deve ficar 30% mais caro até março de 2022**. 2021. Disponível em: <https://blogs.correiobraziliense.com.br/vicente/gas-de-cozinha-deve-ficar-30-mais-carro-ate-marco-de-2022/>. Acesso em: 27 fev. 2022.

OLIVEIRA, Carlos Eduardo Cruz Lopes de. **Avaliação do Impacto da Alteração das condições de Financiamento Sobre a Energia Eólica no Brasil: evolução e perspectivas**. 2019. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento Energético,

Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Carlos_Eduardo_Cruz_Lopes_de_Oliveira-_MESTRADO_2019.pdf. Acesso em: 24 jan. 2022.

PAIXÃO, Simone Karoline da Silva. **Produção de biogás a partir de resíduos de alimentos**: uma proposta para um restaurante em recife-pe. 2018. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/39>. Acesso em: 15 jan. 2022.

PARANÁ. AGEPAR. **RESOLUÇÃO Nº 015/2021-AGEPAR**. 2021. Disponível em: <https://www.documentador.pr.gov.br/documentador/pub.do?action=d&uid=@gtf-escriba-agepar@c67b7059-b524-49b9-b0b1-6a878e88b24c&emPg=true>. Acesso em: 29 jan. 2022.

PARANÁ. IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Quanto custa para fazer uma outorga?** 2022. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Outorga-de-Recursos-Hidricos>. Acesso em: 28 jan. 2022.

PARANÁ. IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Taxas para licenciamentos ambientais**. 2010. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-09/taxas_ambientais_01_2010.pdf. Acesso em: 28 jan. 2022.

PARANÁ. SECRETARIA DA FAZENDA. **Consultar indicadores econômicos**. 2022. Disponível em: <http://www.fazenda.pr.gov.br/Pagina/Indicadores-economicos>. Acesso em: 28 jan. 2022.

PASSAGLIA, Rúbia Carla; Santos, Carlos Alberto Frantz dos; Guidini, William Paulo. Análise de investimento para geração de energia elétrica através do biogás em uma propriedade de suínos. *In*: XXI ENGEMA, 2019, São Paulo. Disponível em: <http://engemausp.submissao.com.br/21/anais/arquivos/268.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2022.

PORTAL DA CIDADE. **Biodigestores vão ampliar vida útil do aterro sanitário de Foz do Iguaçu**. 2021. Disponível em: <https://foz.portaldacidade.com/noticias/cidade/biodigestores-vao-ampliar-vida-util-do-aterro-sanitario-de-foz-do-iguacu-0556>. Acesso em: 19 fev. 2022.

REIS, Liege. **Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro**. 2020. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro/>. Acesso em: 21 fev. 2022.

RETSCREEN. **RETScreen Innovation Lab**. 2021. Disponível em: <https://www.nrcan.gc.ca/energy/energy-offices-and-labs/canmetenergy/canmetenergy-varenes/retscreen-innovation-lab/23359>. Acesso em: 07 fev. 2022.

ROCHA, Camila Marçal da. **Proposta de implementação de um biodigestor anaeróbio de resíduos alimentares**. 2016. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2014/02/TCC-camila-final.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2022.

- SANTOS, Ivan Felipe Silva dos *et al.* Um estudo dos custos de implantação de empreendimentos de aproveitamento energético do biogás de estações de tratamento de esgoto. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá - Mg, v. 20, n. 2, p. 145-155, jun. 2014. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/334>. Acesso em: 01 fev. 2022.
- SANTOS, P. **Guia técnico de biogás**. Portugal: Centro para a Conservação de Energia, 2000.
- SÃO PAULO. CETESB. **Gases do Efeito Estufa**. 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- SCANELLA, E., 2012, **Project Finance in the Energy Industry: New Debt-Based Financing Models**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228120528_Project_Finance_in_the_Energy_Industry_New_Debt-Based_Financing_Models. Acesso em: 24 jan. 2022.
- SILVA, Wellington Regis. **Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais**. 2009. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/7187/1/arquivototal.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2022.
- SGANZERLA, E. Biodigestor: uma solução. Porto Alegre: Agropecuária, 1983. 88 p.
- SOLARVIEW. **O que são TMA, VPL, TIR e Payback?** 2022. Disponível em: <https://solarview.zendesk.com/hc/pt-br/articles/360053021011-O-que-s%C3%A3o-TMA-VPL-TIR-e-Payback->. Acesso em: 21 fev. 2022.
- TEENWIN. **Teenwin 100-1000m3 Orgânico usina de biogás da digestão anaeróbia para biogás digestor**. 2022. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/teenwin-100-1000m3-organic-anaerobic-digestion-biogas-power-plant-for-bio-gas-digester-60792461480.html?spm=a2700.details.maylikeexp.10.23341ea1T7Nyu9>. Acesso em: 25 jan. 2022.
- URTADO, E. S.; Santo, V. da S.; Quinteiros, P. C. R.; Oliveira, E. A. de A. Q. Aplicação do método do valor presente líquido (VPL) na análise da viabilidade econômica de projetos na indústria metal mecânica: um estudo de caso. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 9., 2009, São José dos Campos. Anais [...]. São José dos Campos: UNIVAP, 2009. p. 1-4. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2009/anais/arquivos/0732_0960_01.pdf. Acesso em: 15 fev. 2022.
- VICTORINO, Alfiado. **Potencial da digestão anaeróbia na gestão de resíduos e produção de energia renovável: um estudo de caso**. 2017. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Desenvolvimento Sustentável, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/31482/1/2017_AlfiadoVictorino.pdf. Acesso em: 26 jan. 2022.
- ZAGO, Valéria Cristina Palmeira; BARROS, Raphael Tobias de Vasconcelos. **Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade**.

Engenharia Sanitaria e Ambiental, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 219-228, abr. 2019.
FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019181376>. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/esa/a/MY53xbTzPxYhz783xdmKc8F/abstract/?lang=pt>. Acesso em:
19 fev. 2022.

APÊNDICES

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO

- Cálculos referentes ao Quadro 8

Para todos os cálculos em que ocorreram conversões dólar – real, foi utilizada a conversão dólar – real do dia 31/01/2022, em que 1 US\$ = R\$ 5,30, conforme G1 (2022).

Os valores de aquisição do triturador, tanque homogeneizador e gasômetro foram baseados pelo trabalho de Passaglia *et al.* (2019), com ajuste do valor pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) de dez/19 a jan/22. A Tabela 9 a seguir contém os dados utilizados por Passaglia *et al.* (2019) e o ajuste realizado neste trabalho:

Tabela 9 – Dados de insumos e ajustes pelo IPCA.

Insumo	Valor utilizado por Passaglia <i>et al.</i> (2019)	Ajuste pelo IPCA
Triturador	R\$ 50.000,00	R\$ 58.177,88
Tanque homogeneizador	R\$ 20.000,00	R\$ 23.271,15
Gasômetro	R\$ 10.000,00	R\$ 11.635,58

Fonte: o autor, 2022.

O valor para aquisição do digestor anaeróbico de 1.100 m³ foi baseado no custo de US\$ 5.000,00 para cada 100 m³ de digestores CSTR disponibilizados por Teenwin (2022), totalizando assim o valor US\$ 55.000,00, equivalente a R\$ 291.500,00 no dia 31/01/2022.

Os gastos para aquisição do compressor e tratamento de água, sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono foram inspirados no trabalho de Santos *et al.* (2014). Para o compressor, Santos *et al.* (2014) utilizaram a base de cálculo R\$ 800,00/m³/h, valor este que será ajustado pelo IPCA de jan/14 a jan/22. Semelhantemente, os gastos para tratamento de água, sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono serão ajustados nestes moldes, partindo do valor de R\$ 0,016/m³.

É importante salientar que o volume de biogás que chega ao compressor é diferente do volume que passa pelos outros tratamentos, pois recebe um biogás já purificado, cuja porcentagem de metano para este trabalho foi considerado como 95%. Para o compressor, chegam 155.861 m³, o que equivalem a 19,38 m³/h (8.040 h de

operação nos 335 dias) enquanto para os outros tratamentos será considerado o valor 279.373 m³ (ainda com 53% de metano, vide Quadro 8). A Tabela 10, a seguir, contém os dados mencionados e o valor final para cada tratamento ao biogás:

Tabela 10 – Custos para purificação do biogás e ajustes pelo IPCA.

Tratamento	Santos <i>et al.</i> (2014)	Ajuste pelo IPCA	Volume ou vazão de biogás	Valor final
Compressor	R\$ 800,00/m ³ /h	R\$ 1.283,24/m ³ /h	19,38 m ³ /h	R\$ 24.869,19
Água	R\$ 0,016/m ³	R\$ 0,026/m ³	279.373 m ³	R\$ 7.263,70
H ₂ S	R\$ 0,016/m ³	R\$ 0,026/m ³	279.373 m ³	R\$ 7.263,70
CO ₂	R\$ 0,016/m ³	R\$ 0,026/m ³	279.373 m ³	R\$ 7.263,70

Fonte: o autor, 2022.

Os gastos pelo uso da água foram inferidos pelo volume diário de adição de água ao digestor anaeróbico, cujo valor é 4,26 m³/dia (Tabela 5), e o preço estabelecido por AGEPAR (2021) de R\$ 5,6675/m³. Em 335 dias, o volume total de água utilizada é de 1.427,1 m³ e os gastos chegam a R\$ 8.088,09 anualmente.

Os gastos referentes às análises laboratoriais do efluente e afluente foram baseados pelo trabalho de Passaglia *et al.* (2019), com ajuste do valor pelo IPCA de dez/19 a jan/22. No trabalho em questão, foi utilizado o valor mensal de R\$ 200,00. Ao ajustar pelo IPCA, chega-se ao valor mensal de R\$ 232,71, que anualmente equivale a R\$ 2.792,52.

- Cálculos referentes ao Quadro 9

Os gastos com energia elétrica para manutenção da planta foram estimados nos passos a seguir:

- Coletou-se informações a respeito do consumo de energia elétrica para manutenção de uma planta de digestão anaeróbia utilizando resíduos alimentares como insumo orgânico. Foi obtida a relação de 23 kWh/ton, descrita por Cecchi *et al.* (2019) de uma usina construída em Ludlow, na Inglaterra;
- Tomou-se a geração anual de resíduos alimentares deste trabalho, igual a 3.899,4 ton. Sendo assim, obtém-se um consumo de 89.686,2 kWh anualmente;
- Sabendo-se que a geração de biogás se dá por 8.040 h anuais, tem-se um consumo de 11,155 kWh/h. Destas 8.040 h, 7.035 h equivalem à energia gasta fora

da ponta e 1.005 h na ponta. Sendo assim, calcula-se o consumo de 78.475,425 kWh fora da ponta e 11.210,775 kWh na ponta;

- As tarifas regulamentadas pela ANEEL (ANEEL, 2021) ao grupo B3 (Comercial) se dão por: TE (Tarifa de energia) fora da ponta possui o custo de R\$ 0,40976/kWh e na ponta R\$ 0,65159/kWh, enquanto a TUSD (Tarifa de uso do sistema) fora da ponta possui o custo de R\$ 0,31960/kWh e na ponta R\$ 0,95667/kWh;
- Portanto, os gastos fora da ponta são calculados por: $0,40976 * 78.475,425 + 0,31960 * 78.475,425 = \text{R\$ } 57.236,84$, enquanto os gastos na ponta são: $0,65159 * 11.210,775 + 0,95667 * 11.210,775 = \text{R\$ } 18.029,84$. Sendo assim, o total é R\$ 75.266,68.

- Cálculos referentes ao Quadro 10

A determinação do consumo de combustível foi realizada com a aplicação de um balanço de massa para o componente metano, com a consideração de temperatura constante. Sabendo-se que 279.373 m³ de biogás contém 53% de metano e deseja-se um produto com 95% de metano após tratamento, o volume final do biogás é de 155.861 m³.

O cálculo da energia elétrica não vendida, utilizada para manutenção da planta foi baseada no consumo anual de energia elétrica calculado acima (89.686,2 kWh) e pelo preço da eletricidade exportada, cujo valor é de R\$ 639/MWh. Ao converter o consumo para MWh e realizando o produto com o valor por MWh, obtém-se R\$ 57.309,48.

Os ganhos com a comercialização da eletricidade foram calculados de forma automática pelo *RETScreen Expert*, pelo produto da quantidade de energia elétrica oriunda do biogás tratado (480.470 kWh) e o preço da eletricidade exportada, R\$ 639/MWh. Ao realizar a conversão da quantidade de energia elétrica para MWh e realizando o produto com o valor por MWh, obtém-se R\$ 307.020,33.

- Dimensionamento do digestor anaeróbio

Cálculo da porcentagem de sólidos voláteis nos resíduos alimentares, conforme a equação 1. Serão utilizados os valores padrões do software *RETScreen Expert*, onde $ST_{perc} = 23\%$ e $SV_{ST} = 89\%$.

$$SV_{\text{perc}} = ST_{\text{perc}} * SV_{\text{ST}} \quad (1)$$

$$SV_{\text{perc}} = 0,23 * 0,89 = 0,2047 = 20,47 \%$$

Cálculo da quantidade diária de sólidos voláteis adicionada ao digestor anaeróbio, conforme a equação 2. A produção diária de resíduos alimentares adicionados ao digestor anaeróbio é 11.640 kg/dia.

$$SV_{\text{diário}} = P_d * SV_{\text{perc}} \quad (2)$$

$$SV_{\text{diário}} = 11.640 * 0,2047 = 2.382,71 \text{ kg/dia}$$

Cálculo da massa total diária a ser adicionada ao digestor anaeróbio, conforme a equação 3. O teor de sólidos totais desejado é de 15%.

$$M_t = \frac{SV_{\text{diário}}}{ST_f} \quad (3)$$

$$M_t = \frac{2.382,71}{0,15} = 15.884,73 \text{ kg/dia}$$

Cálculo do volume diário de água a ser adicionado ao digestor anaeróbio, conforme a equação 4. Será utilizado o valor de 997,07 kg/m³ para a massa específica da água a 25 °C.

$$V_{\text{água}} = \frac{(M_t - P_d)}{\rho_{\text{água}}} \quad (4)$$

$$V_{\text{água}} = \frac{(15.884,73 - 11.640)}{997,07} = 4,26 \text{ m}^3$$

Cálculo do volume do digestor anaeróbio, conforme a equação 5. A massa específica do resíduo utilizada será 430 kg/m³, conforme Paixão (2018). O TDH terá o valor de 30 dias, conforme descrito no item “Considerações do estudo”.

$$V_{\text{digestor}} = \left(\left(\frac{P_d}{\rho_{\text{resíduo}}} \right) + V_{\text{água}} \right) * TDH * 1,10 \quad (5)$$

$$V_{\text{digestor}} = \left(\left(\frac{11.640}{430} \right) + 4,26 \right) * 30 * 1,10 = 1.033,88 \text{ m}^3$$