

VICTOR VAZ

ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE UMA PLANTA RURAL DE BIOGÁS  
INTEGRADA A UM SISTEMA DE FERTIRRIGAÇÃO

CASCAVEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO– 2022

VICTOR VAZ

# **ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE UMA PLANTA RURAL DE BIOGÁS INTEGRADA A UM SISTEMA DE FERTIRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO– 2022

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Vaz, Victor

Análise termoeconômica de uma planta rural de biogás integrada a um sistema de fertirrigação / Victor Vaz; orientador Samuel Nelson Melegari de Souza. -- Cascavel, 2022.

101 p.

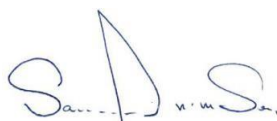
Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2022.

1. Análise exergetica. 2. Aproveitamento de residuos da suinocultura. 3. Microgeração de eletricidade. 4. Alocação dos custos. I. Nelson Melegari de Souza, Samuel , orient. II. Título.

**VICTOR VAZ**

Análise termoeconômica de uma planta rural de biogás integrada a um sistema de fertirrigação.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biocombustíveis, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Samuel Nelson Melegari de Souza  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Edson Antonio da Silva  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Toledo (UNIOESTE)



Willian César Nadaleti Universidade  
Federal de Pelotas (UFPEL)

Cascavel, 23 de fevereiro de 2022

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiro aos meus pais e irmãos pelo apoio e torcida incondicional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, pela condução do tema de pesquisa estudado, com respeito, incentivo e bons conselho.

Aos professores do programa de Engenharia de Energia na Agricultura e Engenharia Agrícola pelos ensinamentos, conselhos, experiências compartilhadas e apoio que contribuíram positivamente com o resultado alcançado.

Aos funcionários do programa, em especial a Vanderléia L. S. Schmidt, pelo suporte prestado.

Ao laboratório de Saneamento Ambiental pelo espaço concedido, esclarecimento de dúvidas e, principalmente, pela parceria técnica firmada.

Ao Evandro Pastore, proprietário da granja Pastore, pela confiança na concessão da área experimental, em compartilhar experiências e levantamento de dados, contribuindo com a confiabilidade dos resultados desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Aproveito também para agradecer a todos que, direta ou indiretamente, tornaram possível o desenvolvimento dessa dissertação.

Meus sinceros agradecimentos!

## 1. Lista de Figuras

Figura 1. Esquema representativo reator modelo Canadense. ....	10
Figura 2. Estrutura física do sistema integrado. ....	18
Figura 3. Estrutura física da planta Pastore. ....	19
Figura 4. Biodigestor da Planta Pastore (Unidade A). ....	20
Figura 5. Compressor de ar (unidade B). ....	20
Figura 6. Sistema de refrigeração (Unidade C). ....	21
Figura 7. Motobomba de Agitação (Unidade D). ....	21
Figura 8. Conjunto Motor gerador (Unidade E). ....	22
Figura 9. Reservatório (a), carretel de Fertirrigação (b) e motobomba elétrica (c) e (d) (Unidade H). ....	23
Figura 10. Painel de controle do Aspensor Setorial Royal (TURBOMAQ 75/ GS). ....	37
Figura 11. Produção de biogás na usina Pastore ao longo das 14 semanas de monitoramento. ....	46
Figura 12. Diagrama de Sankey para o balanço exergético da planta Pastore. ....	54
Figura 13. Comparativo entre a eficiência energética e exergética da planta. ....	56
Figura 14. Custo de produção do Biofertilizante. ....	67
Figura 15. Comparação do custo de produção do biogás com (Caso1) e sem (Caso 2) a comercialização do biofertilizante. ....	68
Figura 16. Custo de produção da eletricidade gerada quando o biofertilizante também é considerado produto útil. ....	69
Figura 17. Custo de produção da eletricidade gerada da planta Pastore tendo a eletricidade como único produto útil. ....	69
Figura 18. Lucro anual da planta Pastore com a venda da eletricidade gerada. ....	73
Figura 19. Lucro anual hipotético do sistema integrado como custo evitado na compra da eletricidade, venda da eletricidade gerada e biofertilizante com deságio de 74% do valor NPK. ....	74
Figura 20. Lucro anual do sistema integrado com a venda da eletricidade gerada. ....	77
Figura 21. Lucro anual do sistema integrado com a venda do biofertilizante líquido com deságio de 74% do valor NPK. ....	77
<i>Figura 22. Custo evitado pelo uso da eletricidade gerada no sistema integrado. ....</i>	<i>78</i>

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Produção de dejetos e quantidade de nutrientes de resíduos suínos para biodigestão anaeróbia. ....	13
Tabela 2. Parâmetros físico-químicos analisados. ....	27
Tabela 3. Exergia química padrão dos principais combustíveis fósseis. ....	31
Tabela 4. Propriedades de Estado. ....	32
Tabela 5. Resumo dos valores numéricos dos coeficientes do modelo apresentado no estudo de Peduzzi et al. (2016). ....	35
Tabela 6. Características hidráulicas da motobomba, conforme painel da figura 4 (b). .....	36
Tabela 7. Caracterização físico-química. ....	43
Tabela 8. Concentração de biogás na propriedade Pastore. ....	45
Tabela 9. Intervalo de valores da produção de biogás na usina Pastore .....	46
Tabela 10. Estimativa da produção diária de dejetos e consumo de água. ....	47
Tabela 11. Exergia química do substrato e digestato em base seca. ....	48
Tabela 12. Representação termodinâmica da Exergia ( $b^{\circ}ch$ ), Entalpia ( $\Delta H^{\circ}$ ) e Energia Livre de Gibbs ( $\Delta G^{\circ}$ ) do substrato e digestato suíno. ....	49
Tabela 13. Representação termodinâmica do poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) do substrato e digestato suíno. ....	50
Tabela 14. Poder Calorífico inferior (PCI) do biogás. ....	51
Tabela 15. Exergia química do biogás. ....	52
Tabela 16. Fluxos exergéticos e energéticos do sistema de fertirrigação Integrado.	53
Tabela 17. Análise Energética da planta de biogás Pastore. ....	55
Tabela 18. Análise Exergética da planta de biogás Pastore. ....	55
Tabela 19. Análise termodinâmica do conjunto motor gerador. ....	60
Tabela 20. Parâmetros relativos ao transporte e distribuição de dejetos líquidos da suinocultura realizada com caminhões e tratores acoplado a tanque de fertirrigação. .....	62
Tabela 21. Consumo energético no transporte e distribuição de dejetos líquidos da suinocultura realizada com caminhões e tratores acoplado a tanque de fertirrigação. .....	63
Tabela 22. Dados Econômicos do sistema. ....	64
Tabela 23. Custo dos produtos do sistema integrado. ....	65

Tabela 24. Custo dos produtos da planta Pastore. ....	66
Tabela 25. Insumos de sistemas de fertirrigação disponíveis no mercado. ....	70
Tabela 26. Insumos de sistemas de Fertirrigação disponíveis no mercado. ....	71
Tabela 27. Viabilidade econômica Planta Pastore. ....	71
Tabela 28. Viabilidade econômica: sistema integrado. ....	72
Tabela 29. potencial econômico de implementação do projeto ao longo de 10 anos. .....	75
Tabela 30. Comparativo entre o custo evitado com a autossuficiência energética e os lucros na venda desta quantidade de energia elétrica. ....	76



VAZ, Victor; Souza, Samuel Nelson Melegari de. **Análise Termoeconômica de uma planta rural de biogás integrada a um sistema de fertirrigação**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2022.

## RESUMO

O segmento de biofertilizantes estabilizados em biodigestores anaeróbicos apresenta-se como solução promissora na correta estruturação dos solos brasileiros e na diminuição das dependências dos produtos importados. É um dos grandes desafios para o desenvolvimento deste setor é a logística, o custo e a viabilidade de tratamento, transporte e distribuição de tais fertilizantes orgânicos. Nesse sentido, este trabalho propõe um estudo de viabilidade termoeconômica de um biodigestor acoplado a um sistema de fertirrigação, intitulado “sistema integrado” e da usina Pastore, localizada em Toledo (PR). Desse modo, serão feitas análises de primeira e segunda lei da termodinâmica, por meio da multiplicação das matrizes de incidência pelos fluxos de energia e exergia. Além de avaliações econômicas de implantação dos dois sistemas propostos, como a alocação dos custos dos produtos gerados e análise de viabilidade econômica. Alguns dos resultados indicaram que o consumo de energia para fertirrigar um m<sup>3</sup> de dejetos suíno, nas condições da fertirrigação analisada, corresponde apenas a 1,55% do potencial de geração de eletricidade desses dejetos, estimados em 15,20 kWh/m<sup>3</sup> e 19,13 kWh/m<sup>3</sup> em termos de energia e exergia, respectivamente, o que permitiria a autossuficiência energética do sistema. Os indicadores econômicos calculados a partir das receitas e custos dos produtos da planta Pastore e do sistema integrado ao longo de 10 anos, revelam que ambos são viáveis, sendo o sistema integrado mais atrativo do que a usina Pastore, com VPL e TIR maiores. Contudo, o lucro com a venda da eletricidade gerada na planta de biogás é superior ao custo evitado com a autossuficiência energética dos sistemas de fertirrigação, portanto, este não é o fator que tornaria o sistema integrado mais atrativo financeiramente, mas sim a comercialização do biofertilizante líquido.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

**Palavras chave:** Resíduos da suinocultura; biofertilizante; microgeração de eletricidade; análise exérgica; alocação dos custos; viabilidade econômica.

VAZ, Victor; Souza, Samuel Nelson Melegari de. **Thermoeconomic analysis of a rural biogas plant integrated with a fertigation system.** State University of Western Paraná, February 2022.

### **ABSTRACT**

The segment of biofertilizers stabilized in anaerobic digesters presents itself as a promising solution in the correct structuring of Brazilian soils and in the reduction of dependence on imported products. And one of the great challenges for the development of this sector is the logistics, cost and feasibility of treatment, transport and distribution of such organic fertilizers. In this sense, this work proposes a study of the thermoeconomic feasibility of a biodigester coupled to a fertigation system, entitled "integrated system" and the Pastore plant, located in Toledo (PR). In this way, analyzes of the first and second laws of thermodynamics will be carried out, through the multiplication of the incidence matrices by the energy and exergy fluxes. In addition to economic evaluations of the implementation of the two proposed systems, such as the allocation of the costs of the generated products and analysis of economic viability. Some of the results indicated that the energy consumption to fertigate one m<sup>3</sup> of swine manure, under the analyzed fertigation conditions, corresponds to only 1.55% of the electricity generation potential of these manure, estimated at 15.20 kWh/m<sup>3</sup> and 19, 13 kWh/m<sup>3</sup> in terms of energy and exergy, respectively, which would allow the energy self-sufficiency of the system. The economic indicators calculated from the revenues and costs of the products of the Pastore plant and the integrated system over 10 years, reveal that both are viable, with the integrated system being more attractive than the Pastore plant, with higher NPV and IRR. However, the profit from the sale of electricity generated in the biogas plant is higher than the cost avoided with the energy self-sufficiency of the fertigation systems, therefore, this is not the factor that would make the integrated system more financially attractive, but the sale of liquid biofertilizer.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001"

**Keywords:** Swine manure; biofertilizer; electricity generation; exergetic analysis; economic viability.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
1.1. Análise Termoeconômica.....	5
1.2. Fundamentos da Digestão Anaeróbica .....	8
1.3. Modelagem termodinâmica da biomassa.....	10
1.4. Potencial econômico do Digestato e Biogás .....	13
1.5. Custos associados a planta .....	15
1.6. Sistemas de Fertirrigação .....	16
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
4.1 Identificação dos constituintes do sistema .....	1
4.2. Construção do diagrama funcional Termoeconômico .....	23
4.3. Caracterização das amostras e determinação dos estados termodinâmicos 27	
4.4. Alocação dos custos dos produtos associados a planta .....	37
4.5. Análise de viabilidade econômica do investimento .....	39
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>
5.1. Caracterização dos dejetos e biogás .....	43
5.2. Análise Termodinâmica da planta .....	47
5.2.1. Conteúdo energético e exergético de dejetos suínos e biogás .....	47
5.2.2. Fluxos de energia e exergia da planta.....	53
5.2.3. Análise de 1ª lei e 2ª lei da Termodinâmica.....	55
5.3. Análise econômica da planta Pastore e do sistema integrado .....	64
5.3.1. Custos dos produtos da planta .....	64
5.3.2. Viabilidade econômica das alternativas.....	71
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>79</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>82</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O setor do agronegócio brasileiro é um dos mais competitivos e dinâmicos do mundo com significativa importância para o crescimento e desenvolvimento econômico do país. A estimativa de sua participação no Produto Interno Bruto (PIB-Agro BR), realizado pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), da Esalq/USP em parceria com a CNA (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil), foi de 26,6% em 2020, um crescimento projetado de 9% frente ao ano anterior, mesmo com as dificuldades impostas pela pandemia da covid-19.

Dentre a cadeia produtiva do agronegócio, o consumo de fertilizantes representa uma importante relação com o aumento da produtividade no campo. Fato esse constatado e divulgado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), que ao compararem o crescimento da produtividade agrícola e o uso de fertilizantes, entre 1977 e 2014, verificou que a demanda por fertilizantes é proporcional a produção de áreas plantadas.

Ademais, simulações realizadas pelo CEPEA mostram que os gastos com fertilizantes para a produção de soja, milho, feijão, arroz irrigado e trigo na safra 2021/2022 devem subir 50,1%, 55,4%, 65,2%, 68,2% e 71,1%, respectivamente, frente aos custos da temporada anterior (2020/2021). Nos casos de gastos com combustíveis e manutenção preventiva das máquinas, as elevações foram de 10,3%, 10,5%, 15,4%, 21,1% e 11,9%, respectivamente.

De acordo com Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), a produção de fertilizantes nacionais é bastante expressiva, contando com cerca de 6,37 milhões de toneladas. No entanto, essa capacidade produtiva ainda não supri a alta demanda exigida pelo mercado brasileiro que, em 2020, foi cerca de 40,56 milhões de toneladas de fertilizantes.

Diante deste cenário de insuficiência de produção nacional de fertilizantes, o segmento de biofertilizantes estabilizados em biodigestores anaeróbicos apresenta-se como solução promissora na correta estruturação dos solos brasileiros e na diminuição das dependências dos produtos importados. Além de proporcionar uma destinação ambientalmente adequada aos resíduos gerados pela suinocultura. Estimativas realizadas por Cruz, Pereira & Figueiredo (2017), baseadas em resíduos da suinocultura, avicultura e sucroalcooleiro, confirmam a importância desses

segmentos, destacando possuem potencial de suprir 14% de toda a demanda nacional por macronutrientes em 2015, resultando em uma economia de, aproximadamente, 1,1 bilhões de dólares.

Tais biodigestores anaeróbicos são utilizados para tratar resíduos orgânicos dos mais variados fins, como lodo de esgoto, fezes de animais, restos de alimentos, dentre outros. Podendo ser vistos como um reator químico que, na ausência de oxigênio, acelera o processo de decomposição da matéria orgânica. E deste processo são produzidos dois subprodutos, o digestato caracterizado por ser um rico fertilizante orgânico e o biogás um excelente biocombustível.

No entanto, independente da capacidade de aproveitamento do biofertilizante a partir da inevitável decomposição da matéria orgânica, seja em esterqueiras ou em biodigestores, este potencial está sendo desperdiçado. E um dos grandes desafios para o desenvolvimento deste setor é a logística, o custo e a viabilidade de tratamento, transporte e distribuição destes fertilizantes orgânicos (KUNZ *et al.*, 2019).

Na tentativa de contribuir com a redução destas dificuldades, este trabalho propõe um estudo da viabilidade termoeconômica de um biodigestor integrado a um sistema de fertirrigação. A utilização do biogás se insere nesse cenário, como combustível a ser utilizado no transporte e distribuição do digestato para as culturas, reduzindo custos e aumentando o valor agregado aos dois subprodutos do biodigestor. E a Termoeconomia, entendida como a ciência da racionalização, otimização e controle de energia, pode seguramente contribuir com as devidas estratégias para tal sustentabilidade ambiental de sistemas agrícolas.

Tendo em vista essa integração, questiona-se como obter o custo de todos os fluxos que se inter-relacionam nessa estrutura. E a partir disso identificar se o sistema possui autossuficiência energética e se tal implantação é economicamente viável, contribuindo com a amortização do custo de instalação e operação desta tecnologia, bem como agregando mais valor aos seus subprodutos. A problemática da pesquisa baseia-se no problema fundamental de alocação dos custos, podendo ser enunciada da seguinte forma genérica:

“Dado um sistema cujos limites estejam bem definidos a um nível de agregação que especifica os subsistemas que o constituem, como obter o custo de todos os fluxos que se inter-relacionam nessa estrutura”. (LOZANO & VALERO, 1993).

Nesse contexto, a utilização do biogás produzido em biodigestores mostra-se, dentre as fontes alternativas de energia, bastante satisfatória. Trata-se da única tecnologia de geração de energia que transforma passivos ambientais em ativos econômicos, ou seja, um biodigestor ao acelerar a capacidade que os cursos d'água têm naturalmente de decompor a matéria orgânica, transformando dejetos urbanos ou agrícolas em combustível limpo, que contribui com a redução dos gases do efeito estufa. Além de produzir um rico adubo orgânico, líquido, que contém os principais nutrientes que potencializam o crescimento das plantas tornando, assim, as culturas agrícolas mais produtivas. Portanto, o agronegócio precisa de pesquisas nesta temática para continuar a se desenvolver, reduzir custos de produção e amenizar os impactos ambientais.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é realizar um profundo estudo dos conceitos termoeconômicos para analisar a implantação de um sistema integrado, biodigestor/fertirrigação, a fim de avaliar se o sistema em questão possui autossuficiência energética e, por consequência, viabilidade econômica em função do retorno do capital investido.

Para tanto, delineamos os seguintes objetivos específicos:

1. Estudo de caso em que será realizado um monitoramento na propriedade parceira da Universidade e levantamento de dados;
2. Levantamento de dados bibliográficos para orientar a análise dos resultados;
3. Descrição das propriedades termodinâmicos de cada unidade do sistema;
4. Análise dos custos de produção do sistema;
5. Discussão da viabilidade econômica.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A elaboração deste trabalho conta com consultas a literaturas especializadas em fundamentos da digestão anaeróbia, em tecnologias utilizadas em biodigestores, em custos associados aos produtos, no potencial econômico de biofertilizantes, em desempenho de sistemas de irrigação, além de estudos relativos aos cálculos exergéticos e a termoeconomia aplicada a geração, otimização e controle de energia. Tais materiais foram selecionados com o objetivo de viabilizar o desenvolvimento da metodologia, subsidiar as discussões presentes na análise dos resultados, bem como determinar de modo preciso os critérios para a identificação, formulação e solução da problemática proposta.

#### 1.1. Análise Termoeconômica

As pesquisas relacionadas com a Termoeconomia, uma área da ciência que teve origem na década de 1960, em que estudiosos como Szargur, Morris, R. B. Evans, R. A. Gaggioli e M. Tribus combinam princípios da termodinâmica e da Engenharia Econômica, na busca de melhoria de desempenho, aproveitamento dos recursos e racionalização das decisões de investimento. Esses estudos se fortaleceram em 1980, com os trabalhos de Tsatsoronis e Winhold, fazendo surgir novas metodologias, conceitos e definições que vêm sendo amplamente aplicadas e desenvolvida até hoje.

É interessante destacar que esses estudos ganharam mais credibilidade no mesmo período histórico das necessidades de diversificação da matriz energética mundial, em decorrência da crise do petróleo de 1973, influenciada pela instabilidade do preço do barril e das alterações climáticas. Isso favoreceu o surgimento de universos corporativos que buscam formas de reinventar o processo, reduzir gastos e impactos ambientais, além de pesquisas de fontes de energia sustentáveis. Gerando uma nova tendência mundial no sentido de busca de autossuficiência e diversificação energética, tornando-se inclusive padrão de desenvolvimento econômico de nações desenvolvidas.

A respeito destas pesquisas, podemos destacar o trabalho de Palma (2007),

do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. Nesta dissertação, estudou-se o conceito de exergia e suas técnicas em bases teóricas, apresentando uma análise bibliográfica desde o surgimento do conceito até suas aplicações mais recentes. Isso ajudou a identificar os principais autores, e os principais métodos utilizados na análise Exergética. Dentre os autores de destaque consta Szargut (1988), Tsatsaronis e Wnhold (1985), Kotas (1985), Silveira (1998) e Metghalchi (2004).

Silveira (1998) em sua Tese de Livre Docência desenvolve um importante método de otimização termoeconômica para o tratamento de sistemas energéticos. A metodologia desenvolvida serviu de base para inúmeros trabalhos realizados no Brasil, auxiliando na seleção de equipamentos, formulação de modelamento matemático, escolha de modo de operação permitindo, assim, otimizar projetos de plantas térmicas.

Sob grande influência do trabalho de Silveira (1998), Lamas (2009) empregou uma metodologia de alocação dos custos de um sistema térmico. Neste estudo, o autor realizou uma análise termoeconômica da instalação de uma miniestação de tratamento de esgoto com autossuficiência energética. Foram construídos diagramas funcionais Termoeconômicos do sistema e determinados as equações referentes às funções exergéticas e os respectivos valores de exergia. Com isso, avaliou-se os custos de produção dos subprodutos do biodigestor (biogás, digestato e água em condições de reuso) e a viabilidade econômica em função do retorno do capital investido. Em seguida, aplicou-se a mesma metodologia para um sistema comercialmente disponível, concluindo que o sistema com autossuficiência energética era o mais atrativo, possuindo um tempo de retorno do investimento menor do que os modelos tradicionais. As constatações e metodologia desta tese foi a inspiração para a elaboração do tema de pesquisa do trabalho proposto.

No entanto, esta Tese possui algumas limitações no que diz respeito à utilização de algoritmos computacionais para facilitar os cálculos e analisar os fluxos exergéticos de cada equipamento presente no sistema em estudo, conforme relatado pelo próprio autor nas sugestões para trabalhos futuros. Pensando nas alterações na metodologia, necessárias para otimizar a análise, o principal ponto foi adaptar a proposta de Silveira (1998), configurando o problema de alocação dos custos de forma matricial, segundo proposto por Lozano & Valero (1993) e apresentada em Materiais e Métodos.

No artigo desenvolvido por esses dois últimos autores, são apresentadas as bases teóricas da Teoria de Custo Exergético, proposta justamente para unificar os princípios termodinâmicos com os conceitos econômicos. A alocação dos custos é configurada de forma compacta por meio da multiplicação das matrizes de incidência  $[n \times m]$  dos combustíveis ( $\dot{F}$ ), produtos ( $\dot{P}$ ) e perdas ( $\dot{L}$ ), pelo vetor de valor energético ( $\dot{E}$ ) ou exergético ( $\dot{B}$ ) de cada fluxo do sistema. Esta abordagem matricial está melhor explicada na metodologia.

Cardoso (2011) propõe uma análise termoeconômica de implantação de um Biodigestor, tratando-o como um sistema térmico. Foram levantadas vantagens de cunho ambiental e financeiro, tais como competitividade dos produtos agropecuários, formas de descarte de rejeitos de animais, redução da emissão de gases de efeito estufa e aumento da oferta interna de energia. A estratégia sutil adotada pelo autor é a utilização do biogás, não para a produção de eletricidade, frente ao baixo preço da energia elétrica disponíveis no mercado, mas sim em substituição ao Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A relevância desta pesquisa está relacionada com os custos de fabricação do biogás e biofertilizante que, por sua vez, será útil na determinação do custo exergético dos subprodutos do biodigestor, assim como os benefícios econômicos destes subprodutos.

Com vista a redução dos custos de transporte e distribuição dos biofertilizantes para as culturas agrícolas, a longas distâncias. O trabalho de Tavares (2008), utilizando a metodologia de Lamas (2007), avalia dois casos de aproveitamento energético do biogás gerado em uma estação de tratamento de esgoto urbano, por meio da instalação de um sistema de cogeração de energia usando tecnologias baseadas em um conjunto turbina a gás e turbina a vapor (Caso 1) ou motor a gás e turbina a vapor (Caso 2), para produção de eletricidade para consumo próprio e de vapor para secagem do lodo. A secagem se mostra uma alternativa atrativa pela diminuição do peso e volume do digestato, o que acarreta na diminuição dos custos de transporte e distribuição. Essa pesquisa foi utilizada para comparar com a fertirrigação, a fim de avaliar qual possui maior eficiência, e menor custo, do ponto de vista termoeconômico.

Ao avaliar o desempenho ambiental e renovabilidade dos processos de tratamento de esgoto utilizando a análise exergética, Bejarano (2004) rompe as barreiras da termoeconomia, estudando sistemas além da economia. O autor estuda, baseando-se na análise exergética dos trabalhos de Nasholm, Svedberg,

Westermak (1993), três processos de tratamento de esgoto e conclui que aquele com maior eficiência é o reator anaeróbio de fluxo ascendente. A grande contribuição deste trabalho refere-se ao esclarecimento do equipamento de maior eficiência na degradação da matéria orgânica.

Moran e Shapiro (2013) no livro *Princípios de Termodinâmica para Engenharia* fornecem ferramentas conceituais necessárias para a tomada de decisões envolvendo tecnologias relativas a termodinâmica. Este livro enriqueceu os conhecimentos relacionados ao conceito de exergia, da termoeconomia e suas aplicações, bem como tabelas das propriedades termodinâmicas relevantes para a análise.

Foi consultadas também literaturas referentes à revisão termodinâmica, pelo livro *“An Introduction to Thermal Physics”* de Schroeder (2000), que esclarece como representar as propriedades termodinâmicas de um dado sistema. Este livro foi importante para escrever o formalismo matemático por trás do conceito de exergia, apesar de não o ter deduzido diretamente.

## **1.2. Fundamentos da Digestão Anaeróbica**

Com relação aos fundamentos da digestão anaeróbia e no uso do biofertilizante, o conteúdo desenvolvido por Kunz et al. (2019) e demais pesquisadores da Embrapa Suínos e Aves serviu de embasamento atualizado e qualificado. O livro organiza de forma sistematizada o conhecimento produzido pela pesquisa nacional e internacional para gestão, tratamento e uso dos resíduos contendo matéria orgânica e nutrientes. Auxiliando, assim, na delimitação da problemática proposta e esclarecimento de questões ligadas às etapas da digestão, das tecnologias de biodigestores, das tecnologias de purificação do biogás, dos princípios fundamentais de manejo de fertilizantes e de fertilidade do solo.

O livro de Deublein e Steinhauser (2011) é uma das mais conceituadas revisões na área de energia da biomassa, como fontes de energia alternativa, trazendo discussões dos diversos aspectos da produção de biogás como: os microorganismos envolvidos, os processos bioquímicos e parâmetros de controle. Aqui são esclarecidas as soluções tecnológicas de problemas técnicos no campo da digestão anaeróbia de resíduos agroindustriais. Além de se preocupar em descrever detalhadamente todo os processos bioquímicos e os passos a serem seguidos

durante a produção de biogás. Apresenta também bons conselhos sobre maximizar o potencial de produção de biogás, com os sistemas de purificação, agitação e aquecimento que melhoram a performance da codigestão de biodigestores, bem como a purificação do biogás.

Como comentado anteriormente biodigestores anaeróbicos são reator químico que, na ausência de oxigênio, favorece o crescimento de um conjunto de microrganismos que ao consumir os nutrientes presentes na biomassa, acelera o processo de decomposição da matéria orgânica. Estes podem ser utilizados para tratar resíduos orgânicos dos mais variados fins, como lodo de esgoto, fezes de animais, restos de alimentos, dentre outros. A partir de tais processos são desenvolvidos dois subprodutos, o digestato caracterizado por ser um rico fertilizante orgânico e o biogás um excelente biocombustível (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011; KUNZ et al., 2019).

A escolha do modelo do biodigestor a ser utilizado é um dos principais pontos que precisa ser levando em conta, que depende do tipo de substrato a ser tratado, nível de investimento e condições ambientais. Segundo Kunz et al. (2019), os tipos de biodigestores são classificados pelo regime de alimentação, sendo batelada ou contínuo, forma de alimentação como a ascendente ou laminar e pela concentração de sólidos no inteiro do reator, seja digestão sólida (>20%), semissólida (10 a 15%) ou úmida (<10%).

Seguindo essas caracterizações descritas acima, o modelo de biodigestor que mais se adequou ao meio rural brasileiro no gerenciamento dos efluentes da produção animal foi o modelo “canadense”, ou também chamado de “biodigestor de lona”, “biodigestor de lagoa coberta”, ou em alguns casos também encontramos referência a este modelo como “tubular”.

Esse tipo de biodigestor nada mais é do que um tanque escavado no solo, em formato de base retangular de seção trapezoidal, impermeabilizado e coberto por uma membrana geossintética (PVC, PEAD, dentre outros), suficientemente flexível para acumular biogás, como mostrado na Figura 1. É tido como um dos mais simples em nível tecnológico, com facilidade de construção e operação e, em geral, não contém sistema de aquecimento e os sistemas de agitação, quando implantados, são pelo uso de motobombas que circulam o dejetos no inteiro do biodigestor. Seu regime de alimentação é semicontínuo de fluxo laminar de efluentes com baixa concentração de sólidos (cerca de 3%  $m/V$  de sólidos totais), com tempo

de retenção hidráulica (TRH) elevado, o que também exige um volume para instalação elevado. O trabalho de Catrell et al. (2008), estudando dejetos de suínos, relata o rendimento de biogás para esse tipo de reator entre 0,1 e 1,3 ( $m^3_{biogás}/m^3_{reator.dia}$ ).



Fonte: Kunz et al. (2019).

Figura 1. Esquema representativo reator modelo Canadense.

### 1.3. Modelagem termodinâmica da biomassa

Szargut et al. (1988) fornecem formulações originais e precisas sobre o cálculo da exergia química padrão e os apresenta em tabelas de exergia química padrão de diversos elementos e compostos químicos orgânicos e inorgânicos, além de demonstrar o conceito de exergia e suas aplicações em ecologia, economia e indústria. O ambiente de referência (RE) proposto por esses autores foi adotado, bem como os cálculos da exergia química, quando foi comparado com a exergia calculada pela correlação com a DQO e demais estimativas descritas abaixo.

Peduzzi et al. (2016) destacam uma representação das propriedades termodinâmicas da biomassa lignocelulósica de maneira simples e flexível, especialmente adequada no contexto de modelagem de processos de conversão termoquímica. Neste artigo, é descrito um procedimento para representar a entalpia de formação, a energia livre de Gibbs e a exergia da biomassa em termos de sua composição elementar (C, H, O, N, S) e teor de umidade. Os resultados desta pesquisa, Tabela 1, foram utilizados para calcular a exergia dos dejetos suínos e também para comparar com a exergia calculada por base na DQO.

O artigo de Song et al. (2012) apresenta uma correlação simples e unificada para estimar a exergia química específica da matéria orgânica de combustíveis sólidos e líquidos em base seca, derivada de 162 pontos de dados se mostrando confiável e precisa. Os métodos e resultados evidenciados foram adotados para comparar com demais metodologias e desenvolver análises termodinâmicas dos dejetos suínos. Em especial, este trabalho também esclarece como dever ser dividida as contribuições de exergia da matéria orgânica e matéria inorgânica, e que esta última pode ser adequadamente desprezada em comparação com a exergia química específica dos componentes orgânicos.

O artigo de Lozano e Valero (1988) também mostra uma metodologia para calcular a exergia específica ( $b$ ) em processos químicos, porém, utilizando o referencial teórico de Gaggioli et al. (1976) e não de Szargut et al. (1988). Aqui, os autores esclarecem que a escolha do ambiente de referência (RE) deve satisfazer a condição de equilíbrio, o que implica que o Estado Morto ("Dead State") de qualquer sistema com a mesma composição atômica é idêntico.

O artigo desenvolvido por Shieh e Fan (1982) também propõe uma estimativa da exergia específica ( $b$ ) e entalpia específica ( $h$ ) de matérias com estrutura complexa, sendo precisa o suficiente para estimar o conteúdo de energia útil de combustíveis sólidos, líquidos, materiais residuais e biomassa. É particularmente útil para análises e sínteses de processos de conversão de energia com base na primeira e segunda lei da termodinâmica, sendo utilizada para o cálculo da exergia química dos dejetos suínos e digestato.

Já o trabalho de Tai & Goda (1998) estabelece uma correlação entre a exergia química ( $b$ ) da matéria orgânica com base em parâmetros usualmente utilizados na avaliação de águas residuárias, como a Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Teórica de Oxigênio (ThOD) e ao Teor de Carbono Orgânico total (COT). Essas duas correlações (DQO e COT) também foram utilizadas para calcular a exergia de dejetos suínos e comparando-a com as demais metodologias citadas acima.

Khosravi et al. (2013) seguem a mesma linha, propondo uma correlação para estimar a degradação dos recursos ambientais em uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETAR) usando análise exérgica, com base na Demanda Teórica de Oxigênio (ThOD).

Nakashima et al. (2018) apontam que os trabalhos de Tai et al. (1986) e

Khosravi et al. (2013) utilizaram referenciais não convencionais de limitada abrangência teórica. Diante disso, os autores buscaram analisar a geração e uso do biogás no setor sucroenergético baseando-se em uma nova correlação (eq. 20) baseada no referencial teórico de Szargut et al. (1988). Este trabalho serviu de inspiração para propor uma correlação experimental entre a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a exergia de dejetos de suínos para descrição e análise do desempenho de biodigestores, uma vez que este tipo de abordagem é escasso na literatura.

Channiwala e Parikh (2002) desenvolveram uma correlação generalizada, com o objetivo de descrever simultaneamente o poder calorífico de combustíveis sólidos, gasosos e líquidos dentro do intervalo,  $0\% \leq C \leq 92\%$ ,  $0,43\% \leq H \leq 25,15\%$ ,  $0,00\% \leq O \leq 50,00\%$ ,  $0,00\% \leq N \leq 5,60\%$ ,  $0,00\% \leq S \leq 94,08$  e  $0,00\% \leq A \leq 71,4\%$ , onde C, H, O, N, S e A representam os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas de um combustível, respectivamente, em % em base seca. Esses combustíveis incluem material de biomassa aquática, resíduos industriais e resíduos sólidos urbanos e agrícolas, lodo de esgoto, bem como carvão vegetal. Esta estimativa foi utilizada para comparar com outras metodologias presentes na literatura.

Nesta perspectiva de desenvolvimento de equações empíricas para relacionar com o poder calorífico à composição elementar de outros combustíveis, o trabalho de Friedl et al. (2005) figura como a estimativa mais simples e com maior precisão. Esta utiliza dos métodos de regressão de mínimos quadrados ordinários (OLS) e por regressão de mínimos quadrados parciais (PLS). Foi adotada para calcular o fluxo de energia ( $\dot{E}$ ) dos dejetos de suínos, tanto por sua precisão quanto por depender de parâmetros (C, H e N) determinados facilmente em laboratórios de análise elementar do Brasil, uma vez que as análises de oxigênio elementar (O) e enxofre elementar (S) não são frequentemente realizadas.

O trabalho de revisão de Chen (1983) é um dos mais citados no que se refere à análise cinética da digestão anaeróbia de esterco de porco e suas implicações no dimensionamento de biodigestores. A principal contribuição para esta dissertação foi a estimativa do calor específico do substrato ( $c_p$ ), expresso em  $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$ , considerando a concentração de sólidos totais (ST), expresso em  $kg/m^3$ .



#### 1.4. Potencial econômico do Digestato e Biogás

Para avaliar o valor econômico do digestato, deve-se antes estimar a disponibilidade de nutrientes dos resíduos presentes na granja analisada, baseando em dados experimentais (relatados na metodologia) e de forma complementar em um compilado de dados de geração de resíduos disponibilizado pela Instrução Normativa 11 da Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA, 2014).

Tabela 1. Produção de dejetos e quantidade de nutrientes de resíduos suínos para biodigestão anaeróbia.

Categoria de Produção	Produção de dejetos		Consumo de Água	Teor de Nutrientes		
	Unidades	Quantidade	Quantidade	N	$P_2O_5$	$K_2O$
Unidade Produtora de Leitões (UPL)	$m^3 \text{ matriz}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	22,80	35,30	25,7	18	19,4
Unidade de Crescimento e Terminação (UCT)	$m^3 \text{ leitão}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	16,20	27,80	8	4,3	4
Ciclo Completo (CC)	$m^3 \text{ matriz}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	47,10	72,90	85,7	49,6	46,9
Unidade Creche (UC)	$m^3 \text{ leitão}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	2,30	2,50	0,4	0,25	0,35

Produção de dejetos e nutrientes por animal alojado: para unidades de terminação, considerando 3,26 lotes de suínos em terminação por ano; para creches considerando leitões até 28 dias; para unidades de produção de leitões (UPL) e ciclo completo (CC) a unidade é a matriz alojada, considerando 2,35 partos por ano, 12 leitões por parto e 11,5 leitões terminados por matriz por parto.

N- Nitrogênio,  $P_2O_5$  - Pentóxido de Fósforo,  $K_2O$  - Óxido de Potássio. 1 Considerando 2,35 partos por matriz alojada por ano, a produção de 28,2 leitões por matriz alojada por ano e 12 suínos terminados por matriz alojada por ano; 2 Considerando 2,35 partos por matriz alojada por ano e a produção de 28 leitões por matriz alojada por ano; 3 Considerando 3,26 lotes por ano (lotes de 105 dias e 7 dias de intervalo entre lotes).

Fonte: Coroen (2003), Oliveira (2003), Dourmad e Jondreville (2007), Tavares (2012), Tavares et al. (2014), Oliveira et al. (2015), Nicoloso e Oliveira (2016), Miele et al. (2015), e Oliveira et al. (2016).

A referência mais relevante para estimar o benefício econômico do digestato foi o trabalho realizado por Cruz, Pereira, Figueiredo (2017), que são respectivamente, economista, gerente setorial e gerente operacional do Departamento de Indústria Química da Área de Insumos Básicos do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social). Tais pesquisadores destacaram que os nutrientes presentes nos resíduos do agronegócio podem ser aproveitados, possibilitando melhor contorno da economia circular a esse setor da economia brasileira. Estimou-se que o potencial econômico desses dejetos seria de

aproximadamente 1,1 bilhões de dólares, levando em conta apenas os setores da suinocultura, avicultura e sucroalcooleiro que, juntos, forneceriam 14% de toda a demanda por macronutrientes (nitrogênio, potássio e fósforo), em 2015.

Além disso, este estudo, em seus anexos baseados principalmente nas pesquisas da Embrapa Solos e da Embrapa Suínos e Aves, disponibiliza dados que, por sua vez, possibilitam o cálculo do valor do Digestato tendo em vista as devidas conversões deste insumo com aqueles presentes no mercado, como ureia para o nitrogênio, superfosfato triplo (TSP) para fósforo e cloreto de potássio (KCl) para potássio.

O artigo desenvolvido por Miele et al. (2015) conduziu um estudo prospectivo de viabilidade técnica e econômica de cinco alternativas disponíveis no mercado nacional para o correto tratamento e destinação dos efluentes gerados em uma usina de biogás. Os resultados obtidos pela pesquisa serviram de base para esclarecer que o uso do digestato e outros fertilizantes orgânicos podem substituir de maneira eficiente e segura os fertilizantes minerais, em algumas situações, reduzindo o custo de produção na agricultura. Contudo, possui limitações no raio de atuação, economicamente viável, de no máximo 50 km.

Segundo Miele et al. (2015), é importante o desenvolvimento de estudos do uso do biogás como substituto do óleo diesel no transporte dos efluentes gerados a fim de ampliar seu raio de aplicação. Por esse e outros motivos, iremos comparar a fertirrigação usando como combustíveis o biogás, eletricidade e diesel.

Enquanto Olivi et al. (2015) realizam uma análise técnico-econômica sobre o uso agrônomo do biofertilizante gerado pelo levantamento de dados em campo em uma microbacia do Estado de Santa Catarina, demonstrando que o uso do biofertilizante com adubação complementar por fertilizantes minerais é capaz de abater os custos em determinadas culturas e nas despesas totais com os insumos na lavoura. Este artigo também contribuiu com a definição de critérios de caracterização importante para a dosagem a ser aplicada em áreas agrícolas, que está relacionada com a concentração de  $N$ ,  $P_2O_5$  e  $K_2O$ . Além disso, os pesquisadores relataram que o longo período de armazenamento do digestato nas unidades monitoradas ocasiona precipitação do P, reduzindo o teor de  $P_2O_5$  do digestato líquido. Esse relato instigou a verificação das reduções de nutrientes nas lagoas anaeróbias, a fim de avaliar a eficiência, bem como as perdas do digestato armazenado.

### 1.5. Custos associados a planta

A respeito dos custos envolvidos na implantação de biodigestores, o artigo desenvolvido por Calza et al. (2015) levanta dados e apresenta especialistas que foram importantes para o desenvolvimento da metodologia. Neste trabalho, foram identificados os parâmetros utilizados para a mensuração dos custos de construção de três modelos de biodigestores (canadense, indiano e chinês), assim como os custos de produção de energia provenientes do biogás a partir de dejetos da caprinocultura, bovinocultura e suinocultura, no município de Cascavel. Os autores concluem que o modelo canadense possui o menor custo de implantação e os dejetos de suínos foram aqueles com menor custo de produção de energia, variando de 0,015 a 0,050 R\$/KWh.

Cervi (2010) salientou resultados semelhantes, porém mais completos, adicionando os custos de operação e manutenção do biodigestor, bem como a depreciação do capital investido e juros associados, sendo a soma destes iguais a R\$11.465,30 anuais. Vale destacar que o custo de implantação foi de R\$ 63.002,54, incluindo o grupo gerador cuja aquisição custou R\$28.594,00. O autor compara estes custos com os benefícios referentes ao uso da eletricidade, obtida pelo biogás e aos nutrientes do biofertilizante, constatando economia anual de aproximadamente R\$ 8.900,00 e R\$ 14.900,00 associados com a venda de eletricidade e biofertilizante, respectivamente. Foi relatado também que o consumo do volume de biogás produzido pela planta apresentou excedentes, indicando que há necessidade de se analisar alternativas para o uso deste excesso, assim como sua viabilidade técnica e econômica.

Os preços referentes aos combustíveis utilizados nas motobombas de combustão interna foram obtidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2021). Esses valores foram utilizados para comparar com o custo de produção do biogás.

Já os preços dos fertilizantes minerais, como Uréia, Superfosfato Triplo (SFT), Fosfato Monoamônico (MAP), Fosfato Diamônico (DAP) e Cloreto de Potássio (KCl) foram obtidos pela Fertilizer Week (2021), Fertilizer International (2021) e World Bank (2021).

## 1.6. Sistemas de Fertirrigação

Podemos definir a fertirrigação como um procedimento de aplicação simultânea de fertilizante e água por meio de um sistema de irrigação, seja pela técnica de microirrigação por gotejamento, aspersão por carretel ou sob pivô central. Esta é uma das técnicas mais eficazes e econômicas de aplicação de fertilizantes às plantas, que é feita de forma controlada, com maior frequência em função do seu período de desenvolvimento e em menor quantidade, o que eleva a eficiência do uso de nutrientes pelas plantas aumentando por consequência a produtividade das culturas agrícolas (COELHO et al., 2010; VILLAS BOAS, 2016).

O manual de irrigação elaborado por Bernardo et al. (2019) reúne conceitos e conhecimentos atualizados nas áreas de engenharia e manejo de irrigação. Dentre os temas abordados, os autores demonstram as variáveis de custos energéticos de bombeamento de água em um sistema de irrigação. Deste livro, foram obtidos valores de referência quanto ao consumo de energia no bombeamento de águas para diferentes motores (elétricos, diesel e gasolina), bem como o esclarecimento de algumas medidas simples para redução de custos de produção para sistemas de irrigação.

O uso eficiente de sistemas de irrigação está diretamente relacionado ao manejo correto de energia. E referente a isso a coleção 254 e 255 Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR, 2019) esclarece alguns conceitos relevantes, visando ao uso eficiente das águas, energia e redução das tarifas de consumo, tais como: cálculo do custo e consumo de energia, regras para evitar prejuízos de financiamento de sistemas de irrigação, assim como a melhor escolha de equipamentos e tecnologias disponíveis no mercado.

O manual de utilização dos dejetos de suínos desenvolvido por Oliveira et al. (1993) da EMBRAPA Suínos e Aves fornece orientações quanto ao manejo dos dejetos suínos, transformando-os de fonte potencialmente poluentes em alternativas economicamente atrativas para o suinocultor.

Portanto, baseando-se em adaptações de algumas da literatura apresentada foi possível desenvolver a metodologia desta dissertação. Além de embasar as discussões presentes na análise dos resultados, contribuindo com a solução da problemática proposta.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para organizar a temática proposta, este trabalho será pautado nas metodologias presentes na literatura, tais como Lamas et al. (2007) e Lozano & Valero (1993). Analisaremos a termodinâmica da planta pastore de forma matricial, bem como a viabilidade econômica de implantação de um sistema de fertirrigação com autossuficiência energética e a alocação dos custos dos produtos associados.

Então, após levantamento dos materiais teóricos a pesquisa seguirá 4 etapas complementares. A primeira é a etapa caracterizada como estudo de caso, em que será realizado um levantamento de dados e monitoramento na Granja Pastore, localizada no município de Toledo (PR). Esta propriedade suporta mais de 2.100 suínos, em que são produzidos cerca de 495,16 m<sup>3</sup> de biogás diariamente, com concentração média de 58,5% de metano. Sendo gerados, em média, 760,20 kWh de energia elétrica, operando cerca de 10,86 horas por dia, o que reflete em uma produção anual de 277.547MWh. Além disso, são produzidos 19.288,43 m<sup>3</sup> de digestato anualmente, que são transportados e distribuídos para as propriedades de terceiros pelo sistema de fertirrigação de carretel por aspersão.

A Segunda etapa realiza uma análise de 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> lei da termodinâmica do sistema em questão, ressaltando suas ineficiências. Já a terceira busca descrever a alocação dos custos associados aos equipamentos a partir dos fluxos energéticos e exergéticos analisados. E a quarta discutirá se o biodigestor integrado ao sistema de fertirrigação possui autossuficiência energética e se é economicamente atraente. Para isso, faz-se necessário o comprimento da seguinte sequência de passos:

- 1) Identificação dos constituintes do sistema;
- 2) Construção do diagrama funcional termoeconômico;
- 3) Caracterização das amostras;
- 4) Determinação dos estados termodinâmicos;
- 5) Alocação dos custos;
- 6) Análise de viabilidade econômica.

### 4.1 Identificação dos constituintes do sistema

O primeiro passo para a alocação dos custos é a identificação de seus

componentes. O sistema será definido como um conjunto de subsistemas, ou unidades, conectadas umas às outras com o ambiente de referência (tanto ambiente físico, quanto econômico) por meio de outros conjuntos de fluxo de massa, calor e trabalho.

Uma ilustração esquemática dos componentes da planta de digestão anaeróbia integrada ao sistema de fertirrigação é apresentada na Fig. 2, representando a estrutura física do então intitulado “sistema integrado”, ficando estabelecidos as unidades e os fluxos de entrada e saída. A figura 3 representa a estrutura física da planta Pastore, em que caracteriza o sistema real implantado na propriedade analisada.

O sistema monitorado é composto por um biodigestor (A), unidade de dessulfurização biológica (B), sistema de refrigeração (C), sistema de agitação (D), conjunto motor gerador (E), reservatório, produção específica de biogás (F), produção específica de digestato (G), sistema de fertirrigação de carretel por aspersão (H) (presente na propriedade de terceiros) e sistema integrado I.

As unidades F, G e I não estão expressas na Figura 2, mas serão avaliadas posteriormente. Já o reservatório não será avaliado neste trabalho, pela dificuldade de amostragem, uma vez que os nutrientes ficam situados no fundo do reservatório dificultando sua coleta.

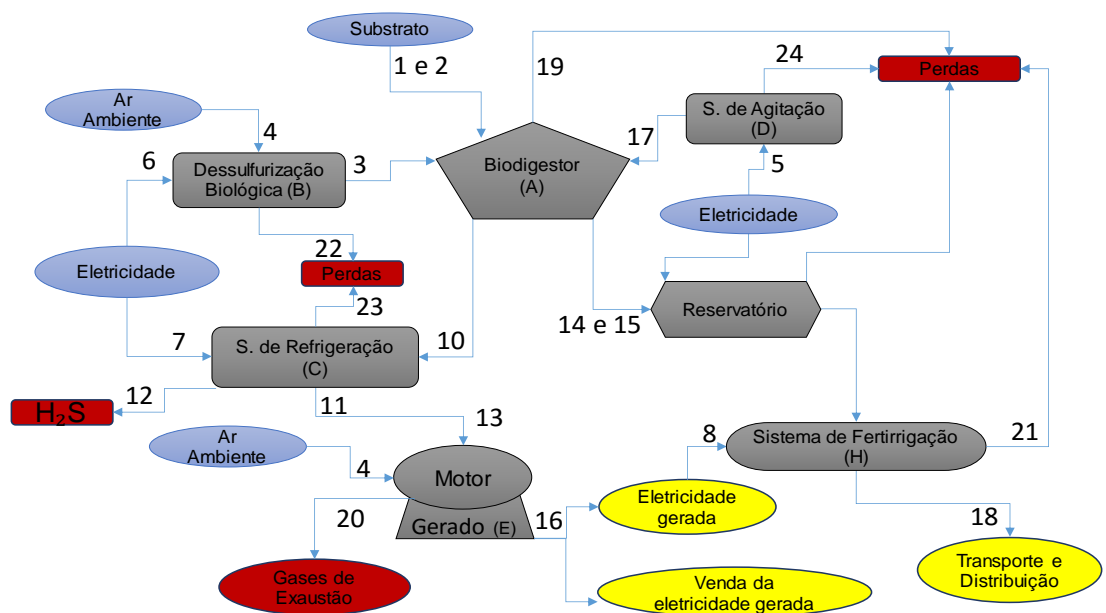


Figura 2. Estrutura física do sistema integrado.

Tabela 17

Fonte: Elaboração própria.

Observe que na Figura 2 os insumos foram representados com a coloração azul, enquanto os produtos que são ejetados do sistema têm uma coloração amarela e as perdas com uma coloração avermelhada. Já os produtos associados ao sistema de fertirrigação, como aumento da produtividade das culturas agrícolas, não serão levados em conta neste trabalho, sendo vistos apenas os seus custos.

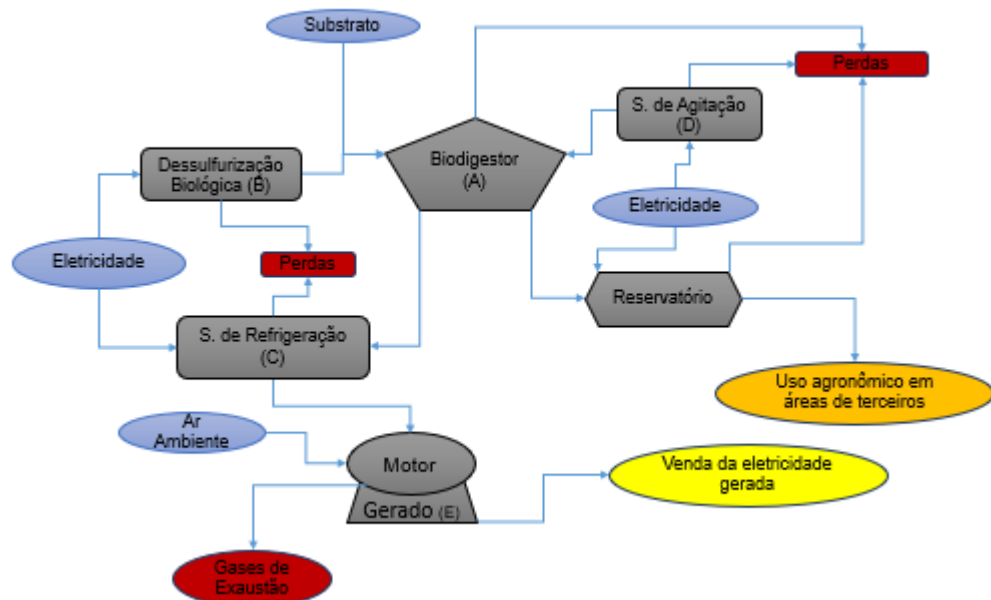


Figura 3. Estrutura física da planta Pastore.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 3, o digestato que sai do reservatório está representado com uma coloração alaranjada, indicando que seu uso não contribui para amortizar o capital investido, ou seja, este é utilizado em áreas de terceiros com deságios de 100% em relação ao valor fertilizante.

O módulo de digestão anaeróbica (A), Figura 4, é responsável por acelerar a decomposição da matéria orgânica, por meio de um conjunto de microrganismos anaeróbicos, transformando a entrada de dejetos fresco de suínos (fluxo 1 e 2) em biogás (fluxo 10) e digestato (fluxos 14 e 15). Vale salientar que, antes de entrar no biodigestor, o dejetos fresco passa por uma caixa de sedimentação que remove o material sólido pesado, como areia e pedra.



Figura 4. Biodigestor da Planta Pastore (Unidade A).

Fonte: Elaboração própria.

Equipado na parte superior do biodigestor está instalado um compressor de ar, chamado de unidade de dessulfurização biológica (B), Figura 5. Neste caso, a presença de oxigênio estimula o crescimento de bactérias oxidantes de sulfeto (e.g. *Thiobacillus* spp. e *Acidithiobacillus* spp.), ocorrendo o processo de dessulfurização biológica de " $H_2S$ " em enxofre elementar (S) (KUNZ et al., 2019). O biogás que sai desse processo (fluxo 10) possui baixa concentração de sulfeto de hidrogênio, é encaminhado para uma unidade de refrigeração (C), Figura 6. Nesta unidade, o biogás é resfriado a fim de reduzir seu teor de umidade a um nível exigido pelo motor gerador para melhorar a eficiência de combustão. Durante esse processo, ocorre a dessulfurização pela etapa de lavagem com água.



Figura 5. Compressor de ar (unidade B).

Fonte: Elaboração própria.





Figura 6. Sistema de refrigeração (Unidade C).

Fonte: Elaboração própria.

Ainda no módulo de digestão anaeróbico, localizado na parte interna do biodigestor, está instalado um sistema de agitação hidráulica (unidade D), Figura 7. Nesta unidade ocorre a recirculação dos dejetos (Fluxo 17) por meio de uma motobomba (modelo: BC-21 R/F2), com a função de distribuir substratos, nutrientes, enzimas e microrganismos no biodigestor, facilitando o contato entre a matéria orgânica e os microrganismos, além de auxiliar na transferência de calor, manter os sólidos em suspensão e liberar o biogás presente no lodo.

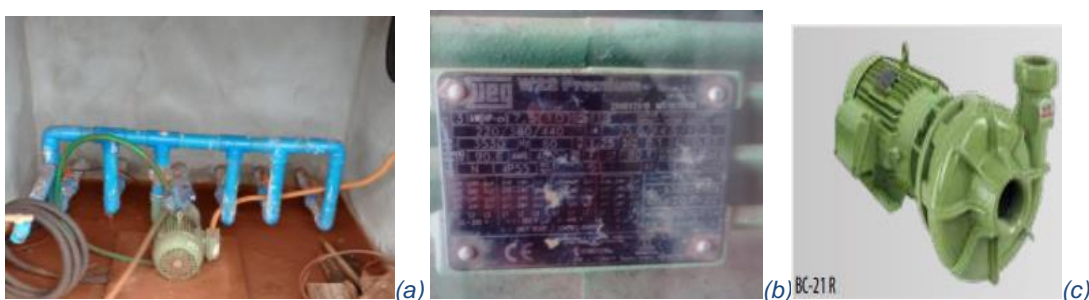


Figura 7. Motobomba de Agitação (Unidade D).

Fonte: Elaboração própria.

Posteriormente, o biogás com baixo teor de enxofre e baixa umidade (fluxo 11), é injetado no motor, Figura 8. Nesta planta, o motor de ciclo Otto, de potência máxima de 75 kW, taxa de compressão de 12:60 mm de 6 cilindros (ER-BR / MWM) foi acoplado ao gerador de energia elétrica (GMWM120 de 120 KVA), produzindo diariamente cerca de 760,20 kWh de eletricidade.



Figura 8. Conjunto Motor gerador (Unidade E).

Fonte: Elaboração própria.

O digestato produzido na unidade de digestão anaeróbia é encaminhado para um reservatório de 5.290 m<sup>3</sup>, sendo transportado e distribuído a cada três meses para as propriedades de terceiros pelo sistema de fertirrigação de carretel por aspersão (Unidade H). A motobomba com 22 kW de potência nominal (Modelo: ASMO 40-160S) do sistema de fertirrigação está conectada à rede elétrica, mas estamos considerando o caso hipotético de integrá-la a eletricidade gerada pela planta de biogás (sistema integrado).



(a)



(b)

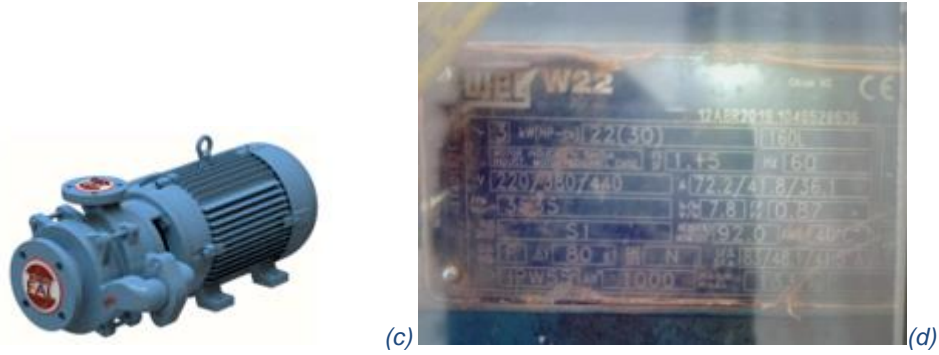


Figura 9. Reservatório (a), carretel de Fertirrigação (b) e motobomba elétrica (c) e (d) (Unidade H).

Fonte: Elaboração própria.

### 4.2. Construção do diagrama funcional Termoeconômico

Tal como sugerido por Silveira (1998) em seu método para modelagem termoeconômica, a construção de um “diagrama funcional termoeconômico” é ferramenta fundamental para realizar esse tipo de análise. Esse diagrama baseia-se na estrutura física do sistema integrado, figura 2, sendo acrescentado de fluxos que interagem com cada unidade da planta e que representam os fluxos energéticos ( $\dot{E}$ ) e exergeticos ( $\dot{B}$ ) de cada unidade.

A relação entre essa estrutura física do sistema com os seus respectivos fluxos de energia ( $\dot{E}$ ) e exergetia ( $\dot{B}$ ) foi configurada por meio de uma Matriz de Incidência  $A = [n \times m]$ , em que “n” é o número de subsistemas e “m” o número de fluxos que ocorre entre os subsistemas, conforme proposto por Lozano & Valero (1993).

Logo, a matriz de incidência (A), que representa a estrutura física da figura 2, pode ser visualizada na eq. (1).

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} i \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \\ H \\ I \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{1}$$

Os elementos da matriz " $a_{ij}$ " assumem o valor +1 se os fluxos entram no subsistema " $i$ "; -1 se os fluxos saem do subsistema " $i$ "; e 0 se os fluxos não tem nenhuma relação com o subsistema " $i$ ".

Note na eq. (1) que o biogás sem nenhum tratamento (fluxo 9), o fluxo de " $H_2S$ " (fluxo 12), o fluxo de " $CH_4$ " (fluxo 13), as perdas de energia do biogás (fluxo 25) e digestato (fluxo 26), quando estes são considerados separadamente, não estão apresentados na estrutura física do sistema, figura 2. O motivo é que estes fluxos servem como comparação para analisar a eficiência dos sistemas de dessulfurização, motor gerador, produção de biogás e produção de biofertilizante, respectivamente.

Estamos levando em conta a hipótese do modelo de regime permanente, ou seja, de operações que tende ao equilíbrio. No estado estacionário, será possível descrever a energia e exergia, da seguinte forma:

$$A \times \dot{E} = 0 \text{ (conservação da energia)} \quad (2)$$

$$A \times \dot{B} = \dot{D} \quad (3)$$

A equação (2) exprime o princípio de conservação da energia e a equação (3) garante que a entropia irá aumentar, pela criação de entropia nova, representada pela destruição de exergia em um subsistema " $i$ " ( $\dot{D}$ ), devido às suas irreversibilidades internas (LOZANO & VALERO, 1993).

Um ponto importante a se considerar é que quanto mais detalhada for a Matriz de Incidência melhor será a possibilidade de analisar as causas de ineficiência da instalação. Para isso, será necessário realizar mais medições, o que significa mais cálculos complexos do diagnóstico do vetor D necessitando, portanto, de um ótimo nível de agregação que, por sua vez, dependerá dos objetivos da análise (LOZANO & VALERO, 1992).

Quanto à estrutura produtiva, segundo Tsatsaronis (1984), para definir uma função produtiva particular que contribui com o alcance do objetivo final de produção, devemos indicar claramente todos os fluxos ou combinação de fluxos dos produtos de uma unidade ( $\dot{P}$ ), das fontes ou combustíveis consumidos ( $\dot{F}$ ) e quais fluxos são perdidos ( $\dot{L}$ ).

Será possível especificar o balanço de energia e exergia da seguinte forma:

$$\dot{F} - \dot{P} - \dot{L} = 0 \text{ (Energia)} \quad (4)$$

$$\dot{F} - \dot{P} - \dot{L} = \dot{D} \text{ (Exergia)} \quad (5)$$

Podemos escrever as matrizes referentes às entradas ( $A_F$ ), saídas como produtos ( $A_P$ ) e saídas como perdas ( $A_L$ ), conforme equações (6), (7), (8) e (9).

$$A[n \times m] = A_F - A_P - A_L \quad (6)$$

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
A	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0
G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Partindo dessas matrizes podemos escrever as seguintes equações que

permitem executar as devidas análises energéticas (Análises de 1ª lei), relativas aos fluxos energéticos ( $\dot{E}$ ), e exergéticas (Análises de 2ª lei), relativas aos fluxos exergéticos ( $\dot{B}$ ), da planta.

Análise de 1ª Lei:

$$\dot{F}^{1ªLei} = A_F \times \dot{E} \quad (10)$$

$$\dot{P}^{1ªLei} = A_P \times \dot{E} \quad (11)$$

$$\dot{L}^{1ªLei} = A_L \times \dot{E} \quad (12)$$

$$\eta_i^{1ªLei} = \frac{P^{1ªLei}}{F^{1ªLei}} \quad (13)$$

$$\kappa_i^{1ªLei} = \frac{1}{\eta_i^{1ªLei}} \quad (14)$$

Análise de 2ª Lei:

$$\dot{F} = A_F \times \dot{B} \quad (15)$$

$$\dot{P} = A_P \times \dot{B} \quad (16)$$

$$\dot{L} = A_L \times \dot{B} \quad (17)$$

$$\dot{I}_i = \dot{L} + \dot{D} \quad (18)$$

$$\eta_i = 1 - \frac{\dot{I}_i}{\dot{F}_i} = \frac{\dot{P}}{\dot{F}} \quad (19)$$

$$\kappa_i = \frac{1}{\eta_i} \quad (20)$$

$$Y_{D_i}^* = \frac{(Taxa \ de \ destruição \ de \ exergia \ da \ unidade)}{(Taxa \ de \ destruição \ de \ exergia \ total)} = \frac{\dot{D}_i}{\dot{D}} \quad (21)$$

Aqui, o expoente “1ªLei” referem-se às análises energéticas, assim “ $\eta_i^{1ªLei}$  e  $\kappa_i^{1ªLei}$ ” às eficiências e custos energéticos. Enquanto que “ $\eta_i$  e  $\kappa_i$ ” são as eficiências e custos em base de exergia. O termo “ $\dot{I}_i$ ” é a taxa de irreversibilidade de cada unidade do sistema.

Ademais, a taxas de potencial de melhoria ( $\dot{I}P_i$ ) de cada unidade da planta de biogás foi calculada usando a eq. (22), conforme Hepbasli (2008) e Barati et al. (2017). Este parâmetro é utilizado para identificar as possíveis melhorias dos componentes da planta de biogás da propriedade.

$$\dot{I}P_i[kW] = (1 - \eta_i)(\dot{F}_i - \dot{P}_i) \quad (22)$$

### 4.3. Caracterização das amostras e determinação dos estados termodinâmicos

A biomassa de entrada é constituída por uma mistura de água, fezes, urina, resto de alimento e pelo animal. Como este resíduo possui uma alta variabilidade, algumas generalizações serão consideradas para representar sua composição.

Nesse sentido, a Demanda Química de Oxigênio (DQO) está associada com as concentrações de matéria orgânica presentes na biomassa, que também é representada pela composição elementar de Carbono orgânico (C), Hidrogênio (H), Nitrogênio orgânico (N), Oxigênio (O) e Enxofre (S). Além do mais, o Nitrogênio amoniacal ( $N-NH_4$ ), Pentóxido de Fósforo ( $P_2O_5$ ) e Óxido de Potássio ( $K_2O$ ) são os representativos dos compostos inorgânicos, declarados como óxidos conforme sugerido por Palma (2019).

A medição desses parâmetros físico-químicos segue os métodos oficiais de análise da “Association of Official Agricultural Chemist” (AOAC), 20. ed. (2016). A Tabela 2 ilustra os parâmetros utilizados com seus respectivos métodos especificados.

Tabela 2. Parâmetros físico-químicos analisados.

Parâmetros	Unidades	Método utilizado
Vazão	m <sup>3</sup> /s	Produção específica de dejetos (m <sup>3</sup> /animal.dia)
Densidade	kg/m <sup>3</sup>	Densímetro
Sólidos Totais (ST)	%	Gravimétrico
Sólidos Fixos (SF)	%	Gravimétrico
Sólidos Voláteis (SV)	%	Gravimétrico
Umidade	%	Gravimétrico
Potência Elétrica	kW	Painel de controle
Pressão	Mpa	Manômetro
Temperatura	°C	Termopar tipo J
Concentrações de $CH_4, CO_2, CO, O_2$ e $H_2S$	%	Landtec gem 5000
DQO	mg/l	Colorimétrico

Composição elementar (C, H, N, O, S, Cinza (A))	%	Literatura
$N - NH_4$	g/l	Titulométrico
$P_2O_5$	g/l	Colorimétrico
$K_2O$	g/l	Espectrofotometria
pH	-	Eletrométrico
Ar ambiente	%	Literatura

A precisão do Landtec gem 5000 é  $\pm 0.7\text{ppm}$  ou  $\pm 10\%$ .

As Análises denominadas “Ultimate analysis e Proximate analysis”, foram feitas na central analítica do departamento de química na Universidade Federal de São Carlos (DQ-UFSCar).

Fonte: Elaboração própria.

Os fluxos energéticos ( $\dot{E}$ ) e exergéticos ( $\dot{B}$ ) multiplicados pelas devidas matrizes ( $A, A_F, A_P, A_L$ ), nas equações (3, 10, 11, 12, 15, 16 e 17), representam as características termodinâmicas de cada fluxo que inter-relaciona na estrutura física do sistema. Estes consideram fluxos de massa ( $\dot{m}$ ) dados em kg/s que entram e saem de cada subsistema, além do valor específico de energia ( $e_j$ ) e exergia ( $b_j$ ), dadas em kJ/kg. Logo, suas unidades serão dadas em kW [kJ/s], conforme equações (23) a (25).

$$\dot{E}_j [kW] = \dot{m} * e_j \quad (23)$$

$$\dot{B}_j [kW] = \dot{m} * b_j \quad (24)$$

$$\dot{E}_{eletricidade} [kW] = \dot{B}_{eletricidade} = \text{Potência elétrica} \quad (25)$$

A eletricidade é uma forma de energia de alta qualidade, portanto, a exergia específica elétrica ( $b_{eletric}$ ) é exatamente igual a energia específica elétrica ( $e_{eletric}$ ) (Wall, 1997). Por esse motivo, escrevemos a equação (25), em que todos os fluxos de exergia ( $\dot{B}_j$ ) requeridos ou gerados por uma dada unidade da planta referentes à eletricidade, são iguais aos seus fluxos energéticos ( $\dot{E}_j$ ).

A energia ( $e_j$ ) e exergia ( $b_j$ ) específica dos demais fluxos da planta são calculadas por base nas equações simplificadas (26.1, 29, 30.2, 30.8 e 37.2) e estarão apresentadas na tabela 17 (tópico: “Fluxos de energia e exergia da planta”).



$$e_j \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = \Delta h_f^\circ + c_p(T - T_0) \quad (26)$$

Essa equação (26) se traduz no poder calorífico inferior ( $PCI_i$ ) de um dado fluxo da planta ( $j$ ), como eq. (26.1).

$$e_j \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = \sum_{i=1}^n CC_i[\%] \cdot PCI_i \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (26.1)$$

O poder calorífico inferior ( $PCI_i$ ) do biogás ( $CH_4, CO_2, CO, O_2$  e  $H_2S$ ) e compostos inorgânicos (N, P, K) expostos na Tabela 2 foram determinados multiplicando a concentração comum de cada substância ( $CC_i$ ), dada em %, pelo valor tabelado presentes na Tabela 4.

Já o “ $PCI$ ” dos compostos orgânicos ( $PCI_{org.}$ ) do substrato e digestato foram estimados e comparados pelos métodos baseados na composição elementar (C, H, N, O, S e A) de Channiwala & Parikh (2002), Boie (1953) e Friedl et al. (2005), conforme respectivas equações (27, 28, 29):

$$PCI_{org.} = 349,1 \cdot C + 1.178,3 \cdot H - 15,1 \cdot N - 103,4 \cdot O + 100,5 \cdot S - 21,1 \cdot A \quad (27)$$

$$PCI_{org.} = 351,70 \cdot C + 1.162,49 \cdot H + 62,80 \cdot N - 110,95 \cdot O + 104,67 \cdot S \quad (28)$$

$$PCI_{org.} = 3,55 \cdot C^2 - 232 \cdot C - 2230 \cdot H + 51,2 \cdot (C \cdot H) + 131 \cdot N + 20.600 \quad (29)$$

O cálculo da exergia total de um dado processo é baseado nos componentes: físicos ( $b_{ph}$ ), químicos ( $b_{ch}$ ), potenciais ( $b_p$ ) e cinéticos ( $b_k$ ), conforme exposto na equação (30).

$$b_j = b_{total} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = b_{ph} + b_{ch} + b_{pot} + b_k \quad (30)$$

No entanto, a análise de exergia deste estudo considera apenas os componentes físicos e químicos, visto que outras interações de trabalho, como a

potencial e cinética são desprezíveis em comparação. Assim,

$$b_j = b_{total} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = b_{ph_j} + b_{ch_j} \quad (30.1)$$

A exergia física ( $b_{ph_j}$ ) será calculada pela equação (30.2), conforme proposto por Szargut et al. (1989).

$$b^{\circ}_{ph_j} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = c_{p_j} \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (30.2)$$

Onde  $c_p$  é o calor específico a pressão constante,  $T_0$  é a temperatura de referência (298,15 K) e  $T$  é a temperatura medida em cada unidade do sistema.

Os calores específicos do biogás e compostos inorgânicos nos diferentes pontos da planta foram medidos como segue:

$$c_{p_j} \left[ \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right] = \sum_i^n C C_i [\%] \cdot c_{p_i} \quad (31)$$

Já os calores específicos dos componentes orgânicos seguem a estimativa de Chen (1983), eq. (32).

$$c_{p_{org}} \left[ \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right] = 4,19 - 0,00275 ST \quad (32)$$

Ainda segundo Szargut et al. (1989), a exergia química ( $b_{ch}$ ) é determinada pela equação (30.3).

$$b^{\circ}_{ch} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = -\Delta G^{\circ}_r + (\sum b^{\circ}_{ch} \text{ produtos} - \sum b^{\circ}_{ch} \text{ reagentes}) \quad (30.3)$$

Ou ainda,

$$b^{\circ}_{ch} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = -\Delta G^{\circ}_r + RT_0 \ln \left( \frac{x^{\omega}_{reagentes}}{x^{\omega}_{produtos}} \right) \quad (30.4)$$

Onde  $\Delta G^{\circ}_r$  é a Energia Livre de Gibbs padrão da reação,  $x$  é a fração molar,  $b^{\circ}_{ch_i}$  é a exergia química padrão e  $\omega$  é o coeficiente estequiométrico do balanceamento da reação de combustão.



**GLP** 51,67 (48,50,2)\* - 49,21

O GLP é constituído por 48% de Propano, 50% de Butano e 2% de Pentano. As frações molares ( $x$ ) de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  são do ar ambiente conforme Szargut et al. (1989). Os “ $\Delta G^{\circ}_f$ ” foram coletados em Atkins & Jones (2012) e Moran & Shapiro (2013). E os valores de “ $b_{ch}$ ” foram calculados pela equação (19.4), dividida pela massa molar (MM).

Fonte: Adaptado de Szargut et al. (1988).

A exergia química para uma mistura ideal ( $b_{ch}$ ), também pode ser calculada pela equação (30.7), proposta por Szargut et al. (1989).

$$b^{\circ}_{ch_j} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = \sum_{i=1}^n [x_i b^{\circ}_{ch_i} + x_i \ln(\gamma_i x_i)] \quad (30.7)$$

Esta eq. (30.7) foi utilizada para estimar a exergia química dos componentes inorgânicos (N, P e K) e o biogás, assumindo a exergia química padrão ( $b^{\circ}_{ch}$ ) já tabeladas, proposta por Szargut et al. (2007) e ao portal Exergoecology de Valero et al. (2018), com temperatura e pressão de referência de 298,15 K e 1 atm. As demais propriedades termodinâmicas, como entalpia (H), energia livre de Gibbs (G) e calor específico a pressão constante ( $c_p$ ) foram consultadas em Atkins & Jones (2012) e Moran & Shapiro (2013) e estão todas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades de Estado.

Componentes	Massa Molar [g/mol]	PCI [kJ/mol]	$b^{\circ}_{ch}$ [kJ/mol]	$\Delta H^{\circ}_f$ [kJ/mol]	$\Delta G^{\circ}_f$ [kJ/mol]	$C_p$ [kJ/kg*K]
$NH_4^+$	18,04	368,45	382,94	-132,51	-79,31	79,90
$P_2O_5$	141,94	188,11	767,70	-1493,01	-1349,82	105,86
$K_2O$	94,20	350,04	413,10	-361,74	-319,03	81,58
$CH_4$	16,04	802,30	831,20	-74,81	-50,72	2,20
$CO_2$	44,01	0,00	19,48	-393,51	-394,36	0,84
$CO$	28,01	282,98	274,71	-110,53	-137,17	1,04
$O_2$	32,00	0,00	3,97	0,00	0,00	1,83
$H_2S$	34,08	946,61	946,61	-20,63	-33,56	1,00
$NH_3$	17,03	316,62	337,90	-46,11	-16,45	2,06
$H_2O_{(l)}$	18,02	-44,01	0,90	-285,83	-237,13	4,19
$H_2O_{(g)}$	18,02	0,00	9,50	-241,83	-228,57	1,87
$N_2$	14,00	0,00	0,72	0,00	0,00	1,04

Fonte: Atkins & Jones (2012); Moran & Shapiro (2013); Valero et al. (2018) Szargut et al. (2007).

Ademais, a mistura tanto do biogás quanto do substrato e digestato foi

considerada solução ideal. Nesse caso, o coeficiente de atividade ( $\gamma_i$ ) é igual a 1 e a exergia química fica determinada pela equação (30.8).

$$b^{\circ}_{ch_j} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = \sum_{i=1}^n [x_i b^{\circ}_{ch_i} + x_i \ln(x_i)] \quad (30.8)$$

As frações molares dos componentes inorgânicos e biogás ( $x_i$ ) foram calculadas a partir do quociente da molaridade do componente ( $M_i$ ) pela molaridade total ( $M_{total}$ ). A molaridade dos componentes depende, por sua vez, da concentração comum ( $CC_i$ ), medida experimentalmente dividida pela massa molar ( $MM_i$ ), tal como expresso nas equações (35) e (35.1).

$$M_i \left[ \frac{Mol}{l} \right] = \frac{C_i}{MM_i} * 10^3 \quad (35)$$

$$x_i = \frac{M_i}{M_{total}} \quad (35.1)$$

A massa molar dos componentes orgânicos ( $MM_{i=1}$ ) foi determinada com base na composição elementar média do estrume suíno de  $CH_{0,141}O_{0,552}N_{0,077}S_{0,014}$  (ZHANG et al., 2014), conforme equação (36):

$$MM_{i=1} = 12,011 * C + 1,00784 * H + 15,999 * O + 14,0067 * N + 32,065 * S \quad (36)$$

No entanto, os dejetos de animais não possuem todos os compostos explícitos, como é o caso da matéria orgânica. Para esse caso, utilizaremos a correlação, equação (37), proposta por Nakashima et al. (2019), desenvolvida para determinar a exergia química específica de efluentes, relacionando-a com a Demanda Teórica de Oxigênio ( $ThOD_i$ ) que, por sua vez, está associada a concentração de matéria orgânica do substrato.

$$b^{\circ}_{ch_{org.}} \left[ \frac{J}{l} \right] = 14,56 ThOD_i \left[ \frac{mgO_2}{l} \right] \quad (37)$$

Tendo em vista que os valores experimentais de DQO possuem uma boa correspondência com os de Demanda Teórica de Oxigênio ( $ThOD_i$ ), com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da ordem de 0,92, então, foi considerado que esses valores são iguais ( $ThOD \approx DQO$ ) (Baker et al. (1999) *apud* Nakashima, 2019). Assim, a equação (37) se torna:

$$b^{\circ}_{ch_{org.}} \left[ \frac{J}{l} \right] = 14,56 DQO_i \left[ \frac{mgO_2}{l} \right] \quad (37.1)$$

Como estamos interessados no valor da exergia específica orgânica ( $b^{\circ}_{ch_{org.}}$ ), dada em kJ/kg, é necessário dividir o resultado da eq. (37.1) pela concentração de sólidos totais (ST) presentes nos dejetos. Assim, temos

$$b^{\circ}_{ch_{org.}} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = \frac{b^{\circ}_{ch_{org.}} \left[ \frac{J}{l} \right]}{ST \left[ \frac{g}{l} \right]} \quad (37.2)$$

As concentrações do biogás, devidamente normalizadas, representam as frações molares ( $x_j$ ) dos componentes do biogás. E como o monóxido de carbono ( $CO$ ) e o Sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) foram medidos em parte por milhão (ppm), então, foi realizando a devida conversão em g/l, conforme sugerido por Lorimor et al. (2004).

De forma comparativa, também estimamos a exergia química padrão dos componentes orgânicos com base na análise elementar de Zhang et al. (2014), seguindo os métodos de Peduzzi et al. (2019), Song et al. (2012) e Shieh & Fan (1982). A metodologia de Peduzzi et al. (2019) está resumida na Tabela 5, em que basta multiplicar a concentração elementar pelos pseudos compostos explicitados, enquanto os métodos de Song et al. (2012) e Shieh & Fan (1982) são expostos nas equações (38) e (39).

$$b^{\circ}_{ch_{org.}} = 363,439 \cdot C + 1.075,633 \cdot H + 4,14 \cdot N - 86,308 \cdot O + 190,798 \cdot S - 21,1 \cdot A \quad (38)$$

$$b^{\circ}_{ch_{org.}} = 4,19 \cdot [8.177,8 \cdot C + 27.892,6 \cdot H - 3.173,7 \cdot O + 0,15 \cdot O \cdot (7.837,7 \cdot C + 33.888,9 \cdot H - 4.236,1 \cdot O)] \quad (39)$$

Tabela 5. Resumo dos valores numéricos dos coeficientes do modelo apresentado no estudo de Peduzzi et al. (2016).

Pseudo composto	MM [g/mol]	$\Delta H^{\circ}f$ [kJ/mol]	$\Delta G^{\circ}f$ [kJ/mol]	$B_{ch}$ [kJ/mol]
<b>Carbono C</b>	12,0107	28,89	30,28	440,545
<b>Hidrogênio H</b>	1,008	-25,74	-9,90	108,121
<b>Oxigênio O</b>	15,999	-177,51	-152,65	-150,664
<b>Nitrogênio N</b>	14,007	87,96	111,18	111,545
<b>Enxofre S</b>	32,06	38,76	46,53	593,100
<b>Água ligada</b>	18,01528	$\Delta H^{\circ}f_{H_2O(l)} - 6,438$	$\Delta G^{\circ}f_{H_2O(l)} + 2,294$	3,076
<b>Água livre</b>	18,01528	$\Delta H^{\circ}f_{H_2O(l)}$	$\Delta G^{\circ}f_{H_2O(l)}$	-0,900

As propriedades ( $\Delta H^{\circ}f_{H_2O(l)}$  e  $\Delta G^{\circ}f_{H_2O(l)}$ ) podem ser encontradas nas tabelas de propriedades termodinâmicas, no caso 285,830 kJ mol<sup>-1</sup> e 237,141 kJ mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, conforme relatado por Atkins (2012).

Fonte: Peduzzi et al. (2016).

O cálculo da potência hidráulica ( $P_H$ ) do sistema de agitação (fluxo 17 da figura 2) e fertirrigação (fluxo 18 da figura 2), deve levar em conta a quantidade de matéria seca dos dejetos, para determinar o peso específico do fluido ( $Y$ ), a eficiência da motobomba, a vazão de dejetos no bico do aspersor ( $Q$ ) e a altura manométrica ( $H$ ) conforme equação (40) (OLIVEIRA et al., 1993).

$$P_H[kW] = \frac{Q \cdot Y \cdot H}{\eta_{bomba}} \quad \text{onde,} \quad (40)$$

$Q$  = Vazão de dejetos no ponto final da tubulação [ $m^3/s$ ];

$Y$  = Peso específico do fluido [ $N/m^3$ ];

$H$  = Altura manométrica total [ $m$ ];

$\eta_{bomba}$  = eficiência da bomba [%].

Altura manométrica ( $H$ ) é a energia que a bomba transmite ao fluido para transportá-lo a uma determinada vazão até o ponto final designado pelo sistema. Esta pondera todas as perdas de carga nas tubulações, o que representa a resistência que o circuito oferece ao fluido.

No caso do sistema de agitação operando na carga máxima, eq. (40.1), tanto a

vazão ( $Q_{agitação}$ ), eficiência da motobomba (modelo: BC-21 R/F2), quanto à altura manométrica ( $H$ ), foram obtidos pelo fornecedor, que traz a seguinte tabela 6.

$$\dot{E}_{17}[kW] = \dot{B}_{17}[kW] = \frac{Q_{agitação} \cdot Y \cdot H}{\eta_{bomba}} \quad (40.1)$$

Tabela 6. Características hidráulicas da motobomba, conforme painel da figura 4 (b).

MODELO	Potência Nominal (kW)	Rendimento (%)	Altura Manométrica (m.c.a.)	Vazão máxima (m <sup>3</sup> /h)
BC-21 R/F 2	7,5	90,6	20	86,4

Fonte: Fornecedor.

O consumo de energia do sistema de fertirrigação foi medida no painel de consumo antes ( $CE_{Antes}$ ) e após ( $CE_{após}$ ) a fertirrigação dos 5.290 m<sup>3</sup> de biofertilizante líquido. Isso permitiu determinar a potência requerida real da motobomba, eq. (41.1) e assim estimar a altura manométrica desse sistema, por base na eq. (40.2).

$$H = \frac{\dot{E}_{18} \cdot \eta_{bomba}}{Q_{agitação} \cdot Y} \quad (40.2)$$

$$CE_{SF} = CE_{após} - CE_{Antes} \quad (41)$$

$$\dot{E}_{18}[kW] = \dot{B}_{18}[kW] = \frac{CE_{SF} [kWh]}{t_{sf} [h]}, \quad \text{onde,} \quad (41.1)$$

$CE_{SF}$  é o consumo de energia do sistema de fertirrigação;

$t_{sf}$  é o tempo de funcionamento do sistema de fertirrigação.

$$t_{sf} [h] = \frac{V_R}{Q_{SF}}, \quad \text{onde,} \quad (41.2)$$

$V_R$  é o volume do reservatório, o qual representa o volume de dejetos irrigados;

$Q_{SF}$  é a vazão de dejetos no bico do aspersor.

Essa vazão de dejetos no bico do aspersor ( $Q_{SF}$ ) foi obtido pela tabela de controle do Carretel (TURBOMAQ 75/ GS), ilustrado na figura 10. No caso, considerando os 12,5 mm de lâmina de aplicação, com 50 m/h de velocidade de



recolhimento, chegando-se em uma vazão de 33,6 m<sup>3</sup>/h.

TURBOMAQ 75									
Ø dos bocais	18	18	20	20	20	22	22	22	mm
Pressão saída	4,5	5,0	4,0	4,5	5,0	4,0	4,5	5,0	Kgf/cm <sup>2</sup>
Vazão	25,7	27,2	30,0	31,8	33,6	36,2	38,4	40,5	m <sup>3</sup> /h
Espaç. Recomendado	48	48	48	54	54	54	54	54	metros
Pressão na entrada da máquina	GS/200	6,4	7,1	6,6	7,4	8,2	7,6	8,6	Kgf/cm <sup>2</sup>
	GS/220	6,6	7,3	6,8	7,6	8,5	8,0	8,9	
	GS/250	6,9	7,6	7,1	8,0	8,9	8,4	9,5	
	GS/270	7,0	7,8	7,4	8,2	9,2	8,8	9,8	
	GS/300	7,3	8,1	7,7	8,6	9,6	9,2	10,4	
Lâmina a Aplicar (mm)	Velocidade de Recolhimento (m/h)								Largura = 1790 mm Comprimento = 4665 mm Altura = 2495 mm Peso sem água = 1.100 Kg Peso com água = 2.060 Kg  Faixa irrigada até 325 m  Aspensor Setorial Royal  Tubo de polietileno 75 mm Ø PN-8
5	107	113	125	118	124	134	142	150	
7,5	71	76	83	79	83	89	95	100	
10	54	57	63	59	62	67	71	75	
12,5	43	45	50	47	50	54	57	60	
15	36	38	42	39	41	45	47	50	
17,5	31	32	36	34	36	38	41	43	
20	27	28	31	29	31	34	36	38	
22,5	24	25	28	26	28	30	32	33	
25	21	23	25	24	25	27	28	30	
27,5	19	21	23	21	23	24	26	27	
30	18	19	21	20	21	22	24	25	
32,5	16	17	19	18	19	21	22	23	
35	15	16	18	17	18	19	20	21	
40	13	14	16	15	16	17	18	19	
45	12	13	14	13	14	15	16	17	
50	11	11	13	12	12	13	14	15	
55	10	10	11	11	11	12	13	14	
60	9	9	10	10	10	11	12	13	

Figura 10. Painel de controle do Aspensor Setorial Royal (TURBOMAQ 75/ GS).

#### 4.4. Alocação dos custos dos produtos associados a planta

Dentre os custos associados ao sistema, temos: custos de produção do biofertilizante ( $c_1 = c_{Bf}$ ), custos de produção do biogás ( $c_2 = c_{Bg}$ ) e custo da eletricidade gerada ( $c_3 = c_{el}$ ). Para determinar esses custos utilizaremos o balanço da taxa de custo, tal como evidenciado nas equações (42 a 44) (MORAN & SHAPIRO, 2013; SOUZA et al., 2013; LAMAS, 2007).

$$c_{Bg} = \left( \frac{I_{TBG} \cdot f}{t_b \cdot \dot{B}_{biogás}} + C_{O\&M}Biodigestor + C_{O\&M}Filtro + C_{O\&M}Refrigerador + C_{O\&M}M.Agitação \right) f p_{Bg} \quad (42)$$

$$c_{Bf} = \left( \frac{I_{TB} \cdot f}{t_b \cdot \dot{B}_{digestato}} + C_{O\&M}Biodigestor + C_{O\&M}Filtro + C_{O\&M}Reservatório + C_{O\&M}M.Agitação \right) f p_{Bf} \quad (43)$$

$$c_{el} = \frac{I_{el} \cdot f + C_{O\&M}MotorGerador}{t_{mg} \cdot \dot{B}_{pot.eletric}} + c_{Bg} \cdot \frac{\dot{B}_{biogás}}{\dot{B}_{pot.eletric}} \quad (44)$$

Onde,

$f$  = Fator de anuidade;  
 $I_{TBG}$  = Investimento total realizado no sistema para o biogás;  
 $I_{TB}$  = Investimento total realizado no sistema para o biofertilizante;  
 $I_{el}$  = Investimento total realizado no conjunto motor gerador;  
 $t_b$  = Período de funcionamento do biodigestor;  
 $t_{sf}$  = Período de funcionamento do sistema de fertirrigação;  
 $fp_{Bf}$  = Fator de produção do biofertilizante;  
 $fp_{Bm}$  = Fator de produção do biogás;  
 $C_{O\&M}Motor$  = Custo de operação e manutenção do Motor de combustão interna;  
 $C_{O\&M}Biodigestor$  = Custo de operação e manutenção do biodigestor;  
 $C_{O\&M}Compressor$  = Custo de operação e manutenção do compressor de ar;  
 $C_{O\&M}Fertirrigação$  = Custo de operação e manutenção do sistema de fertirrigação.

Os custos de implantação, bem como os custos de operação e manutenção ( $C_{O\&M}$ ) de cada componente da planta foram obtidos pelos fornecedores e com o próprio produtor, e estão enfatizados no tópico de resultados e discussões.

Esses custos fixos de operação e manutenção (O&M) incluíram: mão de obra, manutenção preventiva e substituição de rotina de componentes da planta, equipamento de manuseio, matéria-prima, dentre outros.

Os fatores de produção ( $fp_{Bf}$  e  $fp_{Bg}$ ) propostos por Lamas (2007) são as funções de ponderação dos custos dos produtos gerados, com base nas quantidades exergéticas. Estes foram utilizados para avaliar em quanto o custo de produção seria afetado caso o biofertilizante fosse considerado produto útil para amortizar o capital investido. Poderemos determinar qual a contribuição, em porcentagem, de cada subproduto do biodigestor.

Do biofertilizante:

$$fp_{Bf} = \frac{\dot{B}_{digestato}}{\dot{B}_{biogás} + \dot{B}_{digestato}} \quad (45)$$

Do biogás:

$$fp_{Bg} = \frac{\dot{B}_{\text{biogás}}}{\dot{B}_{\text{biogás}} + \dot{B}_{\text{digestato}}} \quad (46)$$

Já o fator de anuidade pode ser calculado da seguinte forma:

$$f = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (47)$$

Onde:

$i$  = Taxa de juros (% a.a.).

$n$  = número de períodos para saldar o principal.

Para obter os custos dos produtos dos dois sistemas, seguindo as equações (42) a (44), foram estabelecidas as seguintes condições de análise: taxas de juros ( $i$ ) de 4, 8, 12 e 16 % a.a. e períodos de amortização ( $n$ ) de 2, 4, 6, 8 e 10 anos. Estas condições estão baseadas nos valores praticados comercialmente, orientados pelo Banco Central do Brasil (BCB, 2021). Além disso, esses valores seguem o comportamento da taxa de câmbio de 1 USD (dólar) = R\$ 5,24 (real brasileiro) (média do ano de 2021).

#### 4.5. Análise de viabilidade econômica do investimento

Tomando como referência os custos energéticos, tanto da eletricidade quanto dos combustíveis fósseis, e os custos com fertilizantes minerais praticados no mercado, elabora-se a equação (48), que relaciona esses custos com o do sistema proposto. São levantados os lucros ( $L$ ) dos produtos associados com a planta (LAMAS, 2007).

$$L_{\text{sistema Integrado}} \left[ \frac{R\$}{\text{ano}} \right] = \{ [(C_j - c_k) \cdot \dot{P}_{SF}] + [(C_{FM} - c_{BF}) \cdot \dot{M}_{SF}] \} \cdot t_{SF} \quad (48)$$

$$L_{\text{planta Pastore}} \left[ \frac{R\$}{\text{ano}} \right] = [(C_j - c_k) \cdot \dot{P}_{mg}] \cdot t_{mg} \quad (48.1)$$

$$j = 1, \quad GLP;$$

$$j = 2, \quad Gasolina;$$

$$\begin{aligned}
 j = 3, & \quad \text{Diesel;} \\
 j = 4, & \quad \text{tarifa de eletricidade.} \\
 k = 1, & \quad \text{Biogás;} \\
 k = 2, & \quad \text{eletricidade gerada}
 \end{aligned}$$

Onde

$\dot{P}_{SF}$  = Potência requerida pelo sistema de fertirrigação;

$\dot{P}_{mg}$  = Potência do motor gerador;

$\dot{M}_{SF}$  = Fluxo de massa requerida pelo sistema de fertirrigação;

$C_e$  = custo com energia referente aos valores praticados pelas concessionárias de energia elétrica e combustível fóssil.

$C_{FM}$  = custo com a compra de fertilizantes minerais disponíveis no mercado;

$t_{SF}$  = tempo de funcionamento do sistema de fertirrigação, em horas por ano.

$t_{mg}$  = tempo de funcionamento do motor gerador, em horas por ano.

A diferença entre o preço de mercado do fertilizante mineral ( $C_{FM}$ ) e custo de produção do biofertilizante ( $C_{BF}$ ), eq. (48), representa o custo evitado na compra de fertilizantes minerais pelo uso do digestato. Logo, estes são valores ilustrativos que permitem comprar diferentes biofertilizantes em uma mesma base (valor em NPK).

As referências de preços de combustíveis e fertilizantes, que serão comparados com os custos dos produtos da planta de biogás, puderam ser obtidas pela ANP (2021), ANEEL (2021) e Fertilizer Week; Fertilizer International; World Bank (2021).

O custo com a compra de fertilizantes minerais disponíveis no mercado ( $C_{FM}$ ) foi estimado a partir dos preços de mercado da Ureia ( $C_{ureia}$ ) com 45% N, do Superfosfato triplo ( $C_{SFT}$ ) com 42% de " $P_2O_5$ " e Cloreto de Potássio ( $C_{KCl}$ ) com 60% " $K_2O$ ", como expresso na eq. (49).

$$C_{FM} = (C_{ureia} \cdot 45\%N) + (C_{SFT} \cdot 42\%P_2O_5) + (C_{KCl} \cdot 60\%K_2O) \quad (49)$$

O fluxo de massa do sistema de fertirrigação ( $\dot{M}_{SF}$ ) foi calculado a partir do compilado de dados de geração de resíduos disponibilizado pela Instrução Normativa 11 da Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA, 2014), ao

passo que o tempo de funcionamento ( $t_{SF}$ ), em horas por ano, leva em conta o volume anual de dejetos ( $V_D$ ) pela vazão no bico do aspersor ( $Q_{SF}$ ).

$$\dot{M}_{SF} = V_D \cdot \rho \quad (50)$$

$$t_{SF} = \frac{V_D}{Q_{SF}} \quad (51)$$

“ $V_D$ ” é o volume de digestato produzido anualmente ( $m^3$ /ano);

“ $\rho$ ” é a densidade dos dejetos ( $kg/m^3$ );

Aliado com a análise da eq. (48), estaremos ponderando outras métricas de desempenho econômico, como valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (IRR) e payback simples (PBS) e descontado (PBP), calculados tal como discutido por Ayodele et al. (2018) e Fernandez-Lopez et al. (2015).

O VPL é a diferença entre as entradas e saídas de caixa futuros descontados a uma taxa de juros apropriada ao longo da vida útil do projeto, ou seja, trazidas para o valor atual. Assim, se o VPL de um projeto prospectivo for positivo significa que ele é economicamente atrativo, porém, se o VPL for negativo, o projeto deve ser rejeitado, pois provavelmente os fluxos de caixa também serão negativos. Este indicativo pode ser calculado usando as seguintes equações,

$$VPL_i = \sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1+i)^n} \quad (52)$$

$$VPL_i = F_0 + \frac{F_1}{(1+i)^1} + \frac{F_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_N}{(1+i)^N} \quad (52.1)$$

$$F_0 = C_{inv} \text{ (Custo de implantação inicial)} \quad (52.2)$$

Onde, “ $F_n$ ” é a diferença entre as receitas e os custos líquido indo do ano zero ( $n = 0$ ) até o número total de anos em estudo ( $N$ ),  $i$  é a taxa de desconto.

Por outro lado, temos a taxa interna de retorno (TIR), uma taxa de desconto nominal que, quando aplicada ao fluxo de caixa de um projeto, torna o VPL de todos esses fluxos igual a zero, como mostrado na eq. (53). Isto é, faz com que os valores das despesas, trazidos ao valor atual, sejam iguais aos valores dos retornos do investimento, também trazidos para o valor presente. Para que um projeto seja tido

como viável financeiramente, a TIR não deve ser menor ou igual a taxa de desconto considerada ( $i$ ).

$$VPL_i = \sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1 + TIR)^n} = 0 \quad (53)$$

Note que o valor da TIR não pode ser obtido analiticamente, requerendo um processo iterativo, devendo utilizar software para avaliar a relação interativa acima, eq. (53). Nesse sentido, vale salientar que todas as análises (da termodinâmica as econômicas) foram desenvolvidas utilizando o software Microsoft Excel, o que possibilitou uma modelagem matemática simples, rápida e acessível.

Já o período de retorno (payback) é o tempo (em anos) que os rendimentos acumulados se tornam iguais a soma dos custos de implantação, operação e manutenção, representando o período em que o investimento se torna rentável. Este foi determinado usando as duas formulações de payback simples (PBS) e descontado (PBD).

$$PBS = \frac{\text{soma dos custos de implantação e operação \& manutenção}}{\text{Soma dos fluxos de caixa}} \quad (54.1)$$

$$PBS = \frac{C_{\text{implantação}} + \sum_{n=0}^N C_{nO\&M}}{\sum_{n=0}^N (C_{\text{evitado}})} \quad (54.2)$$

$$C_{\text{evitado}} = \text{Receitas}(n) - \text{Custos}_{\text{produção}}(n) \quad (54.2.1)$$

Enquanto que o payback descontado considera os custos ( $C_n$ ) e fluxos de caixa ( $F_n$ ) trazidos para o valor presente (VP), conforme eq. (54.3).

$$PBD = \frac{\sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1 + i)^n}}{\sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1 + i)^n}} \quad (54.3)$$

Sendo assim, será possível determinar a viabilidade econômica da planta Pastore, que produz apenas a eletricidade gerada, e do sistema integrado, que possui a eletricidade gerada, o biofertilizante líquido e o custo evitado com o uso da eletricidade, como produtos úteis definindo, assim, qual da dual alternativa é mais atrativa financeiramente.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico de discussão possui dois enfoques principais. O primeiro se dedica a expor o comportamento termodinâmico das amostras, como fluxos energéticos e exergéticos da planta e análises de 1ª e 2ª lei de cada subsistema. O segundo especifica a análise econômica para estimar e comparar os custos de produção de cada produto, bem como a viabilidade econômica da planta Pastore e do sistema de fertirrigação com autossuficiência energética. Ademais, inicia-se com a caracterização das amostras.

### 5.1. Caracterização dos dejetos e biogás

Os resultados analíticos obtidos na caracterização dos dejetos frescos e tratados (digestato) da suinocultura estão ilustrados na Tabela 7. Estes demonstram grande variabilidade entre os resíduos coletados nos diferentes dias de coleta, porém, todos os parâmetros analisados estão dentro do intervalo de valores presentes na literatura, tal como é relatado em Silva et al. (1996), Olivi et al. (2015), Fernandez-Lopez et al. (2015) e pela Embrapa Suínos e Aves (OLIVEIRA et al.,1993).

Tabela 7. Caracterização físico-química.

	pH	Densidade [g/l]	SV [g/l]	ST [g/l]	SF [g/l]	Umid. [%]	<i>N</i> <i>Amoniacal</i> [g/l]	<i>N</i> <i>total</i> [g/l]	<i>P</i> <sub>2</sub> <i>O</i> <sub>5</sub> [g/l]	<i>K</i> <sub>2</sub> <i>O</i> [g/l]	DQO [g/l]	
S	Máx.	8,18	948,27	21,39	29,43	9,59	99,0	1,73	2,60	0,90	0,80	27,81
	Méd.	<b>7,46</b>	<b>935,82</b>	<b>11,73</b>	<b>17,31</b>	<b>5,58</b>	<b>98,2</b>	<b>1,44</b>	<b>2,16</b>	<b>0,63</b>	<b>0,54</b>	<b>24,27</b>
	Mín.	6,87	910,04	6,41	9,37	2,72	96,9	1,09	1,64	0,33	0,36	20,89
	$\sigma$	0,45	11,90	5,32	7,33	2,20	0,78	0,22	0,33	0,22	0,17	2,83
D	Máx.	7,84	989,72	5,74	18,76	11,79	0,99	2,06	3,09	0,73	0,59	20,25
	Méd.	<b>7,50</b>	<b>941,94</b>	<b>5,12</b>	<b>11,26</b>	<b>5,90</b>	<b>0,99</b>	<b>1,74</b>	<b>2,61</b>	<b>0,60</b>	<b>0,49</b>	<b>14,51</b>
	Mín.	7,35	923,28	4,29	8,89	4,33	0,98	1,50	2,26	0,36	0,27	10,75
	$\sigma$	0,16	22,67	0,53	3,42	2,66	0,00	0,19	0,28	0,12	0,11	3,30
	$\Delta\%$	0,56	0,65	56,31	34,94	5,64	0,68	20,95	20,95	5,43	9,15	42,84

$\Delta\%$  Refere-se à diferença percentual entre a média dos parâmetros do substrato (S) e digestato (D).

Fonte: Elaboração própria.

Podemos observar que o conteúdo de sólidos voláteis (SV) foi menor para as amostras digeridas do que para o dejetos fresco, com redução percentual de 56,31%. Isto se deve ao fato de que o processo de digestão anaeróbia transforma

biologicamente a matéria orgânica do esterco em biogás, reduzindo o material volátil (Tambone et al., 2009). Tal tendência também foi corroborada pelos valores de DQO, verificando-se eficiência de remoção de carga orgânica de 57,16%, em média.

Além disso, uma maior quantidade de sólidos fixos foi observada para as amostras do digestato. Esse fato também se justifica devido ao menor teor de material volátil, uma vez que a matéria orgânica é mineralizada durante a digestão anaeróbia (Kobayashi et al., 2013). Isto resulta em um maior conteúdo de componentes inorgânicos presentes nas cinzas e diminui a energia disponível do digestato, dificultando sua utilização em processos de combustão ou pirólise (FERNANDEZ-LOPEZ et al., 2015).

Notou-se um alto teor dos componentes inorgânicos presentes no digestato, como o nitrogênio amoniacal ( $NH_4^+$ ), pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) e óxido de potássio ( $K_2O$ ), quando comparado ao substrato. O aumento na concentração de nitrogênio amoniacal está dentro do esperado, pois o nitrogênio na forma orgânica é mineralizado durante o processo de biodigestão. Já o fósforo e o potássio não sofrem alteração, mas sim uma precipitação físico-química, como é relatado por Manitoba (2015).

Verifica-se que o pH das amostras é aproximadamente neutro, indo de 7,46 (do substrato) para 7,50 (digestato estabilizado), em média. Estes valores são satisfatórios, uma vez que as arqueas metanogênicas são sensíveis ao pH, com valores ótimos entre 6,7 e 7,5, enquanto o pH abaixo de 6,6 acarretaria a inibição do crescimento de tais arqueas (KUNZ et al., 2019).

Os valores de pH do substrato indicam também que a maior parte do nitrogênio amoniacal medido está na forma iônica ( $NH_4^+$ ) (KUNZ et al., 2019). Por esse motivo, na análise exegética dos compostos inorgânicos utiliza-se a taxa de conversão de 1,29, transformando  $N-NH_4$  em  $NH_4^+$ , como é sugerido por Lorimor et al. (2004).

Os dados coletados em campo com o auxílio do Landtec gem 5000 estão exibidos na Tabela 8. Durante o período de monitoramento, foi medido o biogás sem a injeção de ar pelo compressor, com injeção de ar e ao sair do sistema de refrigeração e lavagem do biogás. Com isso, foi possível verificar a eficiência de cada sistema de purificação do biogás quanto à redução do sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ).



Tabela 8. Concentração de biogás na propriedade Pastore.

Descrição	Intervalo	CH <sub>4</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [ppm]	O <sub>2</sub> [%]	CO [ppm]
Biogás bruto*	Máximo	66,9%	38,3%	5.000	3,0%	14,00
	Média	65,0%	34,4%	5.000	0,8%	9,63
	Mínimo	61,2%	31,6%	5.000	0,1%	4,00
	Desvio Padrão	0,02	1,9%	0,00	0,9%	3,35
Biogás entrando no refrigerador (com injeção de ar)	Máximo	59,1%	49,3%	785	2,0%	21,00
	Média	56,0%	34,7%	442	1,8%	9,60
	Mínimo	50,4%	30,8%	124	1,3%	4,00
	Desvio Padrão	0,03	7,3%	248,71	0,3%	5,92
Biogás Saindo do refrigerador	Máximo	63,5%	36,6%	748	2,2%	21,00
	Média	58,5%	32,8%	378	1,4%	10,43
	Mínimo	53,5%	30,9%	17	0,2%	4,00
	Desvio Padrão	2,8%	1,7%	214,94	0,5%	5,94

\* O biogás bruto é aquele que não passa pelos dois sistemas de tratamento (Dessulfurização biológica pela injeção de ar e refrigeração).

Fonte: Elaboração própria.

O primeiro ponto a se observar é que os resultados levantados na Tabela 8 estão dentro do intervalo de valores presentes na literatura com metano (CH<sub>4</sub>) entre 50-70%, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) 20-40%, sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) 100-10.000 ppm, segundo Salomon et al. (2009), Wellinger et al. (2013), Beil & Beyrich (2013) e Kunz et al. (2019).

Verifica-se também uma redução percentual de 91,16% de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), quando comparamos a produção de biogás sem injeção de ar (concentração de 5.000 ppm de H<sub>2</sub>S) com a injeção de ar (ficado com concentração de 442 ppm de H<sub>2</sub>S). Eficiências de remoção de 80 a 99% foram registradas por Wellinger et al. (2005) e Krich et al. (2005). Quanto ao sistema de refrigeração e lavagem, registrou-se uma redução percentual de 14,48% de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), partindo de uma concentração média de 442 ppm (biogás com injeção de ar) para 378 ppm.

Pode-se notar que o biogás tratado, ao final do sistema de refrigeração e lavagem com injeção de ar (fluxo 11 da Figura 2), possui concentração de metano que atende aos requisitos mínimos exigidos para aplicação como energia térmica, mecânica e elétrica (CH<sub>4</sub>: 35 – 70%), além da baixa concentração de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), que está dentro dos requisitos de qualidade para fins energéticos (H<sub>2</sub>S: 545-1.742 ppm) nos motores de combustão interna, de acordo com a Resolução nº. 16 da Agência Nacional do Petróleo (ANP) *apud* Kunz et al. (2019).

Contudo, as concentrações restantes de sulfeto de hidrogênio ainda são elevadas para permitir o uso do biogás como substituto do gás natural.

O monitoramento do painel de consumo de biogás do conjunto motor gerador, durante as 14 semanas de acompanhamento, revelou uma produção média de 45,60 m<sup>3</sup> de biogás por hora, como ilustrado na Figura 11 ou Tabela 9, o que acarreta uma produção diária de 495,16 m<sup>3</sup> por dia, levando em conta 10,86 horas de operação do motor. Este resultado será utilizado posteriormente no balanço energético e exergético do motor gerador.

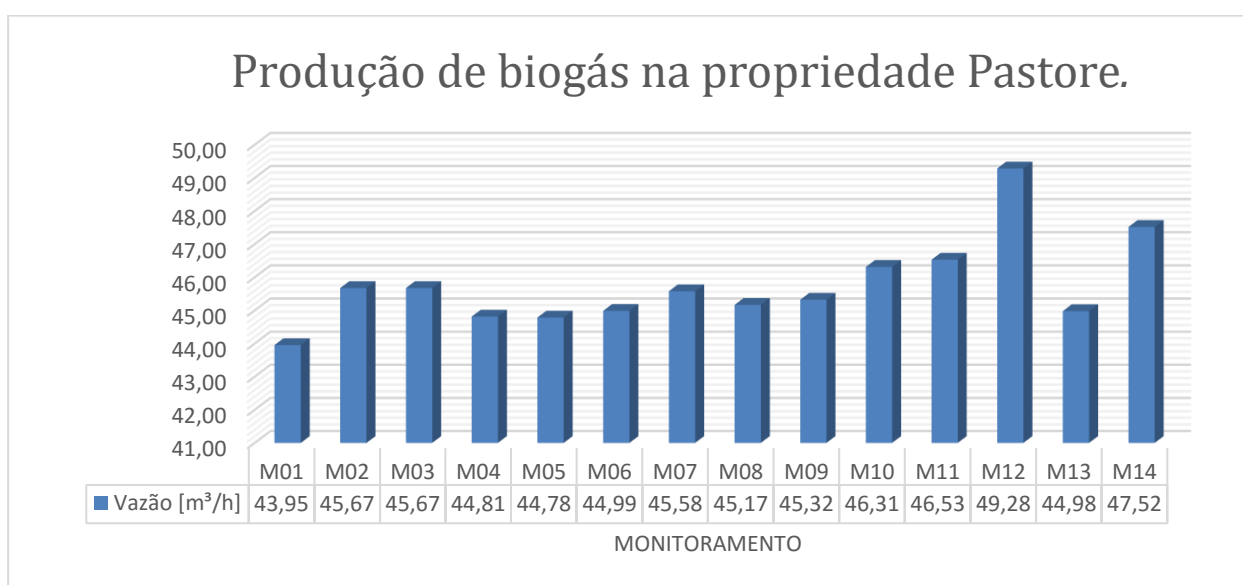


Figura 11. Produção de biogás na usina Pastore ao longo das 14 semanas de monitoramento.

Tabela 9. Intervalo de valores da produção de biogás na usina Pastore

Intervalo	Vazão [m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> ]
<b>Máximo</b>	49,28
<b>Média</b>	45,60
<b>Mínimo</b>	43,95
<b>Desvio Padrão</b>	1,30

Com base no plantel de suínos da granja em cada categoria, obtidos no monitoramento, foi possível estimar a produção específica de dejetos apoiando-se nos dados de geração de resíduos disponibilizado pela Instrução Normativa 11 da Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA, 2014), de acordo com o que é destacado na Tabela 10. Assim, tendo em vista o gasto com água na lavagem da granja, constatando-se uma produção média de 52,84 m<sup>3</sup> de afluyente por dia,

refletindo em uma produção anual de 19.288,43 m<sup>3</sup>.

Levando em conta apenas a produção de dejetos (19,57 m<sup>3</sup>/dia) e utilizando a equação (38), estima-se que a oferta anual de macronutrientes presentes nos resíduos da granja Pastore foi de 12,41 toneladas de Nitrogênio, 4,26 toneladas de Fósforo e 3,53 toneladas de Potássio em 2021. Um potencial expressivo de nutrientes que pode ser comercializado, contribuindo para amortizar o capital investido na planta de biogás.

*Tabela 10. Estimativa da produção diária de dejetos e consumo de água.*

Unidades de produção	Número de Animais	Produção do substrato (Dejeto + água)		
		Quantidade Dejeto	Quantidade Água	Unidade
Ciclo Completo (CC)	0	47,1	72,9	<i>litros · animal<sup>-1</sup> · dia<sup>-1</sup></i>
Unidade Produtora de Leitões (UPL)	250	22,8	35,3	<i>litros · animal<sup>-1</sup> · dia<sup>-1</sup></i>
Unidade de Produção de Desmamados (UPD)	0	16,2	27,8	<i>litros · animal<sup>-1</sup> · dia<sup>-1</sup></i>
Unidade Creche (UC)	650	2,3	2,5	<i>litros · animal<sup>-1</sup> · dia<sup>-1</sup></i>
Unidade de Terminação (UT)	2750	4,5	8,3	<i>litros · animal<sup>-1</sup> · dia<sup>-1</sup></i>
Nº animais/matriz.ano		15,2		-
Total	2100	19,57	33,275	<i>m<sup>3</sup> · dia<sup>-1</sup></i>
		<b>52,845</b>		<i>m<sup>3</sup> · dia<sup>-1</sup></i>

Fonte Adaptado de FATMA, 2014.

## 5.2. Análise Termodinâmica da planta

### 5.2.1. Conteúdo energético e exergético de dejetos suínos e biogás

No referente tópico, foram discutidas algumas propriedades termodinâmicas relevantes quanto aos afluentes da suinocultura e biogás, uma vez que esses resultados são escassos na literatura. Para tanto, a exergia química dos dejetos suínos, tanto do afluente quanto do efluente tratado, foi estimada com base na Tabela 7 utilizando as equações (30.8) e (37.2). Os resultados estão evidenciados na Tabela 11.

Tabela 11. Exergia química do substrato e digestato em base seca.

Amostras	Parâmetros	$x_i$	$\sum x_i b^{ch_i}$ [kJ/mol]	$\sum RT_0 x_i \ln x_i$ [kJ/mol]	$b^{ch_{mistura}}$ [kJ/mol]	$b^{ch_{total}}$ [kJ/kg]
	DQO	-	-	-	-	<b>18.411,81</b>
Substrato	$NH_4^+$	0,91	348,28	-0,21	348,06	
	$P_2O_5$	0,04	30,25	-0,32	29,94	<b>88,67</b>
	$K_2O$	0,05	21,11	-0,38	20,74	
	<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>399,64</b>	<b>-0,91</b>	<b>398,74</b>	<b>18.500,48</b>
	DQO	-	-	-	-	<b>16.705,51</b>
Digestato	$NH_4^+$	0,93	355,88	-0,17	355,71	
	$P_2O_5$	0,03	24,14	-0,27	23,87	<b>99,48</b>
	$K_2O$	0,04	16,20	-0,31	15,88	
	<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>396,22</b>	<b>-0,75</b>	<b>395,47</b>	<b>16.804,98</b>

Lembrando que  $x_i$  é a fração molar dos NPK analisados. E o nitrogênio amoniacal foi declarado como Amônio ( $NH_4^+$ ) conforme Front Palma (2019).

Fonte: Elaboração própria.

Como ilustrado na Tabela 11, a exergia química específica da matéria inorgânica calculada pela equação (30.8), é 88,67 e 99,48 kJ/kg para o substrato e digestato, respectivamente. Estes resultados não foram encontrados na literatura para dejetos suínos, estando dentro do intervalo de valores para resíduos sólidos urbanos, de 100 a 3.300 kJ/kg, segundo Song et al. (2013) e Eboh et al. (2016). O aumento da exergia específica inorgânica do digestato se justifica devido à mineralizada da matéria orgânica, principalmente do nitrogênio orgânico, como discutido anteriormente.

Quando comparada com a exergia específica da matéria orgânica (18.500,48 e 16.804,98 kJ/kg), a exergia dos componentes inorgânicos é bem pequena, podendo ser desprezada. Contudo, esses valores ainda podem ser utilizados para calcular o custo evitado e o consumo específico de exergia dos biofertilizantes, auxiliando na identificação do potencial de economia de energia desses segmentos em comparação aos fertilizantes minerais além, é claro, do custo de produção desses fertilizantes, como será discutido mais adiante.

Outro resultado observado é a destruição de 0,91 kJ/mol de exergia do afluente e 0,75 kJ/mol do Digestato. Isso ocorre devido ao processo de dissolução até o dejetos entrar em equilíbrio com o ambiente de referência, descrita pelo segundo termo da equação (30.8) (PALACIOS-BERECHE et al., 2013).

A Tabela 11 também mostra que um 1 kg do dejetos fresco analisado contém

18,5 MJ de exergia química, frente a 16,80 MJ por kg do digestato. Desses valores, 99,52 e 99,41% decorrem da contribuição da matéria orgânica calculada a partir da DQO para o substrato e digestato, respectivamente. E dentre os componentes inorgânico, aquele que apresenta a maior contribuição foi o amônio ( $NH_4^+$ ), devido ao seu alto teor exergético.

Agora, tendo em vista a composição elementar média de resíduos suínos de " $C_{39,4}H_{5,56}O_{21,73}N_{3,04}S_{0,56}$ " para o substrato e " $C_{35,16}H_{5,32}O_{20,88}N_{5,20}S_{0,48}$ " para o digestato (ZANG et al., 2014), foram estimadas algumas propriedades termodinâmicas desses dejetos, pelos métodos de Peduzzi et al. (2016) e Shieh & Fan (1982), Song et al. (2012), Friedl et al. (2005), Channiwala & Parikh (2002) e Boie (1953). Com base nos valores experimentais de DQO, também foi estimada a exergia química ( $b^{\circ}_{ch}$ ) pelas correlações propostas por Nakashima (2019) e Tai et al. (1986), segundo as Tabelas 12 e 13.

Tabela 12. Representação termodinâmica da Exergia ( $b^{\circ}_{ch}$ ), Entalpia ( $\Delta H^{\circ}$ ) e Energia Livre de Gibbs ( $\Delta G^{\circ}$ ) do substrato e digestato suíno.

Tipo	MM [g/mol]	Peduzzi et al. (2016)			Song et al. (2012)	Shieh & Fan (1982)	Nakashima (2019)	Tai et al. (1986)
		$\Delta H_f^{\circ}$ [kJ/mol]	$\Delta G_f^{\circ}$ [kJ/mol]	$b^{\circ}_{ch}$ [kJ/kg]	$b^{\circ}_{ch}$ [kJ/kg]	$b^{\circ}_{ch}$ [kJ/kg]	$b^{\circ}_{ch}$ [kJ/kg]	$b^{\circ}_{ch}$ [kJ/kg]
		<b>Substrato</b>	22,51	-65,31	-46,07	17.311,58	18.504,95	17.662,79
<b>Digestato</b>	24,17	-66,88	-44,79	16.216,91	16.786,64	15.971,77	16.705,51	15.604,04

Peduzzi et al. (2016) considera composição elementar normalizada para 1 mol de carbono. E MM é a massa molar.

Fonte: Elaboração própria.

Como a variação de entalpia é igual ao calor fornecido ou cedido pelo sistema em pressão constante, caso da pressão atmosférica a que estamos sujeitos, então, o sinal negativo da entalpia padrão de formação do substrato e digestato ( $\Delta H_f^{\circ} < 0$ ), apresentado na Tabela 13, indica que estes podem ceder energia na forma de calor para o ambiente. Com isso, tem-se um processo exotérmico. Ademais, o sinal negativo da energia livre de Gibbs padrão de formação dos compostos orgânicos ( $\Delta G_f^{\circ} < 0$ ) reforça que a liberação de calor para o ambiente pelo processo exotérmico ocorrerá de forma espontânea, provocada pela variação positiva da entropia total do sistema e sua vizinhança (ATKINS & JONES, 2012).

Tabela 13. Representação termodinâmica do poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) do substrato e digestato suíno.

Tipo	MM [g/mol]	Friedl et al. (2005)		Channiwala & Parikh (2002)		Boie (1953)	
		PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]
<b>Substrato</b>	22,51	20.074,19	20.017,26	20.353,27	20.296,34	20.471,65	20.414,72
<b>Digestato</b>	24,17	20.061,25	19.481,65	19.230,18	19.169,14	19.542,69	19.481,65

Fonte: Elaboração própria.

Foi possível comparar as diversas estimativas de exergia química ( $b^{\circ}_{ch}$ ), a partir da análise elementar, com a correlação de DQO obtidos experimentalmente. Constatando-se que a exergia química dos componentes orgânicos, seguindo o método de Nakashima (2019) (18.411,81 e 16.705,51 kJ/kg), apresenta uma boa correspondência com a exergia calculada por outros métodos, estando dentro do intervalo de valores de 17.311,58 a 18.504,95kJ/kg, com diferença percentual em relação ao de Song et al. (2012) de 0,5% e 0,48% para o substrato e digestato, respectivamente.

Constata-se que, apesar das correlações propostas por Nakashima (2019) e Tai et al. (1986) não serem genéricas, mas sim relacionadas às substâncias possivelmente presentes na vinhaça e esgoto, respectivamente, isso não resultou em diferenças significativas perante as demais estimativas. O método de Tai et al. (1986) se distanciou um pouco mais por não usar o mesmo referencial de Szargut et al. (1985), porém, compensado por se tratar de resíduos de esgoto com características similares às dos suínos. Portanto, para uma estimativa mais precisa seria adequada uma correlação com a DQO que relacione substâncias possivelmente presentes nos dejetos de suínos, utilizando o referencial padrão de Szargut et al. (1985).

Quanto aos resultados da Tabela 13, observa-se que os valores do poder calorífico das amostras em estudo foram semelhantes aos de outros tipos de biomassas (15 – 20 MJ/kg), apontando sua adequação para valorização energética (FERNANDES-LOPEZ et al., 2014). O mesmo não pode ser dito quanto ao digestato que contém teores de nitrogênio e oxigênio elevados e baixo teor de carbono e hidrogênio, o que reduz sua energia calorífica, inviabilizando sua valorização energética (CHANNIWALA & PARIKH, 2002). Necessitando, portanto, de outras formas de valorização dos efluentes pós-digestão, como o uso na agricultura.

A partir dos valores exibidos na Tabela 8, determinou-se o poder calorífico do biogás, Tabela 14, utilizando a eq. (26.1). Outrossim, computamos as frações molares do biogás ( $x_i$ ) para estimar sua exergia química, Tabela 15, tal como nas equações (36) e (30.8).

Tabela 14. Poder Calorífico inferior (PCI) do biogás.

Descrição	Parâmetros	Conc. [%]	$PCI_{biogás}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]
Biogás saindo do refrigerador	$CH_4$	58,46%	469,02
	$CO_2$	32,79%	0
	$CO$	0,00%	0,0030
	$O_2$	1,42%	0
	$H_2S$	0,04%	0,358
	$NH_3^*$	0,04%	0,120
	Total	-	<b>20.960,04</b>
Biogás entrando no refrigerador	$CH_4$	56,00%	449,29
	$CO_2$	34,70%	0
	$CO$	0,00%	0,0027
	$O_2$	1,80%	0
	$H_2S$	0,04%	0,42
	$NH_3^*$	0,04%	0,12
	Total	-	<b>20.081,64</b>
Biogás Bruto	$CH_4$	65,00%	521,50
	$CO_2$	34,40%	0
	$CO$	0,00%	0,0028
	$O_2$	0,01%	0
	$H_2S$	0,50%	4,73
	$NH_3^*$	0,04%	0,12
	Total	-	<b>23.497,79</b>

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados evidenciados na Tabela 14 mostram que, apesar de reduzir 91,16% do sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), como discutido anteriormente, o biogás que passa pelo processo de purificação por injeção de ar e refrigeração acaba perdendo uma parcela do seu poder calorífico, indo de 23,49 MJ/m<sup>3</sup>, do biogás puro, para 20,96 MJ/m<sup>3</sup> do biogás tratado, representando uma redução percentual de 10,80% do seu conteúdo energético. Contudo, isso não afeta drasticamente seu potencial calorífico, que ainda está dentro do intervalo tido como adequado, que varia entre 15 e 30 MJ/m<sup>3</sup> (ABATZOGLOU & BOIVIN, 2009 *apud* KUNZ et al. 2019).

Outro fato curioso é que o biogás que sai do processo de refrigeração tem um conteúdo calorífico superior ao que entrou no sistema. Isso provavelmente se deve ao aumento na concentração de metano pela redução da temperatura e consequente aumento da densidade do biogás, uma vez que a diminuição da temperatura causa redução no volume por efeito de contração térmica, reduzindo a relação peso volume. Esse aumento se traduz em 4,37% do poder calorífico que entra no sistema, como expresso na Tabela 15.

Tabela 15. Exergia química do biogás.

Fluxo	$i$	$CC_i$ [g/L]	$M_i$ [mol/l]	$x_i$	$\sum x_i b_{ch_i}^\circ$ [kJ/mol]	$RT_0 \sum x_i \ln x_i$ [kJ/mol]	$b_{ch_{mistura}}^\circ$ [kJ/mol]	$b_{ch_{total}}^\circ$ [kJ/m <sup>3</sup> ]
<b>Biogás Bruto</b>	$CH_4$	0,66	0,04	0,81	670,20	-0,43	669,77	29.900,57
	$CO_2$	0,37	0,01	0,16	3,21	-0,74	2,47	110,46
	$CO$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
	$O_2$	0,02	0,00	0,02	0,08	-0,19	-0,11	-5,06
	$H_2S$	0,02	0,00	0,01	8,73	-0,11	8,62	384,76
	$NH_3$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0025
	Total	-	0,05	1,00	-	-1,47	680,75	30.390,83
<b>Biogás entrando no refrigerador</b>	$CH_4$	0,65	0,04	0,79	655,59	-0,46	655,12	29.246,62
	$CO_2$	0,40	0,01	0,18	3,47	-0,76	2,71	120,89
	$CO$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
	$O_2$	0,02	0,00	0,02	0,09	-0,21	-0,12	-5,47
	$H_2S$	0,00	0,00	0,00	0,28	-0,01	0,27	12,12
	$NH_3$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total	-	0,05	0,99	-	-1,44	657,98	29.374,29
<b>Biogás saindo do refrigerador</b>	$CH_4$	1,24	0,05	0,96	797,53	-0,10	797,43	35.599,70
	$CO_2$	0,65	0,01	0,19	3,61	-0,77	2,83	126,39
	$CO$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
	$O_2$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,11
	$H_2S$	0,01	0,00	0,00	3,29	-0,05	3,24	144,62
	$NH_3$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total	-	0,06	1,15	-	-0,92	803,50	35.870,74

$CC_i$  é a concentração comum, medida experimentalmente.  $M_i$  é a massa molar.

Fonte: Elaboração própria.

Como observado na Tabela 15, a exergia química do biogás tratado foi



estimada em 30,39 MJ/m<sup>3</sup>. Esse resultado corrobora com os dados publicados por outros estudos como Barati et al. (2017), com teor exergético de 26,73 MJ/m<sup>3</sup>, o que reflete em uma diferença percentual de 13,69%. Esta diferença se justifica pela concentração de metano produzida pelos dejetos.

Observa-se também uma destruição de 1,47, 1,44 e 0,92 kJ/mol de exergia do biogás tratado, entrando no refrigerador e sem tratamento, respectivamente, pelo processo de dissolução até que estes entrem em equilíbrio com o ambiente de referência.

### 5.2.2. Fluxos de energia e exergia da planta

A Tabela 16 ilustra os estados termodinâmicos, tipos de fluxo, taxa de fluxos de massa, e propriedades termodinâmicas da planta com relação ao diagrama funcional termoeconômico, Figura 2. Vale salientar que as taxas de exergia e energia foram calculadas usando as contribuições teóricas salientadas em “caracterização das amostras” e “determinação dos estados termodinâmicos”.

Tabela 16. Fluxos exergéticos e energéticos do sistema de fertirrigação Integrado.

<i>j</i>	Fluxo	$\dot{M}$ [kg/s]	Temperatura (K)	Pressão (KPa)	$\dot{B}_{ch}$ [kW]	$\dot{B}_{ph}$ [kW]	$\dot{B}$ [kW]	$\dot{E}$ [kW]
1	Substrato	0,05	295,04	101,20	935,68	0,04	935,71	1.017,26
2	Substrato (NPK) e água	2,01	295,04	101,20	150,73	0,04	150,77	-6,91
3	Ar (Compressor)	7,27E-05	296,53	-	0,018046	0,01	0,03	0
4	Ar	7,27E-05	296,53	101,20	0,02	1,59E-06	0,02	0,00
5	Eletric. Sist. de Agitação	-	-	-	-	-	7,50	7,50
6	Eletric. Compressor	-	-	-	-	-	0,25	0,25
7	Eletric. Refrigerador	-	-	-	-	-	0,86	0,86
8	Eletric. Sist. Fertirrigação	-	-	-	-	-	22,00	22,00
9	Biogás sem tratamento	7,28E-05	309,77	101,20	1,73	2,14E-07	1,73	2,02
10	Biogás entrando na unid. (C)	6,14E-06	309,77	101,20	0,15	2,14E-07	0,15	0,17
11	Biogás saindo da unid. (C)	0,01	275,95	101,20	365,10	4,51	369,61	305,96
12	Biogás (% H <sub>2</sub> S)	5,14E-06	275,95	101,20	0,12	4,49E-06	0,12	0,14
13	Biogás (% CH <sub>4</sub> )	0,01	275,95	34,47	213,44	4,51	217,95	265,18
14	Digestato	0,21	296,26	101,20	536,09	0,01	536,10	644,01
15	Digestato (NPK) e água	0,58	296,26	101,20	149,52	0,01	149,53	-6,97
16	Eletricidade gerada	-	-	-	-	-	70,00	70,00
17	Pot. Hidráulica (Unidade D)	0,01	313,15	294,18	-	-	3,74	3,74
18	Pot. Hidráulica (Unidade H)	0,01	-	1.357,16	-	-	12,95	12,95
19	Perdas Biodigestor	-	296,26	101,20	-	-	0,39	61,53

20	Perdas Motor Gerador	-	821,33	101,20	-	-	124,33	195,18
21	Perdas unidade H	-	313,15	101,20	-	-	9,05	9,05
22	Perdas unidade B	-	316,15	101,20	-	-	0,77	13,51
23	Perdas Refrigerador	-	275,95	101,20	-	-	0,07	0,89
24	Perdas unidade D	-	313,15	101,20	-	-	0,18	3,76
25	Perdas P. Biogás	-	275,95	101,20	-	-	0,86	10,66
26	Perdas P. Biofertilizante	-	296,26	101,20	-	-	0,08	13,29

Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se que as taxas de exergia física ( $\dot{B}_{ph}$ ), da maioria dos fluxos, podem ser negligenciadas quando comparadas com a taxa de exergia química ( $\dot{B}_{ch}$ ). Isso se justifica pelo fato de que a temperatura destes não possuíam variações expressivas com relação a temperatura de referência. Com exceção dos gases de exaustão, que operam com temperatura acima de 450 °C, e biogás resfriado, com temperatura média de 2,6 °C.

De posse desses fluxos, Tabela 17, podemos ilustrar o diagrama de Sankey para a análise exergética da planta Pastore, tratando-a como um volume de controle, como ilustrado na Figura 12.

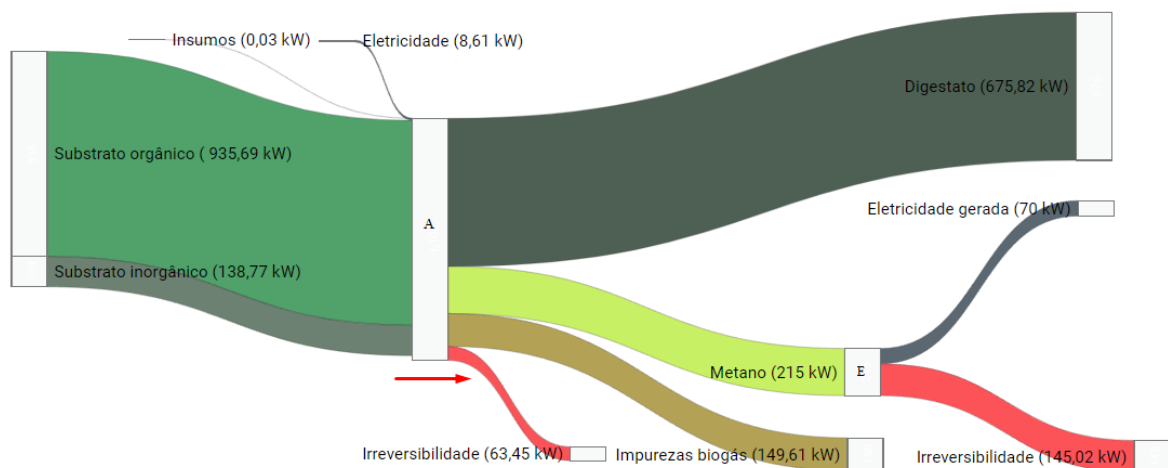


Figura 12. Diagrama de Sankey para o balanço exergético da planta Pastore.

A tem referência com o biodigestor e C com o motor gerador. O insumo apresentado no diagrama refere-se ao ar injetado no biodigestor.

Fonte: Elaboração própria.

Com isso, é possível observar os dois principais produtos da planta, em base exergética. Sendo 675,82 kW do digestato e 70 kW de eletricidade produzidos por dia a partir 914,75 kg de dejetos frescos (935,71 kW). Destes, 61,39 kW de eletricidade líquida é produzida, uma vez que 8,61 kW de eletricidade é consumida pelos componentes da planta. Portanto, constata-se que a exergia contida no estrume é

principalmente conservada no biofertilizante que pode ser reutilizado nas culturas agrícolas, e parte dela é convertida em eletricidade, sendo vendida nas concessionárias.

### 5.2.3. Análise de 1ª lei e 2ª lei da Termodinâmica

Com base nos fluxos energéticos ( $\dot{E}$ ) e exergéticos ( $\dot{B}$ ) salientados na Tabela 16 e nas equações matriciais (2), (10) a (21), propostas na metodologia, foram feitas as devidas análises de 1ª e 2ª lei da planta de biogás. Estas estão ilustradas nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17. Análise Energética da planta de biogás Pastore.

$i$	$\dot{F}^{1ª lei}$ [kW]	$\dot{P}^{1ª lei}$ [kW]	$\dot{L}^{1ª lei}$ [kW]	$\eta_i^{1ª lei}$	$k_i^{1ª lei}$
Biodigestor (A)	1.021,84	943,01	61,53	92,29%	1,08
Dessulfurização biológica (B)	6,01	0,17	13,51	97,16%	1,03
Refrigerador (C)	1,03	0,14	4,646	86,15%	1,16
S. Agitação (D)	7,50	3,74	3,76	49,88%	2,00
Motor Gerador (E)	265,18	70,00	195,18	26,40%	3,79
Biodigestor (P. Biogás) (F)	1.029,61	305,96	90,29	29,72%	3,37
Biodigestor (P. Biofertilizante) (G)	1.014,09	637,05	78,58	62,82%	1,59
S. Fertirrigação (H)	22,00	12,95	9,05	58,87%	1,70
S. integrado (I)	1.309,88	1.026,13	307,82	78,34%	1,28

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 18. Análise Exergética da planta de biogás Pastore.

$i$	$\dot{F}$ [kW]	$\dot{P}$ [kW]	$\dot{L}$ [kW]	$\dot{D}$ [kW]	$\dot{I}$ [kW]	$\dot{I}P_i$ [kW]	$Y_{D_i}^*$	$\eta_i$	$k_i$
Biodigestor (A)	1.098,02	1.055,24	0,39	42,21	42,60	42,37	51,00%	96,10%	1,04
Dessulfurização biológica (B)	5,77	0,15	0,77	12,50	13,27	5,57	15,10%	97,47%	1,03
Refrigerador (C)	1,01	0,12	0,25	0,81	1,06	0,88	0,98%	87,83%	1,14
S. Agitação (D)	7,50	3,74	0,180	3,58	3,76	3,74	4,32%	49,88%	2,00
Motor Gerador (E)	217,97	70,00	124,33	23,64	147,97	147,49	28,56%	32,12%	3,11
P. Biogás (F)	1.098,02	369,61	2,271	34,87	37,14	726,80	-	33,64	2,97
P. Biofertilizante (G)	1.098,02	685,63	0,66	41,83	42,48	402,05	-	62,89%	1,59
S. Fertirrigação (H)	22,00	12,95	9,05	0,03	9,07	9,00	0,03%	58,87%	1,70
S. integrado (I)	1.338,83	1.138,34	135,74	65,84	201,58	198,78	-	85,03%	1,18

Fonte: Elaboração própria.

Os valores de eficiência energética e exergética da planta podem ser melhor visualizados na Figura 13. Desse modo, é possível observar que o valor da eficiência energética é inferior ao da exergética e a diferença entre as duas representa o

potencial de melhoria do sistema.

Isso não acontece nas unidades D e H, referentes às motobombas que possuem eficiências energéticas exatamente iguais às exergéticas (49,88 e 58,87%). Ocorre porque a eletricidade que alimenta as motobombas é a forma mais organizável de energia. Logo, a energia e exergia elétrica são iguais, com fator de qualidade igual a 1 (WALL, 1986). Além disso, não foram encontradas na literatura metodologias para estimar as perdas de carga nas tubulações, ou mesmo a altura manométrica, em base exergética, apenas em termos de energia. Portanto, seria importante em estudos futuros desenvolver um método para estimar tais propriedades.

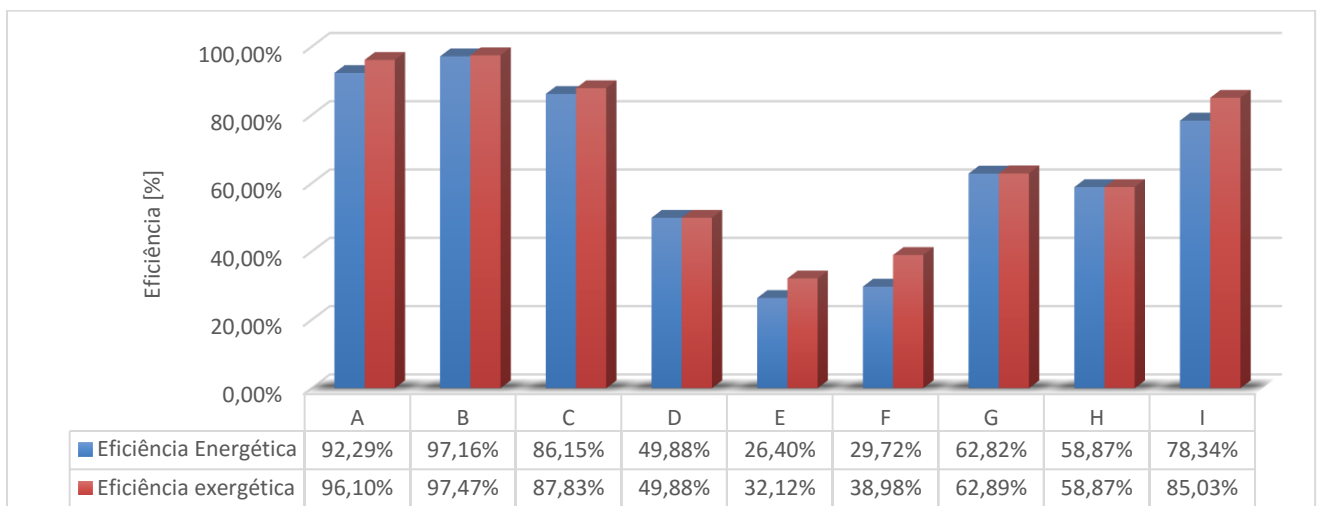


Figura 13. Comparativo entre a eficiência energética e exergética da planta.

Fonte: Elaboração própria.

Quanto ao sistema de agitação, apesar da baixa eficiência da motobomba, este é bastante importante para a digestão anaeróbia, pois pode trazer ganhos de 15 a 30% na produtividade de biogás (KARIM et al., 2005 *apud* KUNZ et al., 2019).

Deve-se atentar que os valores de eficiência energética são mais contextualmente apropriados para avaliar o potencial energético real da usina de biogás, ao passo que os valores de eficiência exergética expressam as possíveis melhorias do sistema. Nesse contexto, é importante salientar que a estimativa exergética não pode ser atingida pelo fato de considerar processos reversíveis, servindo apenas como limite teórico de desempenho termodinâmico possível.

### **Análise das unidades de Dessulfurização (B) e (C)**

O sistema de dessulfurização por adição de oxigênio no biodigestor (unidade B) figurou como um método simples, de baixo custo e eficiente em reduzir o  $H_2S$ . Em

termos de energia, sua eficiência foi computada em 97,16% e, em termos de exergia, foi de 97,47%, com baixa taxa de melhoria ( $IP_i=5,57$  kW), reforçando que pouca melhoria pode ser obtida (Tabelas 17 e 18). Contudo, existem algumas desvantagens associadas com esse sistema de purificação, como a redução do poder calorífico do biogás, pela baixa concentração de metano observada na Tabela 14. Segundo Kunz et al. (2019), na inibição da produção de metano quando injetadas doses elevadas (6-12% de oxigênio), já que o oxigênio é tóxico para os microrganismos metanogênicos.

Já o sistema de refrigeração do biogás (unidade C), que mantém as condições ideais de pressão (34,47 kPa) e temperatura (2,6 °C) para o bom funcionamento do motor gerador, também possui uma boa eficiência em reduzir a concentração de sulfeto de hidrogênio. Sendo assim, foram computados 86,15% em termos de energia e 87,83% em termos de exergia, representando um dos componentes com menor taxa de destruição de exergia da planta, com 0,98% ( $Y_{D_i}^*$ ).

Ressalta-se que a análise de eficiência e custos exergéticos dos sistemas de tratamento e purificação do biogás são aspectos escassos na literatura. No entanto, como mostrado na metodologia utilizada nesta dissertação, é bem simples de ser aplicada. Será possível racionalizar as escolhas de equipamento, propor melhorias de desempenho, calcular o custo de produção do biometano etc.

Dentre os processos de tratamento e purificação do biogás, podemos destacar sistemas de dessulfurização biológica, refrigeração, separação por membranas, processos de adsorção que, por sua vez, abrangem métodos químicos utilizando a água, reagentes e/ou solventes orgânicos, ou ainda processos biológicos utilizando microalgas cultivadas no digestato líquido que, além de purificar o biogás, produz a matéria-prima para biocombustíveis de alto rendimento (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011; KUNZ et al. 2019).

### **Análise das unidades de biodigestão e geração de energia (A), (E), (F) e (G)**

De acordo com os resultados relatados nas Tabelas 17 e 18, a eficiência energética e exergética global do processo de digestão anaeróbia foi determinada em 92,29 e 96,10%, respectivamente. Constatando-se que o tratamento anaeróbio tem uma boa eficiência em reduzir a parcela de energia e exergia química do dejetado fresco e produzir biogás durante o processo. Esse resultado é bem próximo a

eficiência exergética publicada por Barati et al. (2017) de 99,8%, tendo em vista a redução de carga orgânica e produção de biogás com biodigestor aquecido e alimentado com resíduos sólidos urbanos.

No entanto, esse valor de eficiência superestima o desempenho do processo, no que se refere à produção de biogás (F). Por isso, quando o biogás é tido como o único produto útil do sistema, em termos de produção de energia, a eficiência fica em torno de 29,92 e 33,64%, respectivo à análise energética e exergética. Esse resultado é inferior ao encontrado no trabalho de Barreira et al. (2016), e superior aos de Vaz et al. (2021), Barati et al. (2017) e Xydis et al. (2013), que registram eficiência exergética de produção de biogás bruto de 54,11%, 27,29%, 33,14% e 33% em reatores alimentados com vinhaça, dejetos bovinos e resíduos sólidos urbanos, respectivamente.

A densidade em base seca depende das contribuições dos sólidos voláteis, fixos e totais dos dejetos, somam-se em 34,62 kg/m<sup>3</sup>. Ao multiplicar essa densidade pela energia e exergia específica, calculadas pelas correlações do poder calorífico inferior de Friedl et al. (2005) (20.017,26 kJ/kg), Tabela 12, e exergia de Nakashima & Oliveira (2019) (18.411,81 kJ/kg), Tabela 11, computamos 693 MJ/m<sup>3</sup> de energia e 637 MJ/m<sup>3</sup> de exergia de dejetos da suinocultura em base seca. Nesse sentido, ao levar em conta as eficiências energéticas e exergéticas de produção de biogás (unidade F) de 29,92% e 33,64% (Tabelas 17 e 18), obtemos que o dejetos analisado tem potencial de produzir, na forma de biogás, 207,33 MJ de energia e 214,40 MJ de exergia por m<sup>3</sup> de resíduo suíno. E tomando a eficiência do grupo gerador (E) em 26,40 de energia e 32,12% de exergia, podemos afirmar que o dejetos analisado tem potencial de gerar 15,20 e 19,13 kWh de eletricidade por m<sup>3</sup> de dejetos, respectivamente. Esse potencial exergético reflete em 26% da estimativa energética realizada neste estudo, reforçando que a planta ainda pode sofrer melhorias. Em outros estudos, Vaz et al. (2021), Barrera et al. (2016) e Nakashima & Oliveira (2019) relataram rendimento de produção em base exergética de 8,28 kWh/m<sup>3</sup>, 26,6 kWh/m<sup>3</sup> e 21 kWh/m<sup>3</sup> para usinas de biogás tratadas com dejetos bovinos e vinhaça, respectivamente.

Quando levamos em conta a eficiência em estabilizar os componentes químicos do dejetos (unidade G), em que a exergia do efluente tratado é dita como o único produto útil, o resultado foi de 62,82% e 62,89% de energia e exergia. Valor esse que contabiliza não só a redução de carga orgânica de 57,16%, determinada pela

DQO, mas também sua mineralização em compostos inorgânicos. Em Barati et al. (2017), foi relatada a eficiência de estabilização do digestato em 61,54%.

É interessante notar que " $\dot{D}$ " e " $\dot{I}$ " são elevados nas unidades de produção de biogás "F" e de produção de biofertilizante "G". No entanto, essa destruição de exergia e irreversibilidades só ocorre quando consideramos esses dois subprodutos (biogás e biofertilizante) separadamente, ou seja, quando o outro é rejeitado como perda. Isso está indicado no " $\dot{I}P_i$ ", que sugere um potencial de melhoria da unidade F em 573,23 kW, representando boa parte da exergia do digestato que sai do biodigestor (539,39 kW, em base seca), além do potencial de melhoria da unidade G em 402,23 kW, que representa parte da exergia do biogás (369,61kW). Em outras palavras, o indicativo termodinâmico " $\dot{I}P_i$ " sugere aproveitar esses dois subprodutos simultaneamente, a fim de minimizar perdas de exergia na planta.

Outro resultado relatado na Tabela 18, é que a taxa de destruição de exergia ( $\dot{D}$ ) total da planta (unidade I) foi determinada em 82,76 kW, enquanto suas irreversibilidades ( $\dot{I}$ ) foram 220,65 kW. Isso significa que 82,76 kW foi degradada internamente e 137,90 kW foi perdida ( $\dot{L}$ ) para o ambiente por transferência de calor, podendo ser reaproveitada. O indicativo " $\dot{I}P_i$ " reforça esse potencial de melhoria da usina em 198,78 kW, ao reduzir uma parcela da degradação interna e reaproveitar o calor residual. Nesse caso, a eficiência energética global do sistema foi determinada em 78,34% e a exergética em 85,03%.

Como observado, a maior taxa de destruição de exergia ( $\dot{D}$ ) da usina ocorreu no biodigestor e no motor gerador, com 42,21 e 23,64 kW, responsáveis por 51 e 28,56% de toda taxa de destruição de exergia ( $Y_{D,i}^*$ ) da planta. As taxas de irreversibilidade ( $\dot{I}$ ) dessas duas unidades foram 42,60 e 147,97 kW de exergia, respectivamente, traduzindo-se em 3,18 e 11,05% de toda exergia fornecida a usina (1.323,85 kW). Os demais componentes (unidades B, C, D e H) não foram tão consideráveis, somando-se em 16,91 kW de taxa de destruição de exergia ( $\dot{D}$ ) e 27,17 kW de irreversibilidades ( $\dot{I}$ ).

Diversas razões podem estar atribuídas a essa alta taxa de destruição exergia ( $\dot{D}$ ) dentro do biodigestor, tais como às reações bioquímicas presentes na degradação anaeróbia da matéria orgânica e pela dissipação de calor (0,39 kW) devido à natureza exotérmica de algumas dessas reações (PALACIOS-BERECHE et al., 2013). Agora, a alta taxa de destruição de exergia ( $\dot{D}$ ) do motor gerador pode ser

atribuída às significativas transferências de calor e massa pela reação de combustão (121,53 kW), atrito mecânico entre os diferentes componentes do motor durante seu funcionamento, além da parcela de exergia destruída durante a conversão do trabalho mecânico em eletricidade (BARATI et al., 2017).

Quanto à conversão da energia mecânica em energia elétrica, os fornecedores registraram rendimento de 94,1% com 100% de carga. Tal como apresentado na Tabela 19, estima-se uma eficiência do motor de ciclo Otto em 28,05 e 34,13%, referentes às análises de 1ª e 2ª lei, respectivamente. Estes estão dentro do intervalo de valores de rendimento térmico de motores de ciclo Otto discutidos por Çengel & Boles (2013), que varia entre 25 a 30% quanto à eficiência energética.

Assumindo esse valor de eficiência, conclui-se que o dejetto analisado tem potencial de gerar 58,16 kWh de energia mecânica e 73,17 kWh de exergia mecânica por m<sup>3</sup> de dejetto suíno. Além de irreversibilidades ( $\dot{I}$ ) de 143,58 kW para o motor de combustão e 4,39 kW para o gerador. Destes, 121,53 kW foram perdas térmicas pelo motor, 2,80 kW pelo gerador e 22,04 e 1,59 kW foram destruídos internamente, como evidenciado na Tabela 19.

Tabela 19. Análise termodinâmica do conjunto motor gerador.

Unidade E	$\dot{F}$ [kW]	$\dot{P}$ [kW]	$\dot{L}$ [kW]	$\dot{D}$ [kW]	$\dot{I}$ [kW]	$\eta_i$	$\eta_i^{1ª\ lei}$	$\dot{I}P_i$ [kW]
Conjunto motor gerador	217,97	70,00	124,33	23,64	147,97	32,12%	26,40%	147,49
Motor de combustão	217,97	74,39	121,53	22,04	143,58	34,13%	28,05%	143,09
Gerador	74,39	70,00	2,80	1,59	4,39	94,10%	94,10%	4,35

Fonte: Elaboração própria.

Ainda sobre o conjunto motor gerador, é interessante notar que de toda a exergia fornecida a planta (1.323,85 kW), Tabela 19, 9,29% foi descartada na forma de calor para o ambiente, por meio dos gases quentes de exaustão ( $\dot{L} = 124,33$  kW). Esse valor representa cerca de 90,16% de toda perda termina da usina, mostrando que uma melhoria no desempenho da planta poderia ser alcançada na implantação de sistemas de recuperação de calor residual dessa unidade. A recuperação de exergia dos gases de combustão que sai da unidade “E” pode representar uma estratégia válida para minimizar as taxas de destruição de exergia e perdas térmicas, a fim de maximizar a quantidade de energia elétrica produzida.

Esses gases, apesar de possuírem baixo grau de qualidade energética, ainda podem ser eficientemente convertidos em energia elétrica, por meio de métodos



convencionais, como turbina a gás pelo ciclo fechado de Stirling, ou mesmo o ciclo orgânico de Rankine, com eficiências exergéticas de 78,43 e 25%, respectivamente (OZDIL & TANTEKIN (2016); YAGLI et al. (2016) *apud* BARATI et al., 2017). Conseqüentemente, poderia aumentar a energia elétrica líquida gerada pela planta para 91,76 a 94,99 kW ao incorporar uma turbina a gás ou um ciclo de Rankine ao invés do motor de combustão integrado à planta em estudo.

Além destas estratégias propostas por Barati et al. (2017), uma outra alternativa seria usar parte do calor residual dos gases de exaustão para aquecer o biodigestor, a fim de aumentar a produção específica de biogás. Isso é importante porque as archeas metanogênicas possuem um crescimento acelerado em uma faixa de 35-40 °C, podendo resultar em aumentos expressivos na produção de biogás. Logo, é aconselhável conduzir estudos termoeconômicos que estimem quanto a mais de biogás pode ser produzido com o aquecimento, e quanto de energia térmica seria necessário para aquecer o biodigestor (por base no  $C_p$ ) para, assim, verificar se é viável ou não.

Outra estratégia válida seria desidratar o digestato pelo método de secagem por aquecimento, a fim de valorizar a efluente. A secagem é uma alternativa interessante em algumas regiões nas quais a produção de biofertilizante líquido excede a área plantada, mostrando-se uma alternativa atrativa pela diminuição do peso e volume do digestato, o que acarreta na diminuição dos custos de transporte e distribuição. Além do fato de que os métodos de secagem ao sol apresentam algumas limitações em relação à qualidade do digestato, devido a sua decomposição, tempo elevado para secagem, falta de controle e, em algumas regiões, condições climáticas desfavoráveis.

Deve-se realizar em trabalhos futuros análises técnico-econômicas, exergoeconômicas ou mesmo exergoambientais para examinar mais detalhadamente tais implantações, demonstrar a rentabilidade e sustentabilidade do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

### **Análise da unidade de Fertirrigação (H)**

Durante o acompanhamento da fertirrigação, foi registrado no painel de controle 2.039 kWh de consumo de energia elétrica para bombear 5.290,19 m<sup>3</sup> (volume do reservatório) de digestato, o equivalente a 12,95 kW de potência ao levar

em conta as 157,45 horas de funcionamento do sistema. Com base nesses valores, estima-se um consumo específico de eletricidade em 0,39 kWh por m<sup>3</sup> de efluente nas condições da fertirrigação da propriedade. Ademais, estimou-se uma altura manométrica de 138,40 m.c.a, por base na equação (40.2) e uma eficiência de bombeamento de 58,87%, tendo em vista a potência nominal de 22 kW. De acordo com o que é salientado na Tabela 18, o indicador “ $IP_i$ ” aponta que 9 kW pode ser otimizado na fertirrigação pelo aproveitamento do calor residual ( $\dot{I} = 9,05 \text{ kW}$ ), uma vez que a destruição inerente ( $\dot{D}$ ) de exergia não supera os 0,03 kW.

### Tecnologias de Fertirrigação

No contexto da fertirrigação com autossuficiência energética, é importante salientar a possibilidade de o biogás gerado ser usado como fonte de energia para movimentar uma frota de caminhões tanque ou mesmo tratores acoplados ao tanque de fertirrigação, trazendo uma alternativa atraente para a redução dos custos e emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esses sistemas constituem-se como peça fundamental para fechar o ciclo de fazendas energeticamente independentes que fazem uso da energia de resíduos orgânicos da agricultura para alimentar veículos que devolvam ao solo os nutrientes removidos pela exploração agrícola. No momento, essa tecnologia ainda é incipiente e indisponível comercialmente no Brasil, contudo, modelos dessa natureza já estão disponíveis em países desenvolvidos como Inglaterra e Alemanha.

Para avaliar a autossuficiência energética desses sistemas, utilizamos os dados divulgados por Sandi et al. (2011) sobre o transporte e distribuição de dejetos de suínos por meio de caminhões tanque ou tratores acoplados aos tanques de fertirrigação. Esses dados estão mostrados na Tabela 20.

*Tabela 20. Parâmetros relativos ao transporte e distribuição de dejetos líquidos da suinocultura realizada com caminhões e tratores acoplados ao tanque de fertirrigação.*

Município	Descrição	Distância [km]	Escala dos equipamentos			N° cargas/Hora
			Potência [CV]	Potência [kW]	Capacidade tanque [m <sup>3</sup> ]	
Concórdia	A	2,00	75,00	55,15	4,00	1,50
Embrapa Suínos	A	0,80	105,00	77,21	4,00	2,00

e Aves	A	0,80	75,00	55,15	4,00	2,00
	B	8,00	250,00	183,82	8,00	2,00
	A	0,80	105,00	77,21	6,00	2,50
	A	0,60	105,00	77,21	5,00	2,00

Nota: A potência em kW é obtida dividindo a potência em CV por 1,36.

A: trator acoplado a tanque.

B: Caminhão tanque.

Fonte: Adaptado de Sandi et al. (2011).

Segundo Çengel & Boles (2013), o rendimento de motores de combustão interna de ciclo Diesel varia entre 35 a 40%. Assim, com base na eficiência de 35% no ciclo diesel, o potencial energético do dejetos sairia de 58,16 kWh/m<sup>3</sup> (no ciclo Otto) para 72,56 kWh de energia mecânica por m<sup>3</sup> de efluente suíno. Ponderando esse potencial energético dos dejetos e o consumo de energia dos maquinários exibidos na Tabela 20, elaboramos a Tabela 21 que expressa a autossuficiência energética do transporte e distribuição dos dejetos da suinocultura.

*Tabela 21. Consumo energético no transporte e distribuição de dejetos líquidos da suinocultura realizada com caminhões e tratores acoplados ao tanque de fertirrigação.*

Descrição	Potência [kW]	Tanque [m <sup>3</sup> ]	N° cargas/Hora	Consumo energético [kWh/Carga.m <sup>3</sup> ]	Potencial energético [ $kWh_{Ciclo\ Diesel}/m^3_{Dejeto}$ ]	[%]
A	55,15	4,00	1,50	9,19	72,56	13%
A	77,21	4,00	2,00	9,65		13%
A	55,15	4,00	2,00	6,89		10%
B	183,82	8,00	2,00	11,49		16%
A	77,21	6,00	2,50	5,15		7%
A	77,21	5,00	2,00	7,72		11%

A: Transporte e distribuição realizada com trator acoplado ao tanque.

B: Transporte e distribuição realizada com caminhão tanque.

Fonte: Adaptado de Sandi et al. (2011).

Pode-se constatar que o consumo energético para transportar e distribuir o digestato para as culturas, utilizando caminhões ou tratores tanque, não supera 16% do conteúdo energético contido nos dejetos de suínos.

O que podemos concluir dessa discussão é que sistemas de fertirrigação, seja com motobomba elétrica ou motor a diesel, possuem autossuficiência energética quando integrada aos biodigestores. Isso porque, tal como foi enfatizado anteriormente, um m<sup>3</sup> de dejetos da suinocultura tem potencial de gerar 15,20 kWh de energia elétrica, 58,16 kWh de energia mecânica no ciclo Otto e até 72,56 kWh de energia mecânica no ciclo Diesel. Vale frisar que o custo energético para bombear essa mesma quantidade de dejetos é de 0,39 kWh de eletricidade a 11,49

kWh de energia mecânica para caminhão tanque com capacidade de 8 m<sup>3</sup> por carga. Isso corresponde entre 1,55% a 16% do conteúdo energético desses afluentes, tendo em vista as condições da fertirrigação dos vizinhos da granja Pastore e os dados publicados por Sandi et al. (2011). Agora, basta certificar se essa autossuficiência energética do sistema de fertirrigação da granja é economicamente atraente, como será discutido nos tópicos seguintes.

### 5.3. Análise econômica da planta Pastore e do sistema integrado

#### 5.3.1. Custos dos produtos da planta

Na Tabela 22, estão expressos os dados econômicos da planta, como custo de implantação, período de funcionamento e custos de operação e manutenção de cada equipamento. Esses dados foram coletados com o próprio produtor e confirmado com os fornecedores.

Tabela 22. Dados Econômicos do sistema.

Variáveis	Subsistema	Sigla	Unidade	Valor
Período de Funcionamento	Biodigestor (A)	$t_A$	[h/ano]	2.920,00
	Dessulfurização biológica (B)	$t_B$		8.760,00
	Refrigerador (C)	$t_C$		912,50
	S. Agitação (D)	$t_D$		730,00
	Motor Gerador (E)	$t_E$		3.964,96
	S. Fertirrigação (H)	$t_H$		574,06
Investimento inicial	Biodigestor (A)	$I_A$	[US\$]	25.564,33
	Dessulfurização biológica (B)	$I_B$		1.335,45
	Refrigerador (C)	$I_C$		6.295,69
	S. Agitação (D)	$I_D$		1.934,24
	Motor Gerador (E)	$I_E$		30.524,57
	S. Fertirrigação (H)	$I_H$		20.031,75
Custo de Operação & manutenção	Biodigestor (A)	$C_{O\&M_A}$	[US\$/kWh]	0,0010
	Dessulfurização biológica (B)	$C_{O\&M_B}$		0,0015
	Refrigerador (C)	$C_{O\&M_C}$		0,0011
	S. Agitação (D)	$C_{O\&M_D}$		0,0012
	Motor Gerador (E)	$C_{O\&M_E}$		0,0082
	S. Fertirrigação (H)	$C_{O\&M_H}$		0,00509

Fonte: Pastore, Biokohler Biodigestores e Bioter (2021).

Os custos de operação e manutenção (O&M) somaram-se em USD 4.989,61 por

ano, representando 5,8% do investimento inicial na planta (USD 85.686,03), incluindo o sistema de fertirrigação, pois, caso não fosse englobado, os custos de O&M seriam de 5,4%. Em geral, esses custos de O&M estão próximos dos relatados pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) para bioenergia em 2020, que representam entre 2% e 6% dos custos totais de instalação.

Com base na Tabela 22, no conteúdo exergético dos produtos da planta (Tabela16) e nas equações (42) a (44), elaborou-se a Tabela 23, seguindo as condições de análise estabelecidas. Assim, relacionamos os custos dos produtos do sistema integrado com seus respectivos fatores de anuidade ( $f$ ).

*Tabela 23. Custo dos produtos do sistema integrado.*

$i$	$n$	$f$	Custo biofertilizante [USD/kg]	Custo Biogás [USD/kWh]	Custos Eletr. Gerada [USD/kWh]
4%	2	0,53	0,00050	0,022	0,120
4%	4	0,28	0,00029	0,013	0,070
4%	6	0,19	0,00022	0,010	0,053
4%	8	0,15	0,00019	0,009	0,045
4%	10	0,12	0,00017	0,008	0,040
8%	2	0,56	0,00053	0,023	0,126
8%	4	0,30	0,00031	0,014	0,075
8%	6	0,22	0,00024	0,011	0,058
8%	8	0,17	0,00021	0,010	0,050
8%	10	0,15	0,00019	0,009	0,045
12%	2	0,59	0,00056	0,025	0,132
12%	4	0,33	0,00034	0,015	0,081
12%	6	0,24	0,00027	0,012	0,064
12%	8	0,20	0,00023	0,010	0,055
12%	10	0,18	0,00021	0,010	0,051
16%	2	0,62	0,00058	0,026	0,138
16%	4	0,36	0,00036	0,016	0,086
16%	6	0,27	0,00029	0,013	0,069
16%	8	0,23	0,00026	0,012	0,061
16%	10	0,21	0,00024	0,011	0,056

Fonte: Elaboração própria.

Note que os custos de produção do biofertilizante, biogás e eletricidade gerada no sistema integrado, apresentados na Tabela 22, levam em conta o fator de ponderação do biofertilizante ( $f_{p_{Bf}}$ ) em 31,73% e do biogás ( $f_{p_{Bg}}$ ) em 68,27%, conforme eqs. (45) e (46). Esses fatores identificam a parcela (fração equivalente)

de influência de cada subproduto do biodigestor na formação dos seus custos.

É preciso ressaltar que, caso o biofertilizantes não seja tido como um produto útil do sistema, ou seja, que contribui com o retorno do capital investido, os custos do biogás e eletricidade se elevam, como mostrado na Tabela 24. Tal aspecto é justificado por meio do fator de ponderação de produção de biogás, eq. (46) ser igual a 1, neste caso. Assim, esses valores representam os custos de produção real da usina Pastore, uma vez que a eletricidade gerada pelo biogás é o único produto útil que contribui para amortizar o capital investido.

*Tabela 24. Custo dos produtos da planta Pastore.*

<i>i</i>	<i>n</i>	<i>f</i>	Custo Biogás [USD/kWh]	Custo Eletr. Gerada [USD/kWh]
4%	2	0,53	0,033	0,145
4%	4	0,28	0,019	0,085
4%	6	0,19	0,015	0,065
4%	8	0,15	0,013	0,055
4%	10	0,12	0,011	0,049
8%	2	0,56	0,034	0,152
8%	4	0,30	0,021	0,091
8%	6	0,22	0,016	0,071
8%	8	0,17	0,014	0,061
8%	10	0,15	0,013	0,055
12%	2	0,59	0,036	0,159
12%	4	0,33	0,022	0,097
12%	6	0,24	0,018	0,077
12%	8	0,20	0,015	0,067
12%	10	0,18	0,014	0,061
16%	2	0,62	0,038	0,167
16%	4	0,36	0,024	0,104
16%	6	0,27	0,019	0,084
16%	8	0,23	0,017	0,074
16%	10	0,21	0,016	0,068

Fonte: Elaboração própria.

Os valores ressaltados nas Tabelas 23 e 24 podem ser melhor interpretados quando transportados para gráficos que permitem visualizar o desempenho de tais custos em função dos períodos de amortização do capital nas diferentes taxas de juros. As Figuras 14 a 18 ilustram os custos de produção do biofertilizante, do biogás

e da eletricidade gerada.

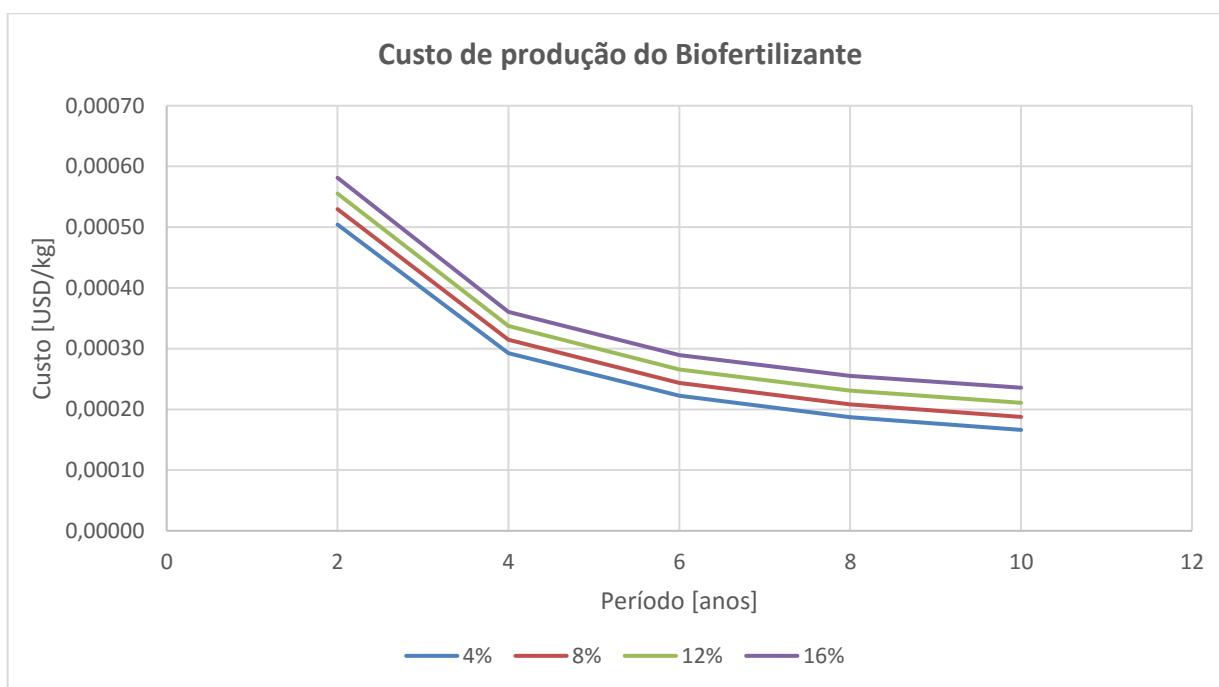


Figura 14. Custo de produção do Biofertilizante.

Fonte: Elaboração própria.

Analisando a Figura 13, observa-se que o custo do biofertilizante é bem pequeno, mesmo nos primeiros anos e independente da taxa de juros. O custo máximo foi de 0,058 centavos de dólar por kg (ou USD 0,55 /m<sup>3</sup>), estabilizando-se a partir do quinto ano, em torno de 0,023 centavos de dólar por kg (ou USD 0,21/ m<sup>3</sup>).

Em estudos futuros seria interessante analisar se esse baixo custo de produção do biofertilizante poderia aproximar, ou mesmo igualar, a dose de máxima eficiência econômica (DMEE) com a dose de máxima eficiência agrônômica (DMEA). E como o custo de transporte é o fator que mais inviabiliza a utilização do biofertilizante líquido, seria interessante deixar seu preço de mercado em função da distância da lavoura determinando, assim, o raio máximo de aplicação que torne o produto competitivo.

Ademais, analisando todos os gastos energéticos na produção do biofertilizante e observando o biogás produzido, computamos que o processo de produção de biofertilizante líquido produz 0,016 kWh de energia elétrica por kg de dejetos (15,20 kWh/m<sup>3</sup> dividido por 953,82 kg/m<sup>3</sup>). Em comparação, Mendes & Bueno (2015) avaliaram o consumo de energia no processo de produção industrial da ureia, em uma das maiores indústrias de fertilizantes do Brasil. Dos resultados obtidos, de

entradas energéticas e insumos para fabricação, os autores relataram que para produzir 1 kg de ureia são consumidos 112,10 MJ de energia, o equivalente a 31,14 kWh. Esse fato reforça a sustentabilidade do processo de produção de biofertilizante que, ao invés de consumir, deixa um saldo positivo de energia na forma de biogás.

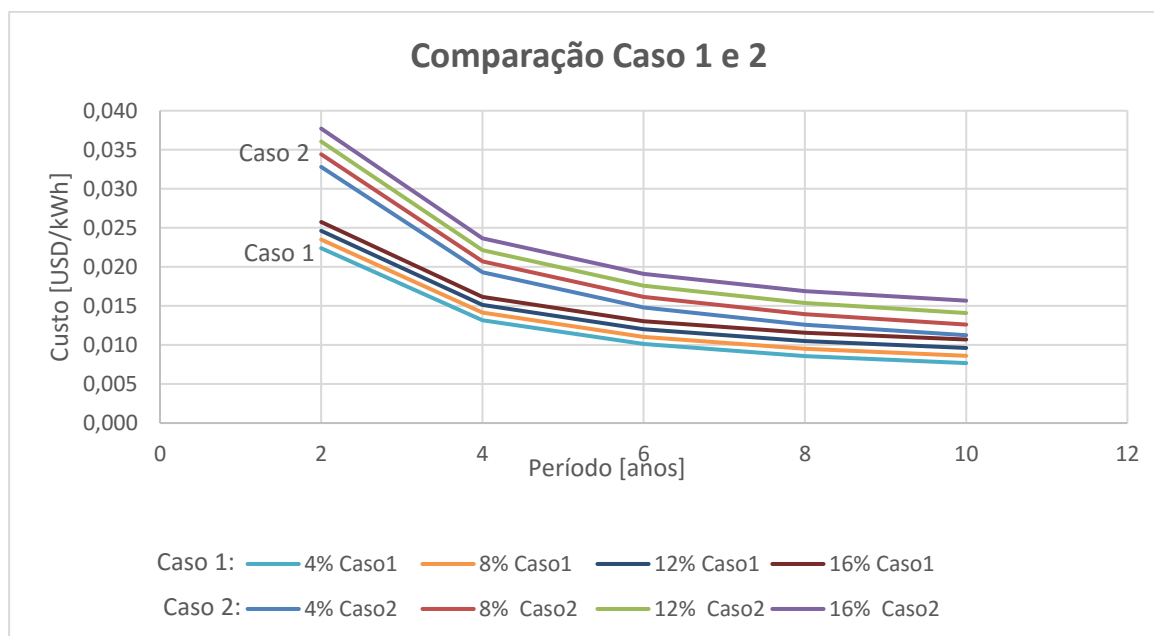


Figura 15. Comparação do custo de produção do biogás com (Caso1) e sem (Caso 2) a comercialização do biofertilizante.

Fonte: Elaboração própria.

Nota-se na Figuras 15 que o custo do biogás tende a diminuir no decorrer do período, sendo observada uma queda de cerca de 39,21% após os 4 primeiros anos e mantendo-se quase constante, a partir do quinto ano, em torno de 0,0102 USD/kWh se o biofertilizante for comercializado e 0,015 USD/kWh se o biogás for o único produto útil do biodigestor. Esses valores estão próximos ao custo de produção do biogás levantado por Cardoso (2011) de 0,052-0,019 USD/kWh e Lamas (2007) de 0,010-0,022 USD/kWh.

A diferença entre o custo de produção do biogás quando o biofertilizante também é produto útil com o custo de produção do biogás quando a eletricidade é o único produto comercializado, pode ser melhor visualizada no gráfico da Figura 15. Fica claro tanto do ponto de vista da termodinâmica (discutido no tópico 4.1.2.) quanto econômico, que o biofertilizante deve ser comercializado para tornar as plantas de biogás ainda mais eficientes e rentáveis.



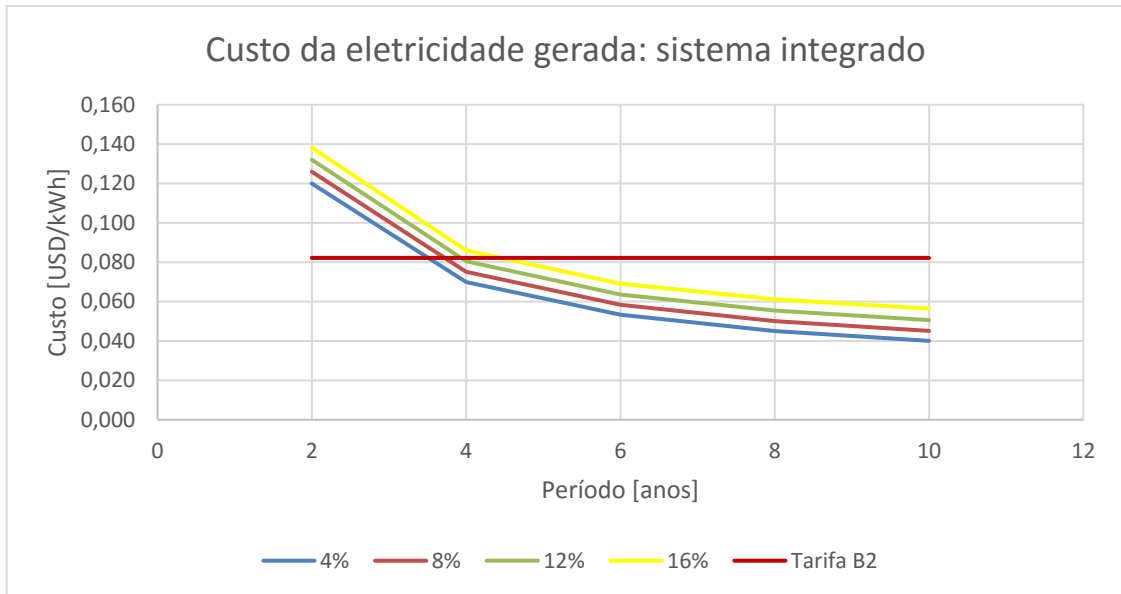


Figura 16. Custo de produção da eletricidade gerada quando o biofertilizante também é considerado produto útil.

Fonte: Elaboração própria.

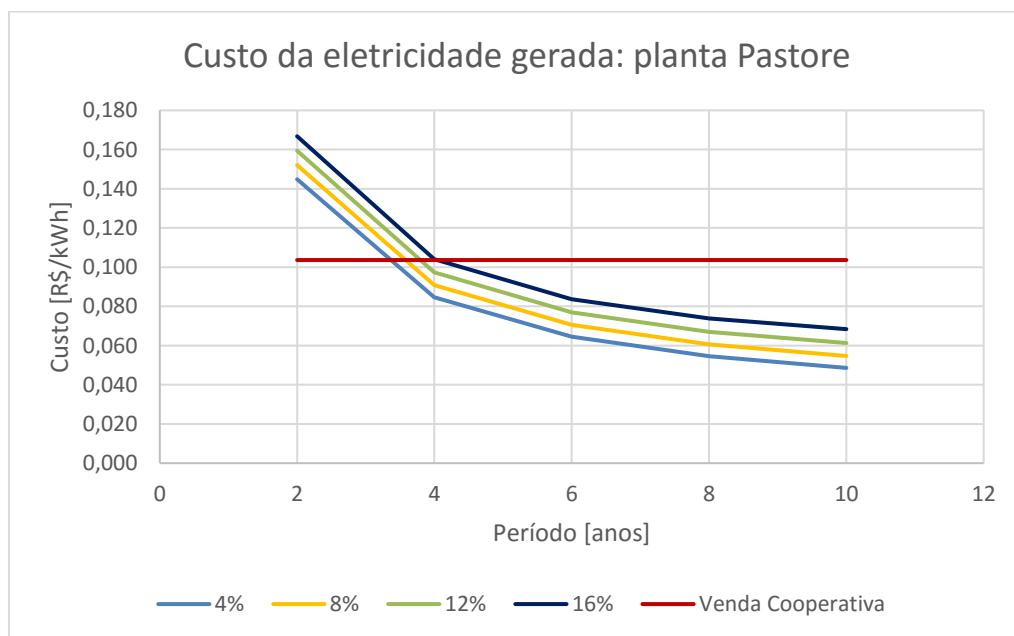


Figura 17. Custo de produção da eletricidade gerada da planta Pastore tendo a eletricidade como único produto útil.

Fonte: Elaboração própria.

As Figuras 16 e 17 mostram que o custo da eletricidade gerada após os 4 primeiros anos variou entre 0,086–0,40 USD/kWh, quando se comercializa o biofertilizante, e 0,104–0,049 USD/kWh, quando a eletricidade gerada é o único produto comercializado, ambos ponderando taxas de juros variando entre 4–16%. Isso reforça que o custo de produção da eletricidade ficaria 17,5% mais econômico,

caso o biofertilizante comece a contribuir com a amortização do capital investido.

Contudo, estes custos da eletricidade gerada na planta Pastore ainda estão dentro do intervalo de valores do custo nivelado de energia (LCOE) relatados pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2021) para bioenergia em 2020, com média ponderada de 0,057 USD/kWh na Índia até 0,097 USD/kWh na América do Norte. Além dos valores previstos por trabalhos semelhantes como Prasodjo et al. (2013), com o LCOE de resíduos variando entre 0,111-0,058 USD/kWh.

A linhas vermelhas e horizontais ilustradas nas Figuras 16 e 17 representam os custos na compra da eletricidade no grupo tarifário B2 e o preço na venda da eletricidade para as concessionárias de energia, respectivamente. É possível visualizar que entre 1 ano e meio (para  $i = 4\%$ ) a 4 anos ( $i = 16\%$ ) o custo de produção da eletricidade no sistema integrado se torna inferior a tarifa B2, indicando viabilidade na autossuficiência energética, uma vez que usar a energia ao custo de produção é mais econômico que comprar a energia no grupo B2. Por outro lado, a venda da eletricidade para as concessionárias de energia é maior do o custo de produção da eletricidade na planta Pastore, variando entre 3,35 - 4 anos (respectivos as taxas de juros de 4% a 16%), então, após esse período a usina trará retorno financeiro, uma vez que as receitas são superiores aos custos de produção.

Como referência, usando a Tabela 3, foram determinados os preços dos combustíveis convencionais presentes no mercado por unidade de exergia, como Gasolina, Diesel e GLP (Gás liquefeito de petróleo), tal como exposto na Tabela 25. Lembrando que o valor da eletricidade levou em conta os preços praticados pela Cooperativa de Energias Renováveis do Paraná, regulamentada pela ANEEL (2022). Assim, os custos dos produtos da planta Pastore e do sistema integrado (Tabelas 24 e 25) podem ser comparados com os custos dos insumos disponíveis no mercado.

Tabela 25. Insumos de sistemas de fertirrigação disponíveis no mercado.

Custo Combustíveis				
Custo do GLP [USD /kWh]	Custo do Diesel [USD /kWh]	Custo do Gasolina [USD /kWh]	Custo da eletricidade [USD/kWh]	
			Tarifa B2	Venda Cooperativa
0,087	0,083	0,090	0,082	0,104

Fonte: Elaboração própria.

Os altos custos ilustrados na Tabela acima estão atribuídos principalmente aos aumentos significativos nos preços dos combustíveis fósseis. Estes foram causados, primeiro, pela reabertura dos países que vacinaram a população contra a covid19, fazendo aumentar a demanda, e aliada com a dinâmica da OPEP (Organização dos Países Produtores de Petróleo) que seguraram os estoques para valorizar o preço do barril, além da seca histórica que afetou o Sudeste e Centro Oeste, reduzindo o volume dos reservatórios de abastecimento de hidroelétricas, o que provocou aumento nos preços da eletricidade.

Esses fatores aliados à crise política na Bielorrússia, também justificam os preços elevados dos principais fertilizantes minerais presentes no mercado, como salientados na Tabela 26.

*Tabela 26. Insumos de sistemas de Fertirrigação disponíveis no mercado.*

Custo fertilizante Mineral		
Ureia (45% N) [US\$/kg]	Super Fosfato triplo (SFT) (43% $P_2O_5$ ) [US\$/kg]	Cloreto de Potássio (KCl) (60% $K_2O$ ) [US\$/kg]
0,319	0,425	0,204

Fonte: Elaboração própria.

### 5.3.2. Viabilidade econômica das alternativas

Tendo por base os custos do biogás e da eletricidade gerada apresentados na Tabela 24 e os valores de mercado dos combustíveis, Tabela 25, foi realizado o levantamento dos lucros reais da usina Pastore com a venda da eletricidade gerada, conforme ilustrado na Tabela 27, utilizando a eq. (48).

Tabela 27. Viabilidade econômica Planta Pastore.

i	n	$C_{GLP} - C_{BG}$	$C_{Diesel} - C_{BG}$	$C_{gasolina} - C_{BG}$	$C_{Tarifa B_2} - C_{eletr. G.}$	Lucro da Planta Pastore [USD/ano]
4%	2	0,054	0,050	0,057	-0,041	-11.441,40
4%	4	0,067	0,064	0,071	0,019	5.281,14
4%	6	0,072	0,068	0,075	0,039	10.843,91
4%	8	0,074	0,071	0,078	0,049	13.616,76
4%	10	0,075	0,072	0,079	0,055	15.273,67
8%	2	0,052	0,049	0,056	-0,048	-13.448,65
8%	4	0,066	0,062	0,069	0,013	3.545,85
8%	6	0,071	0,067	0,074	0,033	9.166,21

<b>8%</b>	<b>8</b>	0,073	0,069	0,076	0,043	11.943,43
<b>8%</b>	<b>10</b>	0,074	0,071	0,078	0,049	13.583,82
<b>12%</b>	<b>2</b>	0,051	0,047	0,054	-0,056	-15.479,27
<b>12%</b>	<b>4</b>	0,065	0,061	0,068	0,006	1.752,60
<b>12%</b>	<b>6</b>	0,069	0,066	0,073	0,027	7.399,44
<b>12%</b>	<b>8</b>	0,071	0,068	0,075	0,037	10.151,85
<b>12%</b>	<b>10</b>	0,073	0,069	0,076	0,042	11.748,48
<b>16%</b>	<b>2</b>	0,049	0,045	0,052	-0,063	-17.531,94
<b>16%</b>	<b>4</b>	0,063	0,059	0,066	0,000	-94,96
<b>16%</b>	<b>6</b>	0,068	0,064	0,071	0,020	5.550,34
<b>16%</b>	<b>8</b>	0,070	0,066	0,073	0,030	8.253,04
<b>16%</b>	<b>10</b>	0,071	0,067	0,074	0,035	9.784,30

Fonte: Elaboração própria.

Analogamente, foram levantados os lucros hipotéticos do sistema de fertirrigação integrado ao biodigestor, Tabela 28. Estes utilizam custos de produção da eletricidade gerada e do biofertilizante, Tabela 23, além dos valores de mercado da venda de eletricidade e dos fertilizantes minerais, Tabelas 25 e 26.

Tabela 28. Viabilidade econômica: sistema integrado.

<i>i</i>	<i>n</i>	$(C_{TarifaB_2} - C_{eL.G.})$	$(C_{fertMineral} - C_{BF})$	Lucro Digestato [USD/ano]	Lucro Digestato (74%) [USD/ano]	Lucro eletricidade [USD/ano]	Lucro S. Integrado [USD/ano]
<b>4%</b>	<b>2</b>	-0,038	0,448	8.134,77	2.115,04	-10.202,59	-4.182,86
<b>4%</b>	<b>4</b>	0,012	0,448	8.138,61	2.116,04	3.308,87	9.331,44
<b>4%</b>	<b>6</b>	0,029	0,448	8.139,89	2.116,37	7.803,46	13.826,98
<b>4%</b>	<b>8</b>	0,037	0,448	8.140,53	2.116,54	10.043,86	16.067,85
<b>4%</b>	<b>10</b>	0,042	0,448	8.140,91	2.116,64	11.382,61	17.406,88
<b>8%</b>	<b>2</b>	-0,044	0,448	8.134,31	2.114,92	-11.824,41	-5.805,02
<b>8%</b>	<b>4</b>	0,007	0,448	8.138,21	2.115,94	1.906,79	7.929,06
<b>8%</b>	<b>6</b>	0,024	0,448	8.139,50	2.116,27	6.447,92	12.471,15
<b>8%</b>	<b>8</b>	0,032	0,448	8.140,14	2.116,44	8.691,85	14.715,56
<b>8%</b>	<b>10</b>	0,037	0,448	8.140,52	2.116,53	10.017,25	16.041,23
<b>12%</b>	<b>2</b>	-0,050	0,448	8.133,84	2.114,80	-13.465,10	-7.446,06
<b>12%</b>	<b>4</b>	0,002	0,448	8.137,80	2.115,83	457,88	6.479,85
<b>12%</b>	<b>6</b>	0,019	0,448	8.139,10	2.116,17	5.020,40	11.043,33
<b>12%</b>	<b>8</b>	0,027	0,448	8.139,73	2.116,33	7.244,29	13.267,69
<b>12%</b>	<b>10</b>	0,032	0,448	8.140,10	2.116,42	8.534,33	14.558,00
<b>16%</b>	<b>2</b>	-0,056	0,448	8.133,37	2.114,68	-15.123,61	-9.104,92
<b>16%</b>	<b>4</b>	-0,004	0,448	8.137,38	2.115,72	-1.034,91	4.986,75
<b>16%</b>	<b>6</b>	0,013	0,448	8.138,67	2.116,05	3.526,37	9.548,99
<b>16%</b>	<b>8</b>	0,021	0,448	8.139,29	2.116,22	5.710,09	11.733,17
<b>16%</b>	<b>10</b>	0,026	0,448	8.139,64	2.116,31	6.947,32	12.970,66

Nota: O "lucro Digestato (74%)" considera deságios de 74% na venda do digestato para terceiros, conforme Miele et al. (2015).

Fonte: Elaboração própria.

Como expresso na Tabela 28, o benefício econômico propiciado pela aplicação do biofertilizante em áreas próprias é igual ao seu valor fertilizante, podendo chegar a USD 8.140,91 por ano. Entretanto, quando aplicados em áreas de terceiros, mostram valores iguais ao preço de venda, podendo sofrer deságios de até 100% em relação ao valor do fertilizante mineral (Caso da granja Pastore). Por esse motivo, neste estudo ponderamos deságios de 74% para representar o possível preço do digestato, como discutido por Miele et al. (2015). Logo, para avaliar os lucros com maior precisão é aconselhável, em estudos futuros, estabelecer os deságios na venda do fertilizante orgânico, bem como os custos de transporte e distribuição para áreas de terceiros.

Os resultados das Tabelas 27 e 28 podem ser melhor interpretados pelos gráficos das Figuras 19 e 20. Todos ilustram os lucros do sistema em função do período de amortização para as diferentes taxas de juros, permitindo extrair informações valiosas acerca da viabilidade do investimento.

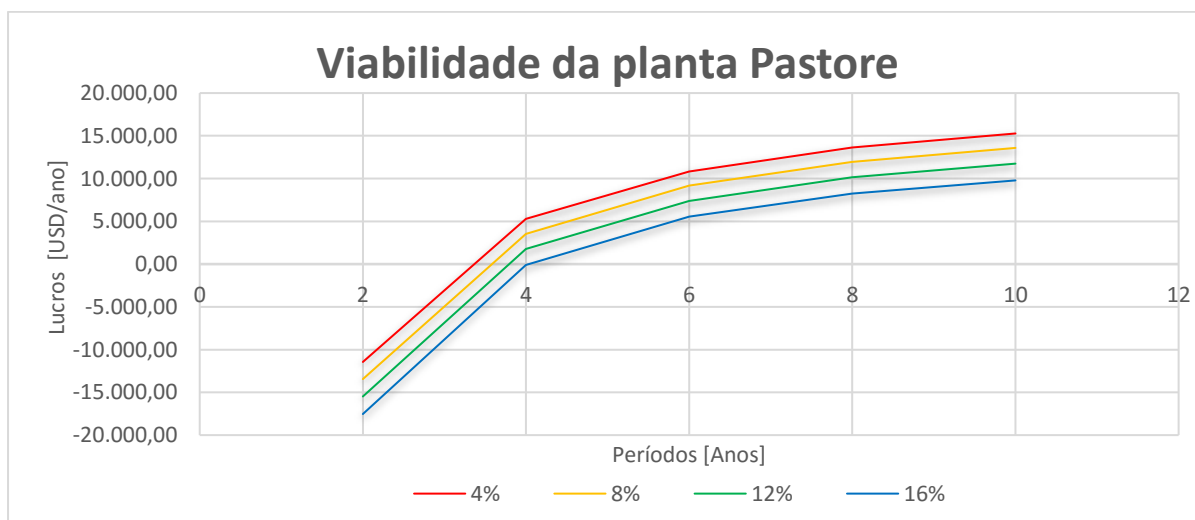


Figura 18. Lucro anual da planta Pastore com a venda da eletricidade gerada.

Fonte: Elaboração própria.

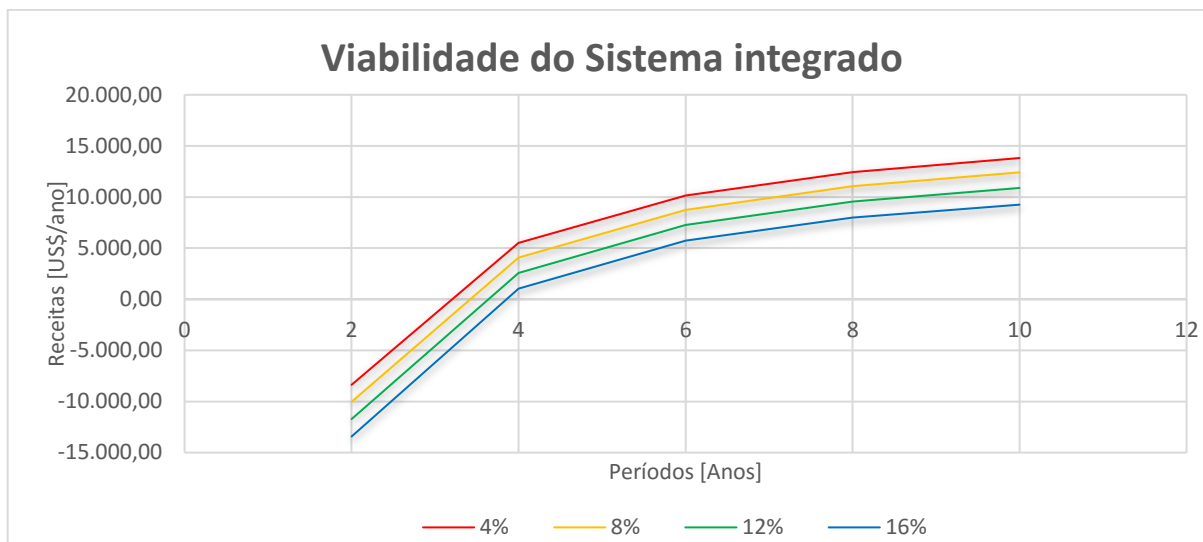


Figura 19. Lucro anual hipotético do sistema integrado como custo evitado na compra da eletricidade, venda da eletricidade gerada e biofertilizante com deságio de 74% do valor NPK.

Fonte: Elaboração própria.

Com base nos gráficos das Figuras 18 e 19, é possível observar que os lucros crescem em direção ao período de retorno do capital investido (payback simples). Isso possibilita analisar o desempenho de cada um dos produtos associados à planta com o período de retorno do investimento que, no caso, foi entre 3,5 a 4 anos para a planta Pastore, com a venda da eletricidade gerada, e de 3 a 3,5 anos para a integração do biodigestor com o sistema de fertirrigação, que inclui o custo evitado na compra de eletricidade no grupo tarifário B2, a venda do restante da eletricidade gerada e do biofertilizante líquido.

Agora, para responder se o custo extra de implantação de um sistema de fertirrigação com autossuficiência energética é viável ou não ao longo de 10 anos, utilizamos alguns indicadores econômicos como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback Descontado (PBD), aplicados tanto para a planta Pastore quanto para o sistema integrado, utilizando as equações (52), (53) e (54.3).

Tabela 29. Potencial econômico de implementação do projeto ao longo de 10 anos.

Tecnologias	(i)	PBD	VPL	TIR	Viabilidade
<b>Planta Pastore</b>	4%	4,47	70.337,02	37%	É economicamente atrativo
	8%	4,81	55.291,24	30%	É economicamente atrativo
	12%	6,31	38.949,99	23%	É economicamente atrativo
	16%	8,08	21.461,68	15%	Não é viável
<b>Sistema Integrado</b>	4%	4,60	83.340,73	34%	É economicamente atrativo
	8%	4,83	90.877,76	30%	É economicamente atrativo
	12%	6,13	77.307,23	25%	É economicamente atrativo
	16%	6,55	62.784,13	20%	É economicamente atrativo

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados descritos na Tabela 29 revelam a viabilidade termoeconômica dos dois sistemas analisados, indicando que são viáveis para as várias taxas de juros aplicadas, com exceção da taxa de desconto de 16% para a usina Pastore que, no caso, não é financeiramente atrativa, com TIR de 15% ( $TIR < Taxa\ de\ desconto$ ). Em ambos os casos o VPL é positivo, reforçando que as duas tecnologias são economicamente viáveis.

E como o VPL e a TIR do sistema integrado, no geral, são maiores que na planta Pastore, com um período de retorno menor, então, podemos concluir que, para as diversas taxas de juros aplicadas, o retorno do investimento no sistema que vende eletricidade, biofertilizante e mantém a fertirrigação com autossuficiência energética é mais atrativa do que a usina real que vende apenas a eletricidade gerada e, portanto, é a melhor opção dentre as duas alternativas.

É importante salientar que esse fato não se deve a autossuficiência energética, mas sim a venda do biofertilizante líquido, como observado nas Figuras 20 a 22, em que separamos a contribuição dos lucros do sistema integrado, e na Tabela 30, em que comparamos o custo evitado com o uso da eletricidade gerada e a venda desta mesma quantidade de energia, considerando a potência requerida do sistema de fertirrigação em 12,95 kW.

*Tabela 30. Comparativo entre o custo evitado com a autossuficiência energética e os lucros na venda desta quantidade de energia elétrica.*

<b>i</b>	<b>n</b>	<b>Custo evitado [USD/ano]</b>	<b>Lucro na venda da eletricidade [USD/ano]</b>
<b>4%</b>	<b>2</b>	-280,81	-306,47
<b>4%</b>	<b>4</b>	91,07	141,46
<b>4%</b>	<b>6</b>	214,78	290,46
<b>4%</b>	<b>8</b>	276,44	364,74
<b>4%</b>	<b>10</b>	313,29	409,12
<b>8%</b>	<b>2</b>	-325,44	-360,23
<b>8%</b>	<b>4</b>	52,48	94,98
<b>8%</b>	<b>6</b>	177,47	245,53
<b>8%</b>	<b>8</b>	239,23	319,92
<b>8%</b>	<b>10</b>	275,71	363,85
<b>12%</b>	<b>2</b>	-370,60	-414,63
<b>12%</b>	<b>4</b>	12,60	46,94
<b>12%</b>	<b>6</b>	138,18	198,20
<b>12%</b>	<b>8</b>	199,39	271,93
<b>12%</b>	<b>10</b>	234,89	314,69
<b>16%</b>	<b>2</b>	-416,25	-469,61
<b>16%</b>	<b>4</b>	-28,48	-2,54
<b>16%</b>	<b>6</b>	97,06	148,67
<b>16%</b>	<b>8</b>	157,16	221,07
<b>16%</b>	<b>10</b>	191,21	262,08

Nota: Tanto o custo evitado quanto o lucro na venda da eletricidade consideram a potência requerida pelo sistema de fertirrigação de 12,95 kW.

Fonte: Elaboração própria.

Como observado na Tabela acima, o lucro com a venda da eletricidade gerada na planta de biogás é superior ao custo evitado com a autossuficiência energética. Isso se justifica pelo fato da compra da eletricidade no grupo tarifário B2 (Rural) (USD 0,082/kWh) ser inferior à venda da eletricidade gerada nas concessionárias (USD 0,104/kWh). Logo, é mais atrativa vender a um preço superior que a utilizar na fertirrigação. No entanto, o sistema fora da rede (off grid) é uma infraestrutura de fornecimento de energia elétrica relevante para pequenas comunidades em áreas remotas e rurais onde os pontos de conexão não estão disponíveis.



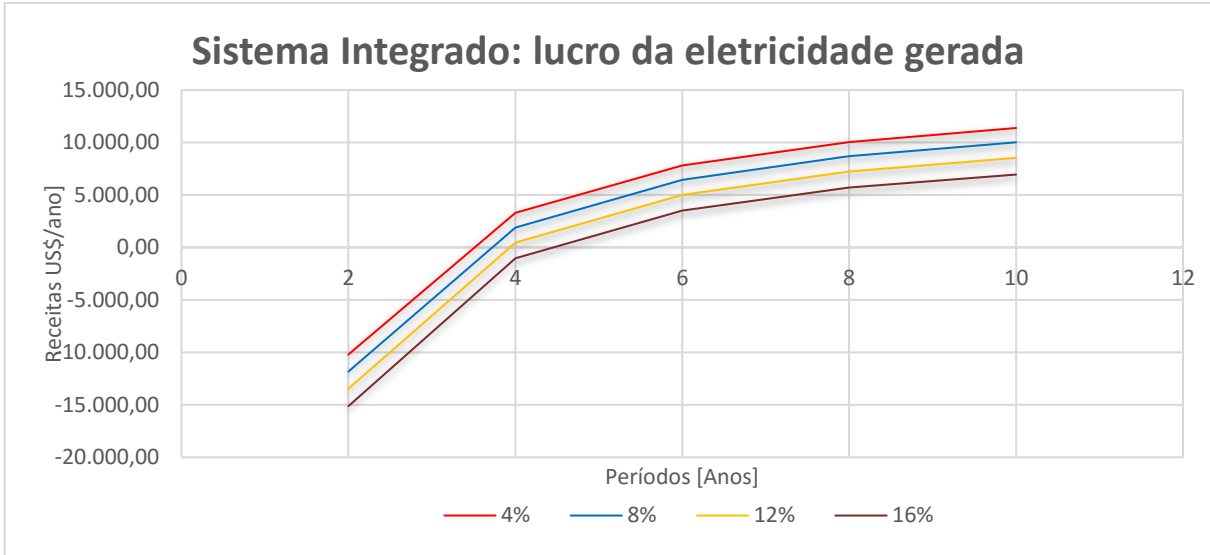


Figura 20. Lucro anual do sistema integrado com a venda da eletricidade gerada.

Fonte: Elaboração própria.

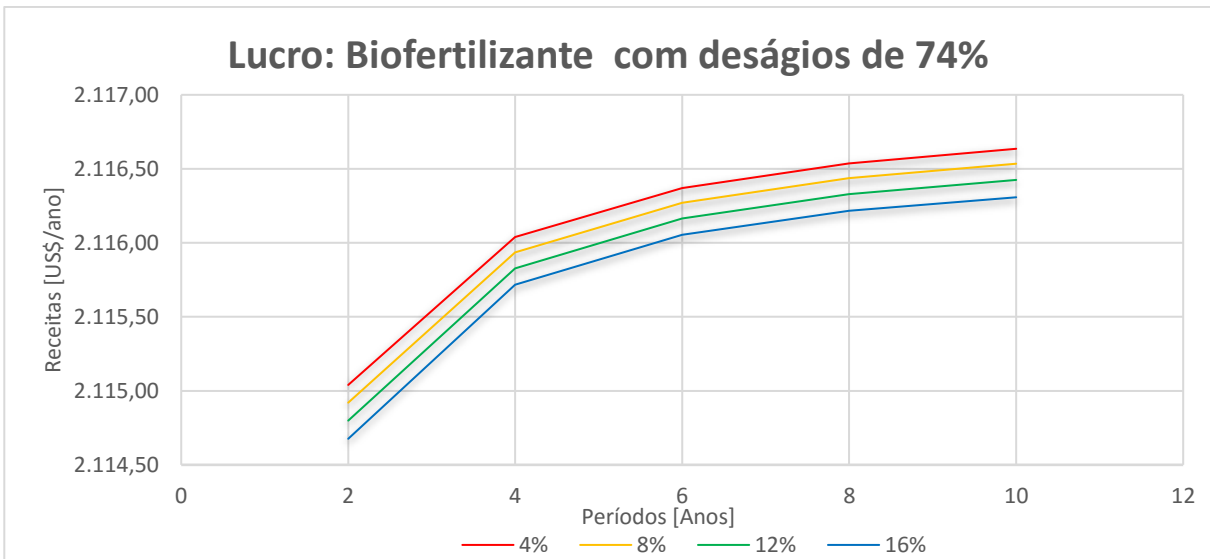


Figura 21. Lucro anual do sistema integrado com a venda do biofertilizante líquido com deságio de 74% do valor NPK

Fonte: Elaboração própria.

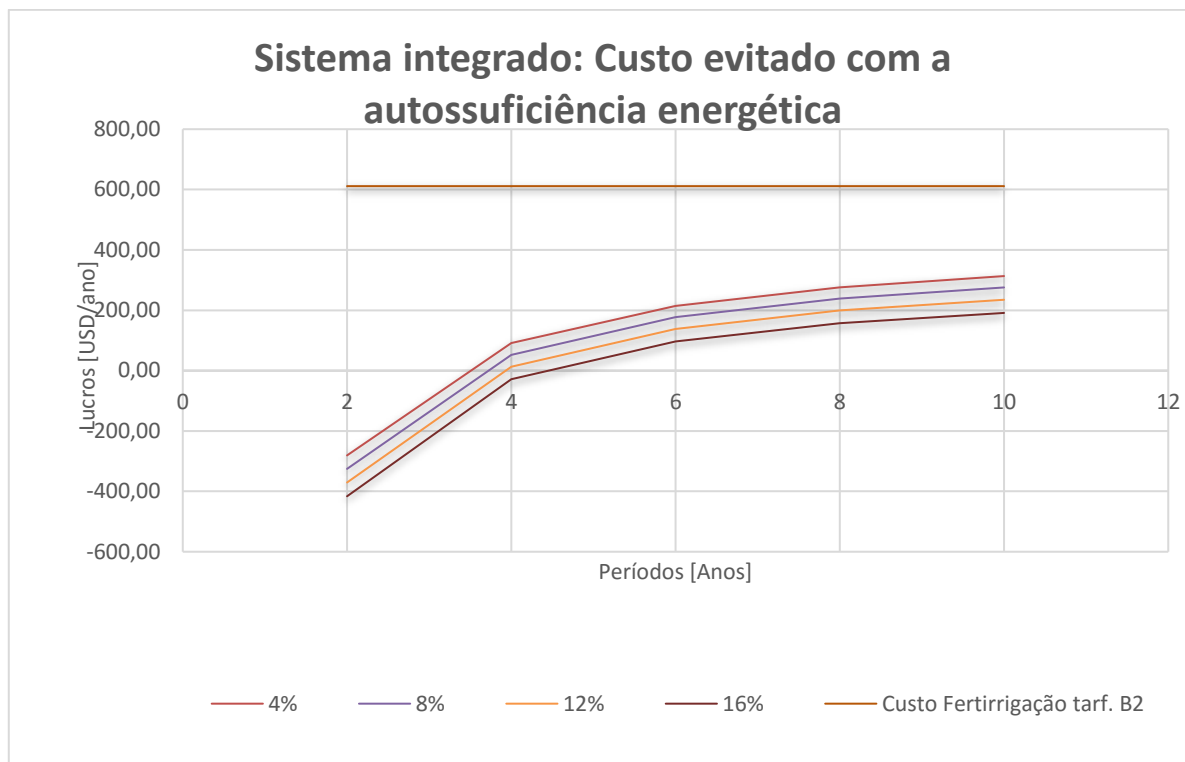


Figura 22. Custo evitado pelo uso da eletricidade gerada no sistema integrado.

Fonte: Elaboração própria.

As Figuras 21 a 23 evidenciam que um dos maiores lucros do sistema integrado se deve ao custo evitado na compra de fertilizantes minerais com o aproveitamento do biofertilizante, mesmo levando em conta deságios de 74% em sua venda para terceiros. A comercialização do digestato pode tornar as usinas de biogás ainda mais rentáveis, sobretudo no que se refere à correta destinação do efluente final e da necessidade de o empreendimento ser sustentável no longo prazo.

Quanto aos benefícios dessa alternativa, podemos elencar o uso dos nutrientes contidos em sua composição, o seu papel de agente condicionador do solo pelo aporte de carbono orgânico, conservação da umidade que atuam não só na planta, como também na atividade microbiana do solo, redução de despesas dos agricultores com a adubação mineral e, principalmente, no aumento da produtividade das lavouras (BARROS, 2019). É importante destacar que as doses de biofertilizantes devem ser aplicadas no solo respeitando as recomendações específicas, tais como: classe de fertilidade do solo, demanda exigida pelas culturas, teor e índice de eficiência agrônômica do fertilizante (Kunz et al, 2019) e demais cuidados relatados na Instrução Normativa 11 (FATMA, 2014).

## 6. CONCLUSÕES

Análises termodinâmicas que identificam as eficiências de 1ª e 2ª lei dos subsistemas da usina Pastore, localizada no município de Toledo (PR), abrangendo o potencial energético e exergético dos dejetos da suinocultura frente ao consumo energético de sistemas de fertirrigação, foram conduzidas. Estudos de viabilidade econômica tanto da planta Pastore, acompanhada no estudo de caso, quanto de um sistema hipotético de fertirrigação com autossuficiência energética, também foram apresentados e discutidos nesta pesquisa. Os objetivos foram cumpridos, constando-se que a integração hipotética do biodigestor com o sistema de fertirrigação possui autossuficiência energética, porém esta autossuficiência não é atrativa financeiramente no tocante à venda da eletricidade para as concessionárias de energia. Dentre os principais resultados e conclusões deste estudo, resumimos as seguintes:

- A exergia contida no estrume (935,71 kW) é principalmente conservada no biofertilizante (685,63 kW) e parte dela é convertida em eletricidade (70kW), sendo vendida nas concessionárias. Entretanto, o digestato contém teores de nitrogênio e oxigênio elevados e baixo teor de carbono e hidrogênio, o que reduz sua energia calorífica, inviabilizando sua valorização energética e necessitando de outras formas de valorização como, por exemplo, seu uso na agricultura;
- A destruição de exergia ( $\dot{D} = 34,87 \text{ kW}$ ) e irreversibilidades ( $\dot{I} = 37,14 \text{ kW}$ ) da planta são elevadas quando consideramos a produção de biogás (unidade F) separadamente, ou seja, quando o digestato é rejeitado como perda (caso da planta Pastore). Isso está indicado no " $\dot{I}P_i$ ", que sugere um potencial de melhoria da unidade F em 726,80 kW, representando boa parte da exergia do digestato que sai do biodigestor (685,63 kW, em base seca). Em outras palavras, para minimizar perdas de exergia na planta, o indicativo termodinâmico " $\dot{I}P_i$ " sugere aproveitar esses dois subprodutos simultaneamente;
- A eficiência energética de produção de biogás (unidade F) de 29,92% aliada ao rendimento do grupo motor gerador (E) em 26,40%, permite afirmar que o dejetos analisado tem potencial de gerar 15,20 kWh de eletricidade por m<sup>3</sup> de

dejeito suíno. Ou ainda 58,16 kWh de energia mecânica no ciclo Otto até 72,56 kWh de energia mecânica no ciclo Diesel, considerando eficiências de combustão de 28,56 e 35%, respectivamente;

- O custo energético para bombear essa mesma quantidade de dejeito é entre 0,39 kWh de eletricidade a 11,49 kWh energia mecânica para caminhão tanque com capacidade de 8 m<sup>3</sup> por carga. Isso permite concluir que o sistema de fertirrigação possui autossuficiência energética, refletindo-se entre 1,55% a 16% do conteúdo energético desses afluentes, tendo em vista as condições da fertirrigação dos vizinhos da granja Pastore e os dados publicados por Sandi et al. (2011);
- As métricas econômicas, como VPL, TIR e Payback, calculadas a partir dos custos de produção da eletricidade e do biofertilizante da planta Pastore e do sistema integrado, ao longo de 10 anos, revelam a viabilidade termoeconômica dos dois sistemas analisados indicando que são viáveis, com VPL positivos para as várias taxas de juros aplicadas, com exceção da taxa de desconto de 16% para a usina Pastore, que no caso não é financeiramente atrativa, com TIR de 15% (*TIR < Taxa de desconto*);
- O VPL e a TIR do sistema integrado, no geral, são maiores do que na planta Pastore, com um período de retorno menor. Então, podemos concluir que, para as diversas taxas de juros aplicadas, o retorno do investimento no sistema que vende eletricidade e biofertilizante é mais atrativa do que a usina real que vende apenas a eletricidade gerada e, portanto, é a melhor opção dentre as duas alternativas;
- O lucro com a venda da eletricidade gerada na planta de biogás é superior ao custo evitado com a autossuficiência energética. Portanto, a autossuficiência energética não é o fator que torna o sistema integrado mais atrativo financeiramente, mas sim a venda do biofertilizante líquido;
- Os maiores lucros do sistema integrado se devem ao custo evitado na compra de fertilizantes minerais com o aproveitamento do biofertilizante, devido ao seu baixo custo de produção, frente aos elevados preços dos principais fertilizantes disponíveis no mercado. Logo, a comercialização do digestato pode tornar as usinas de biogás ainda mais rentáveis, sobretudo no que se refere à correta destinação do efluente final e da necessidade de o

empreendimento ser sustentável no longo prazo.

No intuito de melhorar o desempenho geral das usinas de biogás, minimizando as ineficiências termodinâmicas, é aconselhável conduzir avaliações técnico-econômica de sistemas de valorização do digestato, como sistemas de secagem, concentração de nutrientes, fertirrigação, alimentação de microalgas, dentre outros. Além disso, são sugeridas análises que estabeleçam os possíveis valores de mercado desses fertilizantes orgânicos, bem como os custos de transporte e distribuição para áreas de terceiros, a fim de avaliar com maior precisão o potencial econômico desse efluente.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDA. **Associação Nacional para Difusão de Adubos**. Disponível em: <http://anda.org.br/?mpg=03.00.00&ver=por>. Acesso em: 20 de outubro de 2021.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.dme-pc.com.br/atendimento/tarifas>. Acesso em: 29 de novembro de 2021.

ANP. **Agência Nacional do Petróleo**. Disponível em: <https://preco.anp.gov.br/>. Acesso em: 29 de novembro de 2021.

AOAC- Association of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis**. 20th ed. Gaithersburg, MD: AOAC International, 2016.

AYODELE, T.R.; OGUNJUYIGBE, A.S.O.; ALAO, M.A. Economic and environmental assessment of electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste for the city of Ibadan, Nigeria. **Journal of Cleaner Production**. [S. l.]: Elsevier BV, dez. 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.08.282. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.282>.

BANCO CENTRAL DO BRASIL – BCB. Site disponível em <https://www.bcb.gov.br/estatisticas/txjuros>. Acessado em 31 jan de 2021.

BARATI, M. R.; AGHBASHLO, M.; GHANAVATI, H.; TABATABAEI, M.; SHARIFI, M.; JAVADIRAD, G.; DADAK, A.; SOUFIYAN, M.M. Comprehensive exergy analysis of a gas engine-equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 151, p. 753-763, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.017>.

BARRERA, E. L., ROSA, E., SPANJERS, H., ROMERO, O., de MEESTER, S., & DEWULF, J. A comparative assessment of anaerobic digestion power plants as alternative to lagoons for vinasse treatment: life cycle assessment and exergy analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 459–471, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.095>.

BARROS, E. C. et al. Potencial agrônômico dos dejetos de suínos. **Embrapa Suínos e Aves**, v. 1, p. 52, 2019.

BEIL, M.; BEYRICH, W. Biogas upgrading to biomethane. In: WELLINGER, A., MURPHY, J., BAXTER, D. (Ed.) *The biogas handbook: science, production and applications*. Cambridge: **Woodhead Publishing**, p. 342–377, 2013.

BEJARANO, Carlos Humberto; OLIVEIRA JÚNIOR, Silvio de. **Indicadores exergéticos para avaliação do impacto ambiental de processos de conversão de energia**. [S.l: s.n.], 2004.

BERNARDO, S. MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. Manual de

irrigação. **Editora UFV**, 9. ed., 2019.

BOIE W. Fuel technology calculations. **Energietechnik**. v.16, p.3-309, 1953.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es.pdf>> Acesso em 23 out 2019.

CALZA, Lana F. et al. **Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás**. Eng. Agricultura, Jaboticabal, v. 35, n. 6, p. 990-997, dez. 2015. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162015000600990&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162015000600990&lng=pt&nrm=iso)>. acessos em 17 set. 2019.

CANTRELL, K. B.; DUCEY, T.; RO, K. S.; HUNT, P. G.. **Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities**. Bioresource Technology, [S.L.], Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.061>, v. 99, n. 17, p. 7941-7953, nov. 2008.

CARDOSO, Hudson Araújo; BESSA., Kleiber Lima de. **Estudo da viabilidade termoeconômica de um biodigestor em bases exergeticas**. 2011. Monografia - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semiárido., Mossoró, 2011.73p.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. C. **Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.30, n.5, p.831-844, 2010.

CEPEA; USP; CNA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Universidade de São Paulo; Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **PIB do agronegócio** – dados de 1996 a 2021. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>> Acesso em: 04 nov. 2021.

CHANNIWALA S., PARIKH P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. **Fuel**, v.81(8), p.1051–63, 2002.

CHEN, Y.R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. **Agric. Wastes**, v. 8, p. 65–81,1983.

COELHO, E. F. et al. Fertirrigação. **Informe Agropecuário**, v. 31, n. 259, p. 58–70, 2010.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica de**

**produção no Brasil por unidades da Federação.** Brasília, 2021. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=>>>. Acesso em: 20 out. 2021.

CONAB- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safras Brasileiras.** Grãos, v. 6 - Safra 2020/2021 - Nono levantamento, Brasília, 2021.

CORTEZ, L. A. B; LORA, E.E.S; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia.** Editora da Unicamp, Campinas, 2008.

CRUZ A. C., PEREIRA F. S, FIGUEIREDO V. S. **Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio:** avaliação do potencial econômico brasileiro. Indústria química, BNDES Setorial 45, p. 137-187, 2017.

DEUBLEIN D., STEINHAUSER A. **Biogas from Waste and Renewable Resources:** an Introduction. John Wiley & Sons, 2011.

EBOH, F. C.; AHLSTRÖM, P.; RICHARDS, T. Estimating the specific chemical exergy of municipal solid waste. **Energy Science and Engineering**, v. 4, n. 3, p. 217–231, 2016.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2019:** Ano Base 2018. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>> Acesso em: 23 out., 2019.

FATMA - FUNDAÇÃO DO MEIO AMBIENTE. Instrução Normativa n. 11, Suinocultura. Florianópolis, 2014. 37 p. Disponível em: <http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/ins/11/IN%2011%20Suinocultura.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2016.

FERNANDEZ-LOPEZ, M.; PUIG-GAMERO, M.; LOPEZ-GONZALEZ, D.; AVALOS-RAMIREZ, A.; VALVERDE, J.; SANCHEZ-SILVA, L. Life cycle assessment of swine and dairy manure: Pyrolysis and combustion processes. **Bioresource Technology**. [S. l.]: Elsevier BV, abr. 2015. DOI 10.1016/j.biortech.2015.01.140. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.140>.

FERTILIZER WEEK; FERTILIZER INTERNATIONAL; WORLD BANK. **Preços das Mercadorias.** Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/>>. Acesso em: 29 de novembro de 2021.

FRONTE-PALMA C. Methods for the Treatment of Cattle Manure:A Review. C. v. 5 (2): 27, 2019. <https://doi.org/10.3390/c5020027>.



FRIEDL A., PADOUVAS E., ROTTER H., VARMUZA K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. **Anal Chim Acta** v. 544(1), p. 191-198, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.01.041>.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 2013. 850 p.

GARCIA, F.P., PELLEGRINI, M.C. **Fundamentos do processo da digestão anaeróbia**. Série Pesquisa e Desenvolvimento. Companhia Energética de São Paulo, São Paulo, 1981.

GLEYSOON. **Geração e Aproveitamento Energético do Biogás**. PROJETO PROBIOGÁS, 2016. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/hidrolise-na-biodigestao-anaerobia/>>, acesso em 10/10/2018.

HAUPENTHAL, Soni Willian. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2019. **Utilização de um sistema fotovoltaico amorfo em sistema de irrigação por microaspersão**. Professor Orientador Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira.

HEPBASLI A. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v.12, p. 593-661, 2008.

HOUSSEINPOUR S, AGHBASHLO M, TABATABAEI M, YOUNESI H, MEHRPOOYA M, RAMAKRISHNA S. Multi-objective exergy-based optimization of a continuous photobioreactor applied to produce hydrogen using a novel combination of soft computing techniques. **Int J Hydrogen Energy**, 2017.

IRNEA. **Renewable Power Generation Costs in 2020**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021.

IPNI- INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE. **Fertilizantes**. 2017. Disponível em: <<http://brasil.ipni.net/article/BRS-3132>>. Acesso em: 08 set. 2019.

KHOSRAVI, S.; PANJESHAHI, M.H.; ATAEI, A (2013). Application of exergy analysis for quantification and optimisation of the environmental performance in wastewater treatment plants', **Int. J. Exergy**, Vol. 12, No. 1, pp.119–138.

KOBAYASHI N., NOEL, E. A., BARNES, A., WATSON, A., ROSENBERG, J. N., ERICKSON, G., & OYLER, G. A. Characterization of three *Chlorella sorokiniana* strains in anaerobic digested effluent from cattle manure. **Bioresour. Technol**, v. 150(3), p. 77–386, 2013.

KRICH K.; AUGENSTEIN A.; BATMALE J.; BENEMANN J.; RUTLEDGE B.; SALOUR D. **Upgrading Dairy Biogas to Biomethane and Other Fuels**. In: Andrews K., Editor. Biomethane from Dairy Waste - A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California. California: Clear Concepts; 2005

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

LAMAS, W. Q. **Análise termoeconômica de uma mini-estação de tratamento de esgoto com autossuficiência energética**. 2007. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

LORIMOR J. C.; POWERS W. J., & SUTTON A. I. Manure Characteristics. **MidWest Plan Service**, Iowa State University, 24, 2004.

LOZANO, M. A.; VALERO, A.. **Theory of Exergetic Cost**. Energy, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, Spain, p. 939-960, 18 jan. 1993.

MENDES J. A. A.; BUENO, O. de C. **Participação da energia fóssil na produção dos fertilizantes industriais nitrogenados com ênfase na ureia**. Revista Energia na Agricultura, v. 30, n. 4, p. 442-447, 2015.

MIELE, M.; SILVA, M. L. B. da; NICOLOSO, R. da S.; CORREA, J. C.; HIGARASHI, M. M.; KUNZ, A.; SANDI, A. J. **Tratamento dos efluentes de usinas de biogás**. Revista de Política Agrícola, Brasília, DF, ano 24, n. 1, p. 31-45, 2015.

MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

NASCIMENTO, Laís Fernanda Juchem. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, dezembro de 2018. **Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com sistema fotovoltaico amorfo para bombeamento de água**. Orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira. Coorientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas. Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

NAKASHIMA, R., & de OLIVEIRA J. S. Comparative exergy assessment of vinasse disposal alternatives: Concentration, anaerobic digestion and fertirrigation. **Renewable Energy**, 147, p. 1969–1978, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.124>.

NICOLOSO, R. S. Estudo técnico da destinação do fertilizante orgânico sólido produzido em uma usina de biogás no município de Concórdia-SC. Concórdia: **Embrapa Suínos e Aves**, 2014.

OLIVERA, A.P. M.; NETO, A. A. S.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. Manual de Treinamento em Biodigestão. **Winrock International**, Brasil, Salvador, 2008.

OLIVEIRA, P. A. V. et al. Manual de Manejo e Utilização dos Dejetos de suínos. **Embrapa Suínos e Aves**, documento n. 27, p. 1-179, 1993.

OLIVI, M. C.; DIAS, R. S.; NICOLOSO, R. S. Análise técnica-econômica sobre o uso agrônomo do biofertilizante dos dejetos de suínos na microbacia Santa Fé no município de Itapiranga-SC. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRONOMIA**, 29., 2015, Foz do Iguaçu. Desafios e oportunidades profissionais: anais. Curitiba: CONFEA -PR, 2015. 1 CD-ROM.

PALACIOS-BERECHÉ, R., MOSQUEIRA-SALAZAR, K. J., MODESTO, M., ENSINAS, A. V., NEBRA, S. A., SERRA, L. M., & LOZANO, M. A. Exergetic analysis of the integrated first- and second-generation ethanol production from sugarcane. **Energy**, v. 62, p. 46–61, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.010>.

PALMA, Silva Rojas. **Análise Exergética, Termoeconômica e Ambiental de um sistema de geração de energia**. Estudo de Caso: Usina Termoelétrica UTE- Rio Madeira. Publicação DM-109, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 176p. 2007.

PARIKH J., CHANNIWALA S., GHOSAL G. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, 84(5):487–94, 2015.

PEDUZZI, E.; BOISSONNET, G.; MARÉCHAL, F. Biomass modelling: Estimating thermodynamic properties from the elemental composition. **Fuel**, v. 181, p. 207–217, 2016.

PEREIRA, Carlos Felipe Ilha. **Construção, operação, caracterização química do biogás produzido em biodigestores experimental**. UNB Gama, Monografia, 2014.

PRASODJO, D. et al. **A Spatial-Economic Optimization Study of Swine Waste-Derived Biogas Infrastructure Design in North Carolina**. n. April, 2013. Disponível em [https://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/ni\\_r\\_13-02.pdf](https://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/ni_r_13-02.pdf). Acessado em janeiro de 2021.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. São Paulo: ANDA, p. 178, 2017.

SALOMON, K., R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do**

**Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade.** Itajubá, 219 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

SALOMON, K. R.; SILVA LORA, E. E. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 2009.

SANDI, A. J. et al. Levantamento do custo de transporte e distribuição de dejetos de suínos: um estudo de caso das associações de produtores nos municípios do Alto Uruguai Catarinense. **48º Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, p.1–3, 2011.

SENAR-Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Irrigação: gestão de água e energia elétrica.** Brasília: coleção Senar 255, 2019.

SFREDO, G.J.; CAMPO, R. J.; MUZILLI, O.; PALHANO, J. 8.; BORKERT, C. M. & LANTMANN, A. F. **Recomendações de adubação para a soja no Estado do Paraná.** Londrina, EMBRAPA-CNPSo, 1980. 7p. (EMBRAPA-CNPSo. Comunicado Técnico, 6).

SHROEDER, Daniel V. **An Introduction to Thermal Physics.** San Francisco: Addison Wesley Longman, 2000.

SILVA, W. R. **Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais.** Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

SILVA, F. P.; SOUZA, S. N. M. **Eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2015.

SILVA, F. C. M. DA. **Tratamento Dos Dejetos Suínos Utilizando Lagoa de Alta Taxa de Degradação em Batelada.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

SILVEIRA, J. L. **Uma Contribuição para a Modelagem Termoeconômica: Otimização da Operação e do Projeto de Sistemas Energéticos.** 1998. DOI 10.13140/RG.2.1.4778.8409. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.4778.8409>.

SOUZA S. N. M; Werncke I. N.; MARQUES C. A.; BARICCATTI R. A.; SANTOS R. F.; NOGUEIRA C. E.; BASSEGIO D. Electric energy micro-production in a rural property using biogas as primary source. **Renewable and Sustainable Energy**

**Reviews**, Elsevier Ltd, 2013.

SONG G.; XIAO J.; ZHAO H., SHEN L. A unified correlation for estimating specific chemical exergy of solid and liquid fuels. **Energy**. v. 40, p. 164-173, 2012.

SONG, G.; SHEN, L.; XIAO J.; CHEN, J. Estimation of specific enthalpy and exergy of biomass and coal ash. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 35, n. 9, p. 809–816, 2013.

SHIEH J. H. & FAN L. T. Estimation of Energy (Enthalpy) and Exergy (Availability) Contents in Structurally Complicated Materials, **Energy Sources**, v. 6, p. 1-46, 1982. <http://dx.doi.org/10.1080/00908318208946020>.

Szargut J., & Egzergia. **Exergy method**: technical and ecological application. Publishing House of the Silesian University of Technology. Gliwice, Poland, 2007.

Szargut, J, Morris, D. R, & Steward, F. R. **Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes**. Hemisphere Publishing, New York, NY, 1998.

TAMBONE F.; GENEVINI P.; D'IMPORZANO G.; & ADANI F. Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. **Bioresource Technology**, v. 100(12), p. 3140–3142, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.012>.

TAI, S., Matsushige, K., & GODA, T. Chemical exergy of organic matter in wastewater. **International Journal of Environmental Studies**, v. 27(3–4), p. 301–315, 1986. <https://doi.org/10.1080/00207238608710299>.

TSATSAORONIS G. e WINHOLD M., **Thermoeconomic Analysis of Power Plant**. EPRI AP-3651, Palo Alto, CA 1984.

VAZ, V.; BISSANI, F. M. SILVA, E. C.; SOUZA, S. M.; BISSANI, B.; SOUZA, J. Análise exergética de uma planta de digestão anaeróbica alimentada com resíduos da bovinocultura leiteira. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e276101321170, 2021.

VILAS BOAS, M. A. **Fundamentos de irrigação localizada**. 2<sup>a</sup> ed. Cascavel, 2016.

WALL G. **Exergy**: A Useful Concept, Ph.D. Thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1986.

WELLINGER A.; LINDBERG A. Biogas Upgrading and Utilisation. [Internet] IEA Bioenergy Task 24: **Energy From Biological Conversion of Organic Waste**; 2005

WELLINGER, A., MURPHY, J., BAXTER, D. (Ed.) The biogas handbook: science, production and applications. Cambridge: **Woodhead Publishing**, p. 476, 2013.

XYDIS, G., NANAKI, E., & KORONEOS, C. Exergy analysis of biogas production from a municipal solid waste landfill. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 4, p. 20–28, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2013.08.003>.

ZHANG, W. et al. Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions. **Applied Energy**, v. 128, p. 175–183, 2014.