

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE PERFORMANCE DE BIODIGESTORES CSTR,  
UASB E BLC: UM ESTUDO DE CASO NO RIO GRANDE DO SUL**

por

**Aline Elisabete Lorenzini**

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, agosto de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE PERFORMANCE DE BIODIGESTORES CSTR,  
UASB E BLC: UM ESTUDO DE CASO NO RIO GRANDE DO SUL  
por

Aline Elisabete Lorenzini

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Roberto Chouhy Leborgne  
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Farenzena

Coorientador: Geo. Albari Gerson Pedroso – Cooperativa Ecocitrus

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Farenzena – DEQUI / UFRGS

Me. Eng. Marildo Guerini Filho – Sebigas Cótica

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Cristina de Almeida Silva – DOH / UFRGS

Porto Alegre, agosto de 2024.

LORENZINI, A. E. **Avaliação Comparativa de Performance de Biodigestores CSTR, UASB e BLC: Um Estudo de Caso no Rio Grande Do Sul.** 2024. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## **RESUMO**

Este trabalho de conclusão de curso conduz uma análise comparativa de três tecnologias de biodigestão anaeróbica em escala industrial, visando trazer mais informações referente ao desempenho de biodigestores em condições reais de operação. Considerando a importância da utilização dos resíduos no Brasil como substrato para a produção de biogás, a pesquisa foi realizada através de dados fornecidos pela cooperativa Ecocitrus, que possui uma planta industrial de biodigestão localizada em Montenegro, no Rio Grande do Sul. Foram comparados três modelos de biodigestores: um biodigestor de lagoa coberta (BLC) ou canadense, um biodigestor anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) e um reator contínuo de mistura completa (CSTR), todos utilizando o mesmo efluente, tempo de retenção hidráulica (TRH) e carga orgânica volumétrica (COV). Os parâmetros avaliados incluem rendimento de produção de biogás, rendimento de produção de metano, pH, condutividade elétrica, sólidos totais, sólidos voláteis na entrada da biomassa e na saída do digestato dos reatores, além da composição do biogás produzido, com foco nos teores de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A análise dos dados revelou que, embora o modelo UASB tenha apresentado uma performance ligeiramente superior com base nos dados operacionais a partir da estatística descritiva, não houve diferença estatisticamente nos rendimentos de produção de biogás e metano entre os biodigestores BLC, UASB e CSTR, conforme determinado pela ANOVA. Portanto, este estudo de caso demonstra que não há diferença no desempenho dos reatores, indicando que qualquer um dos modelos, nessa configuração, dimensão e com este efluente, pode ser utilizado de maneira eficaz para a biomassa empregada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biodigestores, Comparativo, Produção de Biogás

LORENZINI, A. E. **Comparative Performance Evaluation of CSTR, UASB, and BLC Biodigesters: A Case Study in Rio Grande do Sul**. 2024. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## **ABSTRACT**

This final paper conducts a comparative analysis of three anaerobic biodigestion technologies on an industrial scale, aiming to bring more information regarding the performance of biodigesters under real operating conditions. Considering the importance of using waste in Brazil as a substrate for biogas production, the research was carried out through data provided by the Ecocitrus cooperative, which has an industrial biodigestion plant located in Montenegro, Rio Grande do Sul. Three models of biodigesters were compared: an indoor pond (BLC) or Canadian biodigester, an upflow anaerobic biodigester with sludge blanket (UASB) and a continuous complete mix reactor (CSTR), all using the same effluent, hydraulic retention time (TRH) and volumetric organic load (VOC). The parameters evaluated include biogas production yield, methane production yield, pH, electrical conductivity, total solids, volatile solids at the biomass input and at the reactor digestate output, in addition to the composition of the biogas produced, with a focus on methane (CH<sub>4</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) contents. The data analysis revealed that, although the UASB model showed a slightly higher performance based on the operational data from the descriptive statistics, there was no statistically difference in biogas and methane production yields between the BLC, UASB and CSTR biodigesters, as determined by ANOVA. Therefore, this case study demonstrates that there is no difference in the performance of the reactors, indicating that any of the models, in this configuration, size and with this effluent, can be used effectively for the biomass employed.

**KEYWORDS:** Biodigesters, Comparison, Biogas Production

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Funcionamento de um biodigestor UASB.....	3
Figura 2.2 - Funcionamento de um biodigestor BLC ou canadense. ....	4
Figura 2.3 - Agitação de um biodigestor CSTR.....	4
Figura 3.1 - (a) Resíduos de incubatório; (b) Resíduos de leite; (c) Lodo de frigoríficos; (d) Pasta proveniente do processo de celulose para produção de filtros de papel.....	9
Figura 3.2 - (a) Fosso de recebimento; (b) Peneiração da biomassa; (c) Bacia de equalização.....	9
Figura 3.3 - (a) Canadense aberto, sem alimentação; (b) Canadense fechado, com alimentação.....	10
Figura 3.4 - (a) Fluxo ascendente, aberto e inoculado; (b) Fluxo ascendente fechado, com alimentação.....	10
Figura 3.5 - (a) CSTR aberto, sem alimentação; (b) CSTR fechado, com alimentação.....	11
Figura 3.6 - Pontos de coleta de digestato dos reatores (a) R1, (b) R2 e (c) R3.....	12
Figura 3.7 - Pontos de coleta de biogás dos reatores (a) R1, (b) R2 e (c) R3.....	12
Figura 3.8 - (a) Analisador de gás; (b) Condutoivímetro; (c) Balança analítica; (d) pHmetro.....	13
Figura 3.9 - (a) Amostra de gás; (b) Amostra digestato.....	13
Figura 4.1 - RPB dos reatores R1, R2 e R3.....	17
Figura 4.2 - RPM dos reatores R1, R2 e R3.....	17
Figura 4.3 - <i>Boxplot</i> das amostras de RPB (a) e RPB (b) dos reatores R1, R2 e R3;.....	18
Figura 4.4 - <i>Boxplot</i> das amostras de ST (a) e SV (b) dos diferentes grupos (Fosso, R0, R1, R2 e R3).....	19
Figura 4.5 - <i>Boxplot</i> das amostras de pH dos reatores.....	20
Figura 4.6 - <i>Boxplot</i> das amostras de Ce dos reatores.....	21
Figura 4.7 - <i>Boxplot</i> das amostras de CH <sub>4</sub> dos reatores.....	21
Figura 4.8 - <i>Boxplot</i> das amostras de CO <sub>2</sub> dos reatores.....	22

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dados de operação. ....	11
Tabela 4.1 - Estatística descritiva das amostras líquidas.....	16
Tabela 4.2 - Estatística descritiva das amostras de gases. ....	16
Tabela 4.3 - ANOVA de amostras de RPB e RPM dos reatores R1, R2 e R3. ....	19
Tabela 4.4 - Resultados da ANOVA para ST nos diferentes grupos. ....	19
Tabela 4.5 - Resultados da ANOVA para SV nos diferentes grupos. ....	20
Tabela 4.6 - Resultados da ANOVA para pH nos diferentes grupos. ....	20
Tabela 4.7 - Resultados da ANOVA para condutividade nos diferentes grupos.....	21
Tabela 4.8 - Resultados da ANOVA para CH <sub>4</sub> nos diferentes grupos. ....	22
Tabela 4.9 - Comparação <i>post-hoc</i> de <i>Tukey HSD</i> para CH <sub>4</sub> . ....	22
Tabela 4.10 - Resultados da ANOVA para CO <sub>2</sub> nos diferentes grupos. ....	22
Tabela 4.11 - Comparação <i>post-hoc</i> de <i>Tukey HSD</i> para CO <sub>2</sub> . ....	23

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
2.1	Biodigestor .....	2
2.1.1	Indiano .....	2
2.1.2	Chinês .....	2
2.1.3	Batelada .....	3
2.1.4	Reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) .....	3
2.1.5	Biodigestor de lagoa coberta (BLC) .....	3
2.1.6	Reator com tanque agitado continuamente (CSTR) .....	4
2.2	Processo de biodigestão .....	4
2.3	Parâmetros do processo .....	5
2.3.1	pH .....	5
2.3.2	Micronutrientes .....	5
2.3.3	Tempo de retenção hidráulica .....	5
2.3.4	Carga orgânica volumétrica .....	6
2.3.5	Agitação .....	6
2.3.6	Temperatura .....	6
2.3.7	Potenciais bioquímicos de metano e biogás .....	6
2.4	Produtos da biodigestão anaeróbia .....	7
2.4.1	Biogás .....	7
2.4.2	Biofertilizante .....	8
3	METODOLOGIA .....	8
3.1	Panorama geral - estudo de caso .....	8
3.1.1	Fluxograma de processo .....	8
3.1.2	Biomassa .....	8
3.1.3	Biodigestores .....	9
3.1.4	Dados de operação .....	11
3.2	Monitoramento e análise de desempenho dos biodigestores .....	11
3.2.1	Pontos de coleta .....	11
3.2.2	Parâmetros analisados .....	12
3.2.3	Taxa volumétrica de biogás .....	13
3.3	Análise dos dados .....	14
3.3.1	Formulação das hipóteses .....	14
3.3.2	Cálculo das estatísticas descritivas .....	14
3.3.3	Cálculo da estatística F .....	15
3.3.4	Comparação com o valor de $p$ .....	15

3.3.5	Análise <i>post-hoc</i> de <i>Tukey HSD</i> .....	15
4	RESULTADOS .....	16
4.1	Dados coletados.....	16
4.2	Taxa volumétrica de biogás.....	17
4.3	Rendimento de produção de biogás e metano .....	17
4.4	ANOVA de uma via e <i>post-hoc</i> de <i>Tukey HSD</i> .....	18
4.4.1	RPB e RPM .....	18
4.4.2	Amostras de biomassa ou digestato.....	19
4.4.3	Amostras do biogás .....	21
4.4.4	Comparativo das fases da digestão anaeróbia (DA).....	23
5	CONCLUSÕES.....	24
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	25
	APÊNDICE A – DADOS ESTATÍSTICOS DAS AMOSTRAS .....	27
	APÊNDICE B – TAXAS VOLUMÉTRICAS DE BIOGÁS .....	28
	APÊNDICE C – <i>POST HOC</i> DE <i>TUKEY HSD</i> .....	29



## 1 INTRODUÇÃO

A busca por novas fontes de energia renovável tem se tornado cada vez mais urgente diante dos desafios globais relacionados à sustentabilidade e às mudanças climáticas. O aumento da necessidade de energia, juntamente com a escassez dos recursos fósseis e os danos ambientais resultantes de seu uso, tem impulsionado a busca por opções energéticas limpas e sustentáveis. A procura por novas fontes de energia renovável abrange uma ampla gama de tecnologias, como a energia solar, eólica, biomassa, hidrelétrica e geotérmica. Essa busca tem como objetivo diversificar a matriz energética, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os efeitos nocivos das emissões de gases de efeito estufa.

Aliado a isso, o Brasil é responsável pela geração de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) por ano, onde os resíduos orgânicos representam metade dos RSU de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022). De acordo com o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) desenvolvido pelo Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) do Brasil (MDR, 2019), essa forma de resíduo é composta majoritariamente por restos de animais e vegetais descartados em atividades humanas e pode ser proveniente de diversas fontes, como domiciliar, urbana (restos de alimentos e podas), agrícola, industrial e de saneamento básico. Além disso, o Programa de Energia para o Brasil (BEP, 2021) estima que setores como pecuária (suinocultura, avicultura e bovinocultura), indústria (laticínios, abatedouros de suínos, aves e bovinos, e setor sucroenergético) e tratamento de esgoto geram aproximadamente 4.952.436 mil m<sup>3</sup>/ano de efluentes. Esses resíduos orgânicos possuem um potencial econômico significativo, podendo ser convertidos em adubo, gás combustível e energia (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

É de extrema importância a viabilização de novas oportunidades de utilização para esse resíduo. Uma das alternativas é o uso de biodigestores, que são sistemas que convertem resíduos orgânicos em biogás e biofertilizante, oferecendo benefícios significativos tanto ambientais quanto econômicos (OLIVER, NETO, *et al.*, 2008). O processo de digestão anaeróbia desempenha um papel fundamental na conversão de resíduos orgânicos em biogás, oferecendo uma alternativa sustentável ao gás de origem fóssil. Essa tecnologia não apenas ajuda a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas também promove a utilização de energia renovável e a gestão adequada de resíduos, contribuindo para a sustentabilidade e a transição para uma economia de baixo carbono.

Conforme apresentado no panorama do biogás no Brasil 2022 (CIBIOGÁS, 2023), foi destacado a contribuição dos setores agropecuário, industrial e de saneamento. O setor agropecuário, que inclui atividades como avicultura e bovinocultura, representou 78% das plantas de biogás e gerou 10% do volume anual, utilizando substratos como esterco animal e efluentes de manejo de dejetos. O setor de saneamento, com 10% das plantas, foi responsável pela geração de 74% do volume total de biogás, processando resíduos sólidos urbanos e esgoto sanitário. A indústria, que abrange abatedouros, frigoríficos, usinas de açúcar e etanol, cervejarias e outras, contribuiu com 12% das plantas e gerou 16% do volume de biogás, aproveitando efluentes industriais e outros resíduos orgânicos, demonstrando a importância do setor na redução de resíduos e na eficiência energética. Além disso, a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos pode evitar a emissão de até 2,3 kg de metano (CH<sub>4</sub>) por tonelada de resíduo, em comparação à decomposição anaeróbica não controlada em aterros sanitários, onde o metano é liberado diretamente na atmosfera (ABRELPE, 2017). Essas informações reforçam o potencial significativo do biogás como recurso energético renovável e como estratégia eficaz para minimizar os efeitos ambientais negativos associados ao manejo inadequado de resíduos orgânicos.

Um estudo realizado por SOARES, FEIDEN e TAVARES (2017) demonstrou que a eficiência de conversão de resíduos em biogás pode variar consideravelmente devido a fatores como a composição dos resíduos, a temperatura de operação e o modelo do biodigestor. Portanto, a busca por comparativos de desempenho de biodigestores visa aprimorar a produção de biogás e a qualidade do biofertilizante, além de reduzir os custos envolvidos no processo.

A literatura científica atual oferece uma ampla gama de artigos e estudos que abordam o desempenho de biodigestores em diferentes contextos. No entanto, uma lacuna significativa é observada quando se trata da comparação direta entre biodigestores em operação em escala real e industrial. Essa falta de pesquisa comparativa dificulta a avaliação completa da eficácia dessas tecnologias em condições

práticas, limitando a capacidade de tomar decisões informadas sobre a seleção de sistemas de biodigestão que melhor atendam às necessidades práticas e ambientais.

Apesar do reconhecido potencial dos resíduos sólidos no Brasil como fonte para a produção de biogás, uma análise detalhada e comparativa que aborde o desempenho de tecnologias de biodigestão anaeróbica em escala industrial é importante para a compreensão plena sobre qual tecnologia de biodigestor se adapta melhor às necessidades específicas de diferentes aplicações, guiando a seleção da tecnologia de biodigestão mais apropriada e de maior desempenho para a realidade específica de acordo com as características locais. Diante das dificuldades relacionadas à gestão de resíduos orgânicos e à necessidade de ampliar a geração de energia renovável, é essencial explorar e aprimorar tecnologias como o biodigestor.

Neste contexto, este trabalho visa realizar uma análise comparativa entre sistemas de biodigestão anaeróbica, contribuindo para uma escolha mais informada e eficiente em contextos industriais. O principal objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de três tecnologias distintas de biodigestão anaeróbica implementadas na cooperativa Ecocitrus: o biodigestor de lagoa coberta (BLC), um biodigestor anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) e o reator contínuo de mistura completa (CSTR), denominados R1, R2 e R3, respectivamente.

A pesquisa avaliou o pH, a condutividade elétrica (Ce), os sólidos totais (ST) e os sólidos voláteis (SV) tanto da biomassa que ingressa na planta quanto do digestato na saída dos biodigestores. Além disso, foram calculados os rendimentos de produção de biogás (RPB) e metano (RPM), proporcionando uma visão mais detalhada do desempenho dos reatores. Para isso, os dados incluíram amostras do fosso de recebimento, da bacia de equalização e dos reatores R1, R2 e R3. Embora o foco principal esteja nos reatores, a análise das amostras dos outros grupos é importante para entender todas as etapas do processo de biodigestão e seu impacto no desempenho geral do sistema. A análise dos dados foi realizada utilizando estatísticas descritivas e o teste ANOVA de uma via, com o objetivo de identificar as variações entre os grupos. Dessa forma, pretende-se compilar e avaliar dados operacionais e de eficiência dos reatores para determinar a tecnologia mais eficiente para a cooperativa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Biodigestor

O biodigestor é um equipamento projetado para realizar a biodigestão, que é um processo biológico de decomposição anaeróbica de matéria orgânica em um ambiente hermeticamente fechado, resultando na produção de biogás e biofertilizantes (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019). Existem diversos tipos de biodigestores, cada um com características específicas que os tornam adequados para diferentes aplicações. Alguns dos principais modelos de biodigestores rurais em pequena e média escala são o biodigestor batelada, indiano e chinês (DEGANUTTI, PALHACI, *et al.*, 2002). Os biodigestores utilizados em escala industrial, como os sistemas CSTR, UASB e as lagoas cobertas (BLC), representam soluções avançadas para a gestão de resíduos orgânicos (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019). A seguir, serão detalhados os principais modelos de biodigestores.

#### 2.1.1 Indiano

O biodigestor indiano é amplamente utilizado em áreas rurais. Construído com alvenaria ou concreto revestido com ferrocimento, utiliza esterco de gado e resíduos agrícolas como matéria-prima de forma contínua. Além disso, o modelo indiano é equipado com uma cúpula feita de ferro, o que resulta em um período limitado de uso devido à suscetibilidade desse material à corrosão. Para alimentar o biodigestor indiano, o resíduo utilizado deve possuir uma concentração de sólidos totais que não ultrapasse 8% (DEGANUTTI, PALHACI, *et al.*, 2002).

#### 2.1.2 Chinês

Já o biodigestor chinês, também chamado de "Biodigestor de Cúpula Fixa", é um dos modelos mais populares e adotados globalmente, utilizado para instalações de pequeno porte. É constituído quase que totalmente em alvenaria, dispensando o uso de gasômetro em chapa de aço, reduzindo os custos. O substrato precisa ser fornecido de forma contínua, no entanto, um aspecto que apresenta desafios quanto à utilização desses biodigestores é a sua capacidade de processar esterco em forma sólida, o qual requer diluição com

água, o resíduo utilizado deve possuir uma concentração de sólidos totais aproximada de 8%. Esse tipo específico de biodigestor é composto por uma unidade de alimentação e outra de saída (DEGANUTTI, PALHACI, *et al.*, 2002).

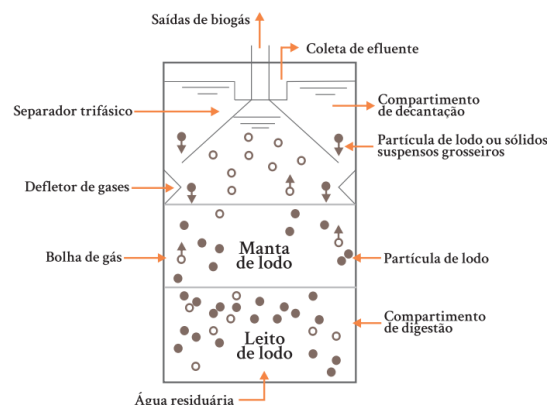
### 2.1.3 Batelada

No biodigestor de batelada, ou "biodigestor de carga descontínua", a carga orgânica é adicionada ao biodigestor de uma só vez e esses são posteriormente selados de maneira hermética (de modo a impedir a entrada de oxigênio). Após a fermentação, o resíduo é retirado para a inserção de uma nova carga. É uma opção simples e de baixo custo e possuem baixa exigência operacional. Geralmente são utilizados em propriedades em que a produção de biomassa é sazonal (DEGANUTTI, PALHACI, *et al.*, 2002).

### 2.1.4 Reator anaeróbico de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB)

O biodigestor anaeróbico de fluxo ascendente com manta de lodo, que vem do inglês como *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), representa uma tecnologia importante no tratamento de efluentes, caracterizando-se pelo seu processo anaeróbico de fluxo ascendente e pela formação de um manto de lodo até o topo do reator, onde há um separador trifásico. Esta técnica é muito eficaz na degradação de matéria orgânica, sendo especialmente valorizada por sua eficiência energética e menor produção de lodo em comparação com sistemas convencionais. O UASB (Figura 2.1) é projetado para tratar águas residuais de diversas origens, suportando altas cargas de poluentes, o que o torna uma solução robusta e sustentável para gestão de efluentes (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

Figura 2.1 - Funcionamento de um biodigestor UASB.



Fonte: (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

Os reatores UASB se destacam pela sua eficaz retenção de biomassa, permitindo operar com períodos curtos de retenção hidráulica (entre 4 e 72 horas). Eles também são reconhecidos por sua estabilidade diante de mudanças na composição dos afluentes e por suportarem elevadas cargas orgânicas. Devido às suas especificidades hidrodinâmicas, é necessário que os afluentes tenham baixa concentração de sólidos totais (menos de 2%), o que muitas vezes exige um tratamento preliminar, especialmente quando o efluente é proveniente da produção animal (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

### 2.1.5 Biodigestor de lagoa coberta (BLC)

O biodigestor de lagoa coberta (BLC), também chamado como biodigestor canadense ou biodigestor de lona é composto por um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com material geossintético. É visto como tecnologicamente simples, oferecendo facilidade tanto na construção quanto na operação. Geralmente, este tipo de biodigestor é aplicado no tratamento de efluentes que possuem uma baixa taxa de sólidos, com até aproximadamente 3% de sólidos totais (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019). É caracterizado pela baixa permeabilidade a fluidos e gases, sendo flexível para acumular biogás. Sua forma frequentemente adota um retângulo, embora a inclinação e o posicionamento sejam determinados pelas particularidades do solo de cada terreno, conforme a Figura 2.2 (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

Figura 2.2 - Funcionamento de um biodigestor BLC ou canadense.



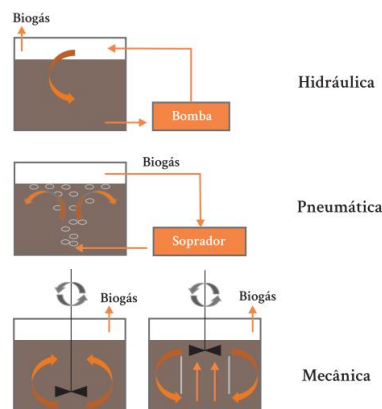
Fonte: (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

A falta de aquecimento no BLC faz com que sua eficiência na produção de biogás varie com o clima, sendo menor em regiões frias (como na região sul do Brasil). Adicionalmente, o *design* do reator propicia o acúmulo de lodo, complicando sua remoção devido à estrutura inadequada para descarte de resíduos sólidos (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

### 2.1.6 Reator com tanque agitado continuamente (CSTR)

O biodigestor do tipo CSTR, que vem do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor* (reator com tanque agitado continuamente), é reconhecido por apresentar um conteúdo homogeneizado devido à inclusão de um sistema de agitação (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019). Em reatores CSTR anaeróbios, o período que líquidos e sólidos permanecem no sistema é o mesmo, ou seja, não ocorre acumulação de lodo. O intervalo mínimo para retenção hidráulica fica geralmente entre 15 a 20 dias, ajustando-se conforme o material processado (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019). Tais biodigestores são mais eficientes para efluentes com alta concentração de sólidos (4 - 10%) (SHAH, LAMBA, *et al.*, 2024). A adição de mecanismos de agitação (Figura 2.3), apesar de aumentar os custos iniciais e operacionais, melhora a distribuição de calor e a interação entre a matéria orgânica e os microrganismos ao manter os sólidos em suspensão. Técnicas de agitação se dividem em mecânicas, hidráulicas e pneumáticas. A agitação hidráulica faz uso de bombas para recircular o conteúdo do biodigestor, enquanto a agitação pneumática depende da circulação de biogás para misturar o meio, através de borbulhas ou pelo método *gas lift*. Já a agitação mecânica, frequentemente preferida em instalações de biogás, opera por meio de agitadores físicos que variam em intensidade e design, adequando-se a diferentes necessidades de homogeneização (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

Figura 2.3 - Agitação de um biodigestor CSTR.



Fonte: Adaptado de (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

## 2.2 Processo de biodigestão

A biodigestão anaeróbica (DA) é um processo complexo que ocorre dentro do biodigestor, envolvendo quatro etapas distintas, cada uma conduzida por diferentes grupos de microrganismos. Essas etapas são essenciais para a decomposição da matéria orgânica e a produção de biogás e biofertilizantes, sendo elas a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (SOARES, FEIDEN e TAVARES, 2017).

A primeira etapa do processo de digestão anaeróbica é a hidrólise, onde complexas macromoléculas como carboidratos, lipídios e proteínas são decompostas em unidades menores, como açúcares, ácidos graxos e aminoácidos. Segue-se a acidogênese, as moléculas mais simples produzidas na hidrólise são fermentadas pelas bactérias acidogênicas. Essas bactérias convertem os açúcares e os ácidos graxos em ácidos orgânicos de cadeia curta, álcool etílico e hidrogênio. A terceira etapa é a acetogênese na qual bactérias acetogênicas convertem os ácidos orgânicos de cadeia curta em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Na última etapa do processo de digestão anaeróbica, a metanogênese, bactérias arqueas metanogênicas convertem o ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono gerados nas etapas anteriores em metano (CH<sub>4</sub>), o principal componente do biogás, e mais dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

O processo de biodigestão anaeróbica é altamente dependente da interação simbiótica entre esses grupos de microrganismos, que trabalham de forma coordenada para degradar a matéria orgânica e transformá-la em produtos úteis. O sucesso do funcionamento de um biodigestor está intimamente ligado ao equilíbrio e à eficiência dessas quatro etapas, o que exige um ambiente controlado e adequado suprimento de matéria orgânica (CIOABLA, IONEL, *et al.*, 2012).

## 2.3 Parâmetros do processo

Para que um biodigestor funcione de maneira eficiente e produza biogás de qualidade, algumas características são essenciais como pH, matéria orgânica adequada, tempo de retenção, agitação do sistema e temperatura.

### 2.3.1 pH

As variações no pH influenciam significativamente os microrganismos envolvidos na digestão anaeróbica, que são extremamente sensíveis às mudanças no pH do meio. Durante a fase de hidrólise e acidogênese, o pH tipicamente varia entre 5,2 e 6,3 (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019). No entanto, é importante manter o pH próximo à neutralidade durante a metanogênese, idealmente entre 6,7 e 7,5, para garantir um ambiente favorável à atividade microbiana.

Manter o pH nesta faixa é essencial, pois o equilíbrio entre as populações microbianas e a alcalinidade total do sistema afeta diretamente as concentrações de ácidos orgânicos voláteis. Portanto, o pH torna-se um parâmetro vital para o sucesso do processo de digestão anaeróbica (SOARES, FEIDEN e TAVARES, 2017). O controle inadequado do pH pode levar à inibição da metanogênese, comprometendo a eficiência do sistema de biodigestão.

### 2.3.2 Micronutrientes

O biodigestor requer uma alimentação balanceada, contendo uma mistura de resíduos orgânicos, como restos de alimentos, esterco, resíduos agrícolas ou industriais. Os micronutrientes como ferro, cobalto, zinco, níquel, cobre e selênio são considerados essenciais, desempenhando papel importante como estimulantes de processos anaeróbios. É importante evitar o excesso de determinados tipos de resíduos que possam causar desequilíbrio na atividade microbiana (SOARES, FEIDEN e TAVARES, 2017).

### 2.3.3 Tempo de retenção hidráulica

O tempo de retenção hidráulica (TRH) refere-se ao tempo que a matéria orgânica permanece no interior do biodigestor. O tempo de retenção é determinado pela proporção entre o volume do digestor e o volume da carga diária, de acordo com a equação (2.1) (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019):

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (2.1)$$

onde *TRH* é o tempo de retenção hidráulica, medido em dias (d), *V* representa o volume do biodigestor em metros cúbicos (m<sup>3</sup>), e *Q* é a vazão de alimentação, medida em metros cúbicos por dia (m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>).

Sua interação com a taxa de decomposição dos sólidos voláteis é importante para a eficiência do digestor. Assim, os melhores digestores são aqueles que apresentam o menor tempo de retenção e a maior taxa de decomposição. O controle adequado desse parâmetro é essencial para garantir a completa degradação dos resíduos e a produção máxima de biogás (SOARES, FEIDEN e TAVARES, 2017).

### 2.3.4 Carga orgânica volumétrica

A carga orgânica volumétrica (COV) indica o volume de substrato introduzido no biodigestor durante um período específico, conforme equação (2.2) (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019):

$$COV = \frac{SV}{TRH} \quad (2.2)$$

sendo *COV* é a carga orgânica volumétrica, medida em kg SV m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>, *SV* representa a concentração de sólidos voláteis presentes no substrato, medida em kg m<sup>-3</sup>, e *TRH* é o tempo de retenção hidráulica, medido em dias.

Essa medida é fundamental para o controle e otimização do processo de biodigestão, pois impacta diretamente a eficiência da conversão de matéria orgânica em biogás. Ajustar adequadamente a COV ajuda a garantir que o biodigestor opere dentro de sua capacidade ideal, evitando sobrecarga que pode levar à inibição da atividade microbiana e a desequilíbrios no sistema. Além disso, monitorar a COV permite identificar a melhor taxa de alimentação do biodigestor para maximizar a produção de biogás, mantendo ao mesmo tempo a estabilidade do processo e a qualidade do efluente tratado (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

### 2.3.5 Agitação

A utilização de agitação no sistema de tratamento de resíduos assegura um contato mais eficiente entre a biomassa ativa e a alimentação. Além disso, promove a uniformidade física, química e biológica em todo o reator, bem como uma rápida dispersão dos produtos metabólicos da digestão e de quaisquer substâncias tóxicas que possam ingressar no sistema. Essa abordagem minimiza os efeitos inibidores sobre a atividade microbiana. A agitação e a homogeneização dos resíduos no biodigestor são importantes para distribuir uniformemente os microrganismos e promover uma digestão eficiente (SOARES, FEIDEN e TAVARES, 2017).

As metodologias para mistura em processos de biodigestão podem ser classificadas como mecânicas, hidráulicas ou pneumáticas. Na agitação hidráulica, a mistura é realizada pela recirculação do conteúdo do biodigestor utilizando bombas hidráulicas, que podem estar posicionadas tanto dentro quanto fora do reator. Por sua vez, a agitação pneumática se dá através da recirculação do biogás gerado, promovendo a homogeneização do meio por meio da formação de bolhas no líquido ou pelo método denominado *gas lift*. Entre essas, a agitação mecânica é a forma mais adotada nas instalações de biogás, apresentando variadas intensidades e tipos de agitadores (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

### 2.3.6 Temperatura

A temperatura é um dos fatores físicos mais significativos que influenciam o crescimento microbiano e desempenha um papel fundamental na seleção das espécies. Isso ocorre porque os microrganismos não têm a capacidade de controlar sua temperatura interna, sendo essa determinada pela temperatura ambiente externa. A faixa ideal de temperatura para o funcionamento do biodigestor varia de acordo com o tipo de microrganismos presentes, geralmente entre 25°C e 40°C. Em regiões mais frias, o biodigestor pode precisar de isolamento térmico para manter a temperatura adequada (SOARES, FEIDEN e TAVARES, 2017).

Há temperaturas específicas para o crescimento de bactérias mesofílicas (cerca de 37°C) e termofílicas (cerca de 55°C), com os microrganismos termofílicos preferindo condições mais quentes para um melhor desenvolvimento. A estabilidade do processo pode ser alcançada em temperaturas entre 35°C e 50°C, especialmente na digestão de culturas energéticas, mas a temperatura deve ser mantida constante, com variações máximas de +/- 0,5°C para maximizar a produção de biogás. Variações maiores podem ser toleradas sob certas condições de estabilidade (KARLSSON, KONRAD, *et al.*, 2014).

### 2.3.7 Potenciais bioquímicos de metano e biogás

O potencial bioquímico de biogás (PBB) e o potencial bioquímico de metano (PBM) são indicadores importantes para avaliar eficiência de substratos na produção de biogás e metano em processos de digestão anaeróbia. Esses potenciais representam a quantidade máxima de biogás ou metano que pode ser gerada a partir de um substrato específico, sob condições controladas.

A determinação do PBB e do PBM é realizada por meio de ensaios em batelada, onde uma amostra do substrato é incubada em condições mesofílicas (temperaturas moderadas) na presença de um inóculo anaeróbio. Esse inóculo, composto por microrganismos adaptados ao ambiente anaeróbio, auxilia na decomposição da matéria orgânica presente no substrato, resultando na produção de biogás (STEINMETZ, MEZZARI, *et al.*, 2016).

O potencial bioquímico de biogás (PBB) pode ser calculado pela fórmula:

$$PBB = \frac{V_{biogás}}{SV} \quad (2.3)$$

sendo  $V_{biogás}$  o volume de biogás produzido, e  $SV$  é a massa de sólidos voláteis.

De forma similar, o potencial bioquímico de metano (PBM) é determinado pela fórmula:

$$PBM = \frac{V_{biogás} \%CH_4}{SV} \quad (2.4)$$

onde  $\%CH_4$  é a fração de metano no biogás.

É importante destacar que, durante o processo, o inóculo também contribui para a produção de biogás. Assim, para obter uma medida precisa do potencial do substrato em estudo, é necessário subtrair a quantidade de biogás gerada pelo inóculo do volume total acumulado. Isso garante que o PBB e o PBM reflitam exclusivamente o potencial do substrato testado.

## 2.4 Produtos da biodigestão anaeróbia

Na biodigestão anaeróbia, realizada em biodigestores, a matéria orgânica é decomposta na ausência de oxigênio, gerando produtos como biogás e digestato. O biogás, quando não purificado, é utilizado diretamente na geração de energia elétrica e térmica. Se purificado, o biogás fornece biometano ( $CH_4$ ), que pode substituir o gás natural e ser usado como combustível em veículos. O dióxido de carbono biogênico, também presente no biogás, encontra aplicações na carbonatação de bebidas, entre outras. O digestato, subproduto sólido ou líquido rico em nutrientes, é valorizado como fertilizante orgânico que beneficia a saúde do solo (LIEBETRAU, AMMENBERG, *et al.*, 2022).

### 2.4.1 Biogás

Após passar pelas quatro etapas do processo de digestão anaeróbica, o biodigestor produz dois produtos principais: o biogás e o biofertilizante. O biogás é o principal produto do processo de digestão anaeróbia e é composto principalmente por metano e dióxido de carbono. A composição do biogás pode variar dependendo do tipo de biodigestor, da matéria orgânica alimentada e do controle das condições operacionais. Em geral, o biogás contém cerca de 50% a 70% de metano e 25% a 45% de dióxido de carbono, e até 5% de pequenas quantidades de outros gases, como traços de nitrogênio, oxigênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amoníaco (COELHO, VELÁZQUEZ, *et al.*, 2006). A pureza e a quantidade de metano são os principais elementos a serem ponderados em relação ao poder calorífico do biogás, que se situa entre 15 e 30 MJ Nm<sup>-3</sup>. Entre os principais agentes contaminantes que influenciam o valor energético do biogás, destacam-se o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) e o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (ABATZOGLOU e BOIVIN, 2009).

Pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio também podem estar presentes no biogás. O nitrogênio é geralmente proveniente do ar presente no biodigestor, enquanto o oxigênio pode entrar no sistema como resultado de vazamentos ou através da difusão do ar durante o processo de fermentação. No entanto, esses gases geralmente estão presentes em concentrações muito baixas, quase negligenciáveis. Ademais, o biogás pode conter traços de outros componentes, como sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), amônia ( $NH_3$ ) e traços de hidrocarbonetos leves, onde, a presença desses gases depende das características da matéria orgânica alimentada ao biodigestor e das condições de operação (SUNIL e JOUNI, 2018).

A composição do biogás é um fator importante para determinar suas aplicações. O metano é o componente mais importante do biogás devido ao seu alto poder calorífico, tornando-o adequado para geração de energia térmica e elétrica ou ser purificado e enriquecido em metano para se tornar uma forma de biocombustível (biometano). Por outro lado, o dióxido de carbono pode reduzir o potencial energético do biogás, sendo necessário otimizar as condições de digestão para maximizar a produção de metano. Para algumas aplicações, como a purificação para a obtenção de biometano, é essencial remover o dióxido de

carbono e outros gases indesejáveis, resultando em um biocombustível com alta concentração de metano e qualidade semelhante ao gás natural (KHAN, OTHMAN, *et al.*, 2017).

#### 2.4.2 Biofertilizante

O biofertilizante, também conhecido como digestato, é o resíduo líquido resultante do processo de digestão anaeróbia. Esse fertilizante orgânico é uma excelente fonte de nutrientes essenciais para as plantas, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e micronutrientes. Além disso, o biofertilizante possui uma estrutura estável, tornando-o seguro e benéfico para a fertilização de solos agrícolas, aumentar a retenção de água e favorecer o desenvolvimento das raízes das plantas. Ao utilizá-lo como adubo orgânico, os agricultores podem reduzir a dependência de fertilizantes químicos, promovendo a sustentabilidade e a saúde do solo a longo prazo (SEADI, RUTZ, *et al.*, 2008).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em analisar a performance das tecnologias de biodigestores utilizadas na cooperativa Ecocitrus, visando realizar uma comparação de eficiência utilizando a mesma biomassa e a mesma carga orgânica volumétrica para garantir que as variáveis externas não influenciem os resultados. Para isso, foram coletados dados das amostras de biomassa processada nos biodigestores da Ecocitrus, amostras do fosso de recebimento e do tanque de equalização. Essas amostras foram analisadas quanto às características físico-químicas da biomassa e à composição do biogás.

A performance dos biodigestores foi avaliada com base em indicadores como o rendimento de produção de biogás e metano, a qualidade do biogás (concentração de metano), a eficiência de conversão da biomassa e a produção de biofertilizante (digestato).

Os dados foram tratados e organizados em tabelas e analisados por estatística descritiva, análise de variância (ANOVA) e *post-hoc* de *Tukey HSD* para identificar padrões e as variações entre as tecnologias de biodigestores. Os métodos estatísticos serão aplicados para assegurar a validade dos resultados.

#### 3.1 Panorama geral - estudo de caso

O estudo foi conduzido na cooperativa Ecocitrus, situada em Montenegro, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Esta região é caracterizada por um clima subtropical úmido, com verões quentes e invernos frios, apresentando uma precipitação bem distribuída ao longo do ano. A temperatura média anual varia entre 18 °C e 20 °C (SDPI, 2014). A escolha deste local deve-se à sua relevância na implementação de práticas sustentáveis e à diversidade de processos de biodigestão disponíveis.

As tecnologias de biodigestão anaeróbica avaliadas foram implementadas especificamente na usina: o reator contínuo de mistura completa (CSTR), o biodigestor de lagoa coberta (BLC) ou canadense, e um biodigestor anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB).

##### 3.1.1 Fluxograma de processo

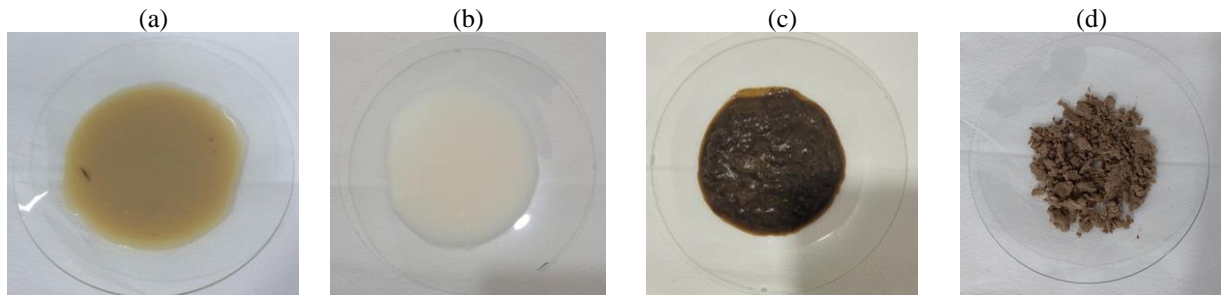
O fluxograma do processo, desde o recebimento da biomassa até a destinação final do gás para a produção de energia elétrica nos geradores e a produção de biofertilizante orgânico, inclui várias etapas. Inicialmente, é realizada a análise do resíduo, que é então depositado no fosso de recebimento, onde são aplicadas blendagens para inibição de H<sub>2</sub>S e SO<sub>4</sub>. Em seguida, o material passa por uma peneira para remoção de impurezas maiores, sendo posteriormente armazenado em três tanques de equalização. No tanque, é feita uma nova análise do substrato antes de sua entrada nos biodigestores. Durante o processo de biodigestão, são realizadas análises de gás e digestato, garantindo a eficiência e a qualidade do biogás e do biofertilizante produzidos.

##### 3.1.2 Biomassa

O inóculo utilizado neste estudo provém de reatores anaeróbicos previamente estabelecidos na empresa, garantindo um consórcio microbiano adaptado e eficiente para o processo de biodigestão. Este inóculo é essencial para iniciar adequadamente o processo anaeróbico nos diferentes tipos de biodigestores analisados. A biomassa utilizada nos biodigestores é composta por resíduos industriais, incluindo uma mistura de resíduos de incubatórios e de leite, lodo de frigoríficos e pasta proveniente do processo de celulose para produção de filtros de papel. Amostras desses resíduos são apresentados na Figura 3.1.



Figura 3.1 - (a) Resíduos de incubatório; (b) Resíduos de leite; (c) Lodo de frigoríficos; (d) Pasta proveniente do processo de celulose para produção de filtros de papel.



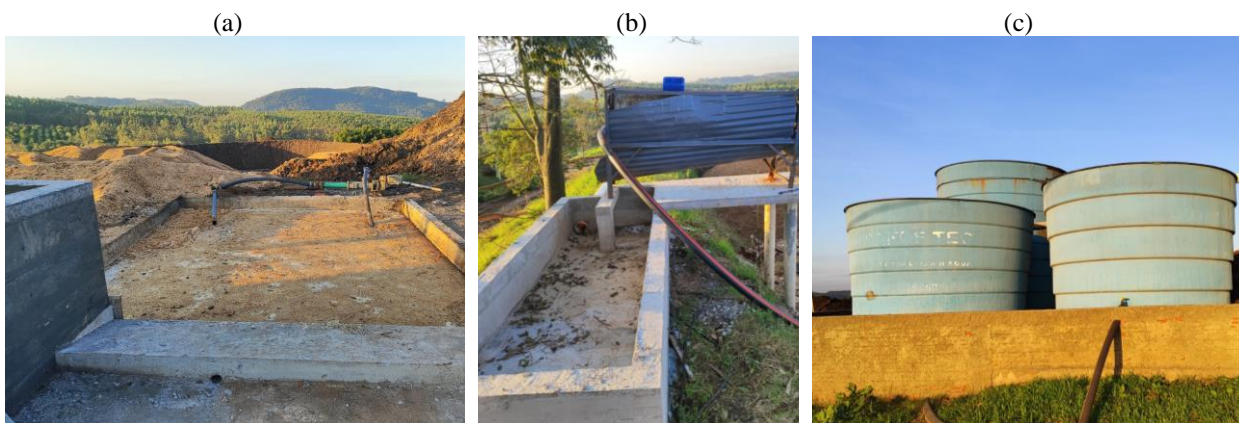
Fonte: A autora.

Essa biomassa é fornecida por clientes da Ecocitrus, com o objetivo de converter esses resíduos em fertilizante orgânico certificado pelo IBD, o Instituto Biodinâmico, uma organização que garante a certificação de produtos orgânicos e sustentáveis, e em biogás para geração distribuída de energia elétrica, atendendo tanto à matriz quanto à filial da Ecocitrus.

Antes da inserção nos reatores, a biomassa é recebida no fosso de recebimento (Figura 3.2 a), onde é realizada blendagem com cloreto férrico, enzimas lipase e protease para inibir a produção de  $H_2S$  e  $SO_4$  na digestão anaeróbia. Dessa forma, o processo de dessulfurização ocorre apenas na fase aquosa, não na gasosa. Após a blendagem no tanque de recebimento, o substrato é agitado e, em seguida, direcionado para uma peneira (Figura 3.2 b) que remove as impurezas maiores. Posteriormente, o material peneirado é enviado para 3 tanques (R0), sendo um tanque de 15.000 litros e dois de 2.000 litros. Esses tanques funcionam como bacia de equalização onde ocorre a hidrólise do material antes de ser encaminhado para os reatores principais (Figura 3.2 c). No Reator 0, são realizadas as medições da entrada da biomassa, que é o processo de preparação inicial do substrato antes de sua introdução nos biodigestores principais, correspondendo à biomassa de entrada do R1, R2 e R3.

Posteriormente esse material é então distribuído de forma equânime nos biodigestores (R1, R2, R3), com cada biodigestor sendo alimentado com uma carga orgânica média de  $1,65 \text{ SV/m}^3$  de área de processo, parametrizada em relação ao volume do reator.

Figura 3.2 - (a) Fosso de recebimento; (b) Peneiração da biomassa; (c) Bacia de equalização.



Fonte: A autora.

### 3.1.3 Biodigestores

O BLC ou canadense, chamado de R1, é de formato retangular, com dimensões de 24 x 34 metros e 4,5 metros de altura, revestido internamente e externamente com polietileno de alta densidade (PEAD) de 1,5 mm de espessura e possui agitação hidráulica com uma bomba. A bomba promove a mistura do substrato em estágios, permitindo uma agitação segmentada ao longo do processo. Este biodigestor se diferencia dos modelos tradicionais por possuir um cano de descarga no fundo, que reduz o acúmulo de lodo e evita sedimentação. Na Figura 3.3 (a) é possível visualizar o biodigestor canadense aberto, sem

alimentação, já na Figura 3.3 (b) é apresentado o biodigestor fechado, sendo composto por uma camada de isopor de 20 centímetros, seguida com PEAD, já sendo alimentado.

Figura 3.3 - (a) Canadense aberto, sem alimentação; (b) Canadense fechado, com alimentação.



Fonte: A autora.

O biodigestor R2 é semelhante a um reator UASB, pois opera com fluxo ascendente e possui uma manta de lodo. No entanto, construtivamente, ele se diferencia por estar enterrado a 11 metros de profundidade e por ser revestido e coberto com membranas de PEAD de 1,5 mm de espessura. Na Figura 3.4 (a), o reator está aberto e já inoculado, enquanto na Figura 3.4 (b), ele está fechado e em processo de alimentação. Este biodigestor opera sem a necessidade de energia elétrica.

Figura 3.4 - (a) Fluxo ascendente, aberto e inoculado; (b) Fluxo ascendente fechado, com alimentação.



Fonte: A autora.

O biodigestor enterrado com agitação completa, seguindo o conceito de reator contínuo de mistura completa (CSTR), é identificado como R3. O reator tem formato circular, com 22 metros de diâmetro e 6 metros de profundidade, revestido com polietileno de alta densidade (PEAD) de 1,5 mm. A cobertura é composta por uma camada de isopor de 20 centímetros, seguida por uma camada de PEAD. O reator também possui sistema de agitação hidráulica para manter a homogeneidade da biomassa. Na Figura 3.5 (a) é possível visualizar ele aberto, já na Figura 3.5 (b) está fechado e com alimentação.

Figura 3.5 - (a) CSTR aberto, sem alimentação; (b) CSTR fechado, com alimentação.



Fonte: A autora.

### 3.1.4 Dados de operação

Na Tabela 3.1 é possível visualizar as informações das especificações técnicas de cada biodigestor analisado neste estudo. Esta tabela oferece uma visão comparativa das características operacionais, como volume, tamanho, tempo de retenção hidráulica, carga orgânica, essenciais para a compreensão da eficiência e desempenho de cada tecnologia, todas com operação de forma semi-contínua.

Tabela 3.1 - Dados de operação.

<b>Informações</b>	<b>BLC (R1)</b>	<b>UASB (R2)</b>	<b>CSTR (R3)</b>
Volume útil do reator (m <sup>3</sup> )	400	800	1000
Profundidade (m)	4,5	11	6
Largura (m)	24	15,5	22
Comprimento (m)	34	15,5	22
TRH (dias)	29	29	29
COV (kgSV.m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup> )	1,65	1,65	1,65

Fonte: A autora.

## 3.2 Monitoramento e análise de desempenho dos biodigestores

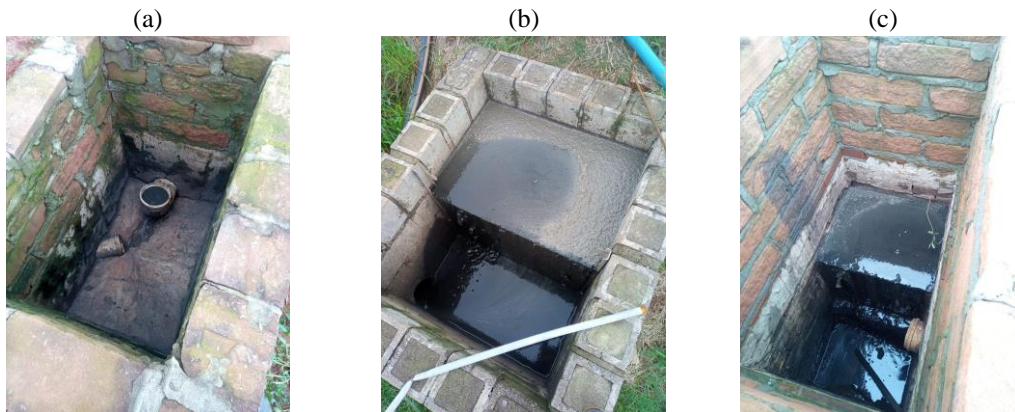
Nessa seção, foram apresentados os pontos de coleta, os parâmetros analisados, os respectivos equipamentos de medição e o cálculo da taxa volumétrica de produção de biogás em cada reator a partir do percentual de sólidos voláteis.

### 3.2.1 Pontos de coleta

Foram analisados dados relativos à biomassa e ao digestato, incluindo condutividade elétrica, sólidos totais, sólidos voláteis e pH. Além disso, a composição do biogás produzido foi analisada, com foco nos teores de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Cada biodigestor contará com pontos específicos para coleta de substrato, biogás e biofertilizante, permitindo uma avaliação abrangente do processo de biodigestão.

A biomassa é inicialmente analisada no fosso de recebimento para avaliar sua qualidade ao ingressar na cooperativa. Após essa análise, o material é transferido para as bacias de equalização (R0), onde ocorre a homogeneização. O ponto de coleta da biomassa homogeneizada, que corresponde à biomassa de entrada do R1, R2 e R3, é realizado na linha de saída das bacias de equalização (R0). A Figura 3.6 apresenta os pontos de coleta do digestato produzido nos biodigestores.

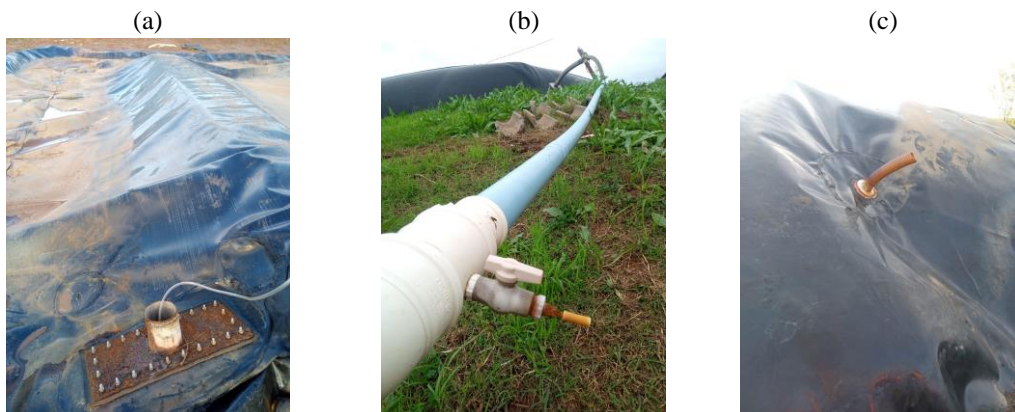
Figura 3.6 - Pontos de coleta de digestato dos reatores (a) R1, (b) R2 e (c) R3.



Fonte: A autora.

Na Figura 3.7 é possível visualizar o ponto de coleta de biogás gerado por cada um dos três biodigestores. Nas Figuras (a) e (c), as conexões em linha não estão visíveis porque, no dia em que as fotos foram tiradas, os biodigestores estavam em manutenção. Após a manutenção, os biodigestores foram reintegrados ao sistema.

Figura 3.7 - Pontos de coleta de biogás dos reatores (a) R1, (b) R2 e (c) R3.



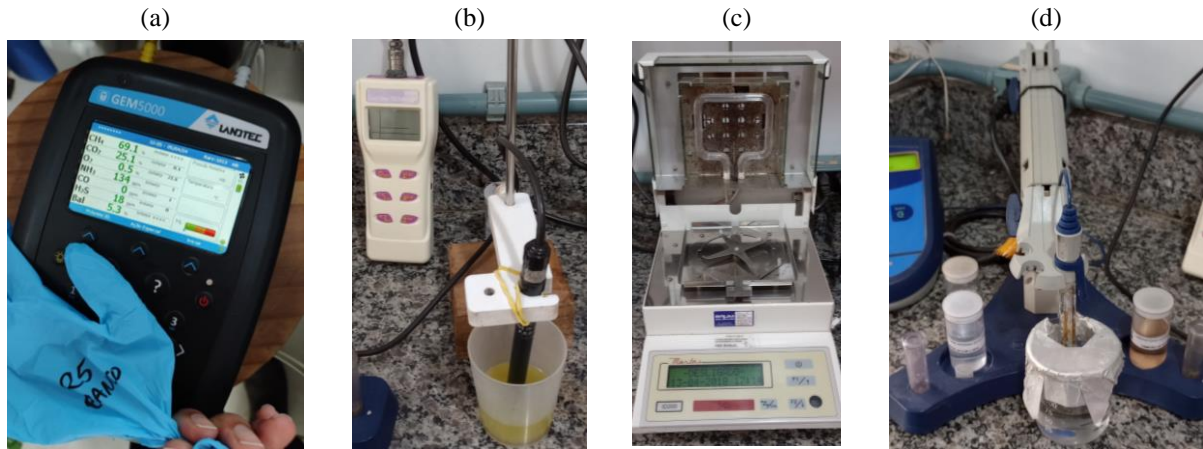
Fonte: A autora.

### 3.2.2 Parâmetros analisados

Os parâmetros avaliados neste estudo incluem o pH (para medição da acidez ou alcalinidade das amostras), a condutividade elétrica (para indicação da concentração de íons solúveis), a quantidade de sólidos totais presentes nas amostras, a fração de sólidos voláteis que podem ser volatilizados em alta temperatura e a composição do biogás em termos dos teores de cada gás presente.

A precisão dos dados coletados neste estudo depende dos equipamentos utilizados, cada um contribuindo na medição e análise dos parâmetros de biodigestão. Utilizou-se pHmetro da marca *Digimed* para medir tal propriedade da biomassa e do digestato. A condutividade elétrica, que reflete a concentração de íons solúveis, foi medida com condutivímetro da marca *AKSO*. A mufla (marca *Bravac*), é um forno utilizado para determinar os sólidos voláteis, realiza a incineração de amostras a altas temperaturas. A medição de sólidos totais e voláteis foi realizada com balança analítica da Marte Científica, em conjunto com a mufla. Por fim, o analisador de gás, modelo GEM5000 da marca *Land Tec*, mede os volumes percentuais de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no biogás, avaliando a qualidade e eficiência energética do biogás produzido. Na Figura 3.8 são apresentados alguns equipamentos utilizados para a medição das características informadas.

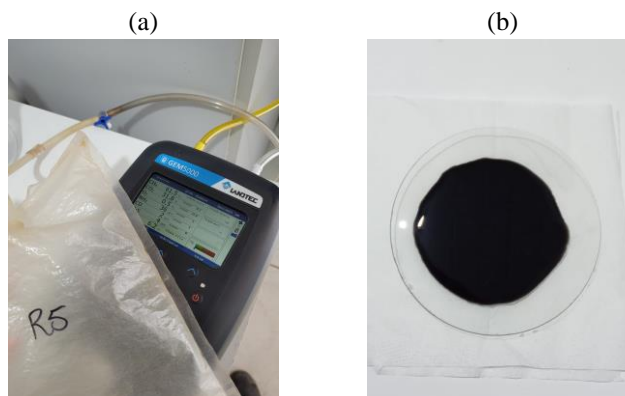
Figura 3.8 - (a) Analisador de gás; (b) Condutoivímetro; (c) Balança analítica; (d) pHmetro.



Fonte: A autora.

A coleta de amostras para análises foi realizada uma ou duas vezes por semana, entre 22/04/2024 e 16/07/2024, para assegurar a consistência e precisão dos dados. As amostras de gás foram coletadas em volumes de 500 mL, enquanto as amostras líquidas tinham um volume de 80 mL. Na Figura 3.9, é apresentada uma amostra coletada de gás e uma de digestato dos reatores. Ao todo, foram coletadas 269 amostras para análise de sólidos totais (ST), 80 para sólidos voláteis (SV), 269 para pH, 269 para condutividade, e 111 amostras de biogás.

Figura 3.9 - (a) Amostra de gás; (b) Amostra digestato.



Fonte: A autora.

Sendo assim, a rotina de coleta de amostras semanais foi: 500 mL de biogás de cada reator (R1, R2, R3) e da bacia de equalização (R0); 80 mL de biomassa do fosso de recebimento; 80 mL de substrato do R0 antes da distribuição para os reatores; e 80 mL de digestato de cada reator (R1, R2, R3) após o processo de biodigestão.

### 3.2.3 Taxa volumétrica de biogás

A taxa volumétrica de biogás produzido em cada biodigestor foi calculada a partir das medições de sólidos voláteis das amostras na entrada e na saída do reator. A metodologia segue as etapas descritas neste tópico. A taxa volumétrica de entrada de biomassa em cada reator é calculada como:

$$VR_{Ent} = \frac{V_{Ent}}{VU_{Usina}} * VU_{Reator} \quad (3.1)$$

onde  $VR_{Ent}$  é a taxa volumétrica de entrada de biomassa em cada reator em relação ao seu volume útil, medida em  $m^3/dia$ ,  $V_{Ent}$  é a taxa volumétrica de entrada de biomassa diária nos reatores da usina, medida

em m<sup>3</sup>/dia,  $VU_{Usina}$  é o volume útil da usina considerando todos os biodigestores da planta, medido em m<sup>3</sup>, e  $VU_{Reator}$  é o volume útil do reator, medido em m<sup>3</sup>.

O volume de saída de digestato de cada reator é calculado como:

$$VR_{Saída} = VR_{Ent} - (VR_{Ent} * SV_{Ent} - VR_{Ent} * SV_{Saída}) \quad (3.2)$$

onde  $VR_{Saída}$  é a taxa volumétrica de saída de digestato em cada reator em relação ao seu volume útil, medida em m<sup>3</sup>/dia,  $VR_{Ent}$  é a taxa volumétrica de entrada de biomassa em cada reator em relação ao seu volume útil, medida em m<sup>3</sup>/dia,  $SV_{Ent}$  é a concentração de sólidos voláteis medidos na biomassa de entrada, expressa em %, e  $SV_{Saída}$  é a concentração de sólidos voláteis medidos no digestato da saída de cada reator, também expressa em %.

A taxa volumétrica de biogás produzido por cada biodigestor é calculada a partir das amostras semanais de sólidos voláteis na entrada e na saída dos reatores, utilizando os volumes de entrada e saída de biomassa. Trata-se de um balanço estequiométrico em relação ao volume útil dos reatores e amostras coletadas na usina, considerando um processo sem perdas. A conversão para kg/m<sup>3</sup> e a diferença entre os sólidos voláteis iniciais e finais permitem determinar a quantidade de biogás gerado por dia em m<sup>3</sup>. Portanto, considera-se que essa metodologia representa a taxa volumétrica diária de produção de biogás em cada reator, visto que a empresa não possui controle referente a produção de biogás diária em cada reator.

A partir das equações (2.3) e (2.4) foram calculados os rendimentos de produção de biogás e metano. Entretanto, como as coletas de gases e líquidos geralmente não eram coletadas no mesmo dia, não foi possível correlacionar diretamente o percentual de metano com os sólidos voláteis de um mesmo dia. Para contornar essa limitação, utilizou-se a média dos percentuais de metano de cada reator para calcular o rendimento de produção de metano diário. Dessa forma, garantiu-se uma análise mais consistente e representativa do desempenho dos biodigestores.

### 3.3 Análise dos dados

A análise dos dados obtidos através das amostras será realizada com o objetivo de avaliar comparativamente o desempenho das três tecnologias de biodigestão anaeróbica (R1, R2 e R3) e, em alguns casos, também o fosso de recebimento e a bacia de homogeneização (R0) da cooperativa Ecocitrus. Foram aplicadas técnicas de estatística descritiva para processar e interpretar os dados coletados.

Para comparar as amostras dos diferentes reatores, foi utilizado o teste ANOVA de uma via (MONTGOMERY, 2017). Esse teste é apropriado para verificar se existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias de três ou mais grupos avaliados, sendo utilizado neste trabalho para avaliar os parâmetros nos diferentes modelos de biodigestores. Porém, a ANOVA é um teste estatístico paramétrico, e sua utilização requer que os dados populacionais sigam uma distribuição normal. Dessa forma, foi realizado um teste de normalidade dos dados previamente para verificar essa condição. Para essa verificação, foi aplicado o teste de *Shapiro-Wilk*. Apenas os parâmetros que apresentarem distribuição normal foram submetidos à análise de variância. O nível de significância adotado para a análise de variância será de 0,05.

As análises estatísticas, incluindo o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* e a ANOVA de uma via, foram realizadas utilizando o suplemento *Real Statistics Resource Pack* para *Microsoft Excel*. A análise será conduzida em cinco etapas.

#### 3.3.1 Formulação das hipóteses

Neste estudo, foram consideradas duas hipóteses estatísticas: a hipótese nula ( $H_0$ ), que afirma que não há diferença significativa entre as médias dos parâmetros analisados nos reatores (R1, R2 e R3), fosso de recebimento e tanque de homogeneização, e a hipótese alternativa ( $H_a$ ), que sugere que pelo menos uma das médias dos parâmetros analisados é diferente entre os grupos.

#### 3.3.2 Cálculo das estatísticas descritivas

A média aritmética será utilizada para determinar o valor central dos dados, calculada pela soma de todos os valores numéricos dividida pelo número de observações (equação (3.3)), onde  $\bar{X}$  representa a média dos valores,  $n$  é o número de valores, e  $X_i$  são os valores individuais.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.3)$$

A variância será usada para medir a dispersão dos valores em torno da média, calculada pela soma dos quadrados das diferenças entre cada valor e a média, dividida pelo número de observações menos um (graus de liberdade), conforme descrito na equação (3.4), onde  $S^2$  é a variância da amostra,  $n$  é o número de valores,  $X_i$  são os valores individuais, e  $\bar{X}$  é a média dos valores.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (3.4)$$

O desvio padrão (DP) será usado para medir a dispersão dos valores em torno da média, sendo a raiz quadrada da variância (S), apresentado na equação (3.5).

$$DP = \sqrt{S^2} \quad (3.5)$$

### 3.3.3 Cálculo da estatística F

Para cada parâmetro (pH, CE, ST, SV, e composição do biogás), será calculada a estatística F utilizando a metodologia a seguir.

A média total dos grupos pode ser calculada através da equação (3.6), onde  $\bar{X}_{total}$  é a média total dos três grupos comparados  $\bar{X}_1$ ,  $\bar{X}_2$  e  $\bar{X}_3$  são as médias das amostras dos três ou mais grupos comparados, e  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$  são os tamanhos das amostras dos três ou mais grupos comparados.

$$\bar{X}_{total} = \frac{n_1\bar{X}_1 + n_2\bar{X}_2 + n_3\bar{X}_3}{n_1 + n_2 + n_3} \quad (3.6)$$

A partir da equação (3.7) é possível determinar a variância entre grupos, onde  $S_b^2$  representa a variância entre os grupos,  $n_i$  é o número de amostras no grupo  $i$ ,  $k$  é o total de grupos comparados,  $\bar{X}_i$  é a média dos valores do grupo  $i$ , e  $\bar{X}_{total}$  é a média de todas as amostras combinadas. Os graus de liberdade entre os grupos ( $df_{entre}$ ) são  $k - 1$ .

$$S_b^2 = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X}_{total})^2}{k - 1} \quad (3.7)$$

A variância dentro dos grupos, ou variância residual, é apresentada equação (3.8). Nesta equação,  $S_w^2$  é a variância dentro dos grupos,  $X_{ij}$  é o valor individual  $j$  no grupo  $i$ ,  $\bar{X}_i$  é a média do grupo  $i$ ,  $k$  é o número de grupos e  $N$  é o número total de observações. Os graus de liberdade dentro dos grupos ( $df_{dentro}$ ) são  $N - k$ .

$$S_w^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{N - k} \quad (3.8)$$

A estatística F é calculada através da equação (3.9), sendo a razão entre a variância entre os grupos e a variância dentro dos grupos.

$$F = \frac{S_b^2}{S_w^2} \quad (3.9)$$

### 3.3.4 Comparação com o valor de $p$

A decisão de rejeitar ou não a hipótese nula foi baseada no valor de  $p$  obtido na ANOVA: se  $p > 0,05$ , não rejeitamos a hipótese nula ( $H_0$ ), o que indica que não há diferenças significativas entre as médias dos grupos. No entanto, se  $p < 0,05$  rejeitamos a hipótese nula ( $H_0$ ), sugerindo que há diferenças significativas entre as médias dos grupos.

### 3.3.5 Análise *post-hoc* de Tukey HSD

Como a ANOVA não mostra quais grupos são diferentes entre si, foi utilizada a análise *post-hoc* de Tukey HSD para identificar onde essas diferenças ocorrem. A análise *post-hoc* compara todas as possíveis combinações de grupos, fornecendo um valor de  $p$  para cada comparação, indicando se as

diferenças são significativas. Se o valor de  $p$  obtido na ANOVA for menor que 0,05, rejeitamos a hipótese nula e realizamos a análise *post hoc* de Tukey HSD para identificar quais grupos são diferentes entre si. Caso contrário, se  $p > 0,05$ , não rejeitamos a hipótese nula, indicando que as médias dos grupos são estatisticamente iguais.

## 4 RESULTADOS

Os resultados da pesquisa focam na avaliação comparativa da performance de três modelos de biodigestores (BLC, UASB e CSTR). As medições foram realizadas do dia 22/04/2024 a 16/07/2024.

### 4.1 Dados coletados

Os dados foram tratados e organizados em tabelas que apresentam as médias e os desvios padrão dos parâmetros avaliados no fosso de recebimento, tanques de equalização e biodigestores analisados. As médias ( $\bar{X}$ ) e desvio padrão referentes à biomassa de entrada (fosso e R0) ou o digestato (R1, R2, R3) presentes nas amostras de 80 mL, apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Estatística descritiva das amostras líquidas.

Análises	ST (mL)	SV (mL)	pH (-)	Condutividade (mS/cm)
Fosso - $\bar{X}$	5,73	4,57	5,60	9,63
Fosso - $DP$	1,43	1,07	0,33	2,47
R0 - $\bar{X}$	5,43	4,29	5,59	9,91
R0 - $DP$	1,44	1,35	0,18	2,34
R1 - $\bar{X}$	2,92	1,68	7,77	17,98
R1 - $DP$	0,36	0,20	0,10	1,00
R2 - $\bar{X}$	2,80	1,50	7,76	18,26
R2 - $DP$	0,21	0,17	0,11	0,94
R3 - $\bar{X}$	2,92	1,63	7,77	18,33
R3 - $DP$	0,29	0,13	0,12	0,79

Fonte: A autora.

Na Tabela 4.2 é possível visualizar as médias ( $\bar{X}$ ) e desvio padrão dos gases provenientes dos reatores, presentes nas amostras de 500 mL, todos dados são apresentados em mL. Para análise de ANOVA de uma via, foram analisados apenas os gases CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, devido à sua maior relevância e impacto nos resultados das amostras. Como os valores apresentados são médias das amostras analisadas, a soma total dos gases pode não atingir 500 mL. Isso ocorre porque trata-se de uma média e não de um somatório exato, e pode ser influenciado pela variação na composição dos resíduos na preparação da mistura no fosso de recebimento.

Tabela 4.2 - Estatística descritiva das amostras de gases.

Análises	CH <sub>4</sub> (mL)	CO <sub>2</sub> (mL)	O <sub>2</sub> (mL)	N <sub>2</sub> (mL)	H <sub>2</sub> S (mL)	NH <sub>3</sub> (mL)	CO (mL)	H <sub>2</sub> (mL)
R0 - $\bar{X}$	181,48	227,63	4,02	86,37	0,05	0,23	0,04	0,09
R0 - $DP$	12,25	16,40	2,19	18,28	0,06	0,19	0,04	0,27
R1 - $\bar{X}$	318,30	144,06	2,20	36,30	0,03	0,14	0,02	0,01
R1 - $DP$	23,54	23,42	0,91	19,60	0,06	0,11	0,04	0,00
R2 - $\bar{X}$	329,91	141,47	1,78	26,86	0,02	0,19	0,01	0,01
R2 - $DP$	14,02	15,37	0,82	12,30	0,01	0,07	0,05	0,00
R3 - $\bar{X}$	328,75	142,83	1,44	27,58	0,02	0,14	0,02	0,01
R3 - $DP$	16,30	15,53	0,84	15,89	0,01	0,09	0,04	0,00

Fonte: A autora.



## 4.2 Taxa volumétrica de biogás

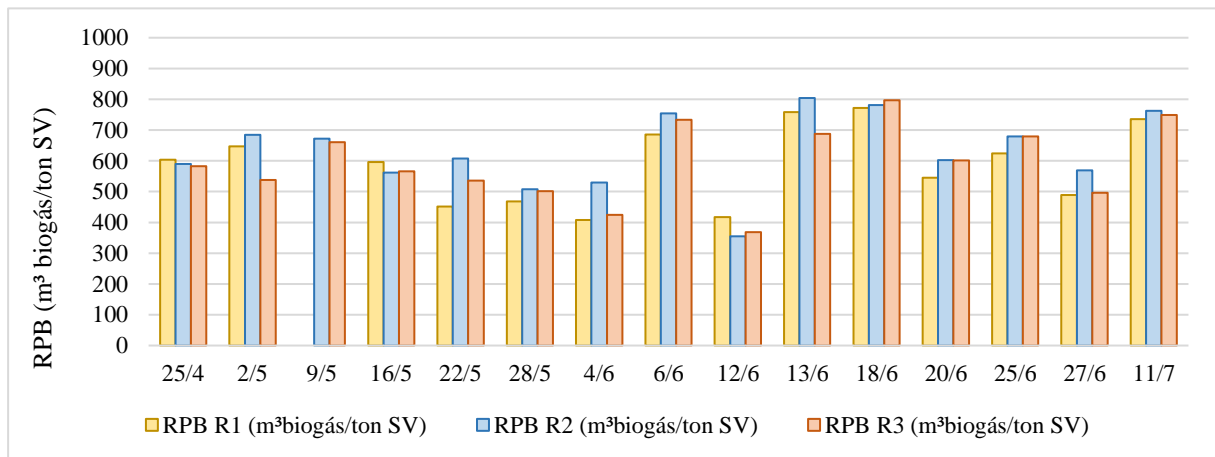
A Tabela B1 (ver Apêndice B) apresenta as taxas de produção volumétrica de biogás de cada biodigestor, ajustadas de acordo com o volume do reator e os dados das amostras de sólidos voláteis na entrada e saída dos reatores.

No dia 09/05/2024, a amostra de SV para o reator R1 não foi coletada devido à manutenção do reator. Consequentemente, não foi possível realizar o balanço estequiométrico para determinar a taxa volumétrica de biogás e metano gerada no reator, resultando na impossibilidade de determinar o RPB e o RPM para o mesmo reator, conforme pode ser observado na Figura 4.1 e Figura 4.2 no tópico 4.3.

## 4.3 Rendimento de produção de biogás e metano

A partir do cálculo do rendimento de produção de biogás foi possível parametrizar os dados analisados da taxa volumétrica de biogás produzido em relação ao volume do reator, identificando qual biodigestor apresentou melhor eficiência. Os dados são apresentados na Figura 4.1. A análise dos dados destacou o desempenho superior do R2 em termos de rendimento de produção de biogás.

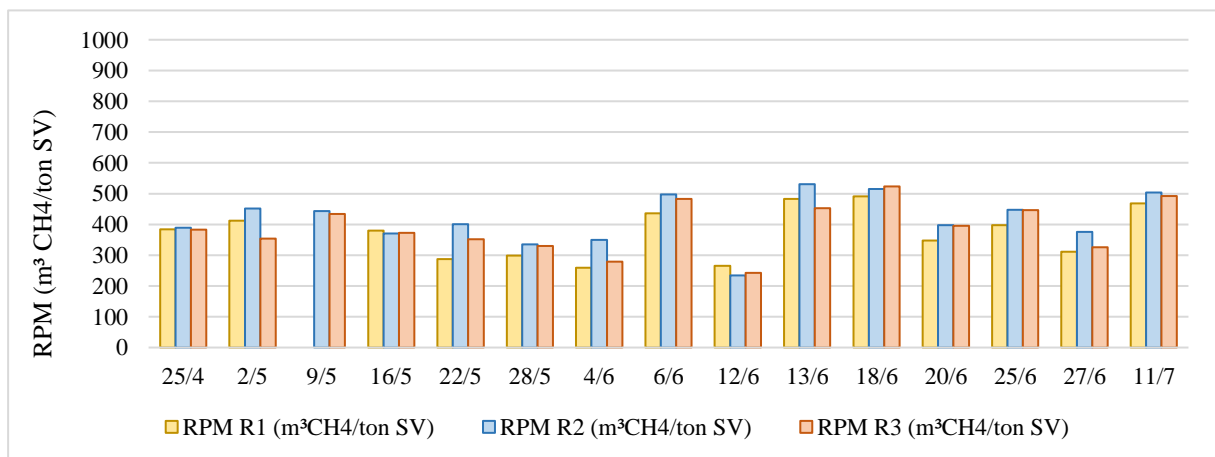
Figura 4.1 - RPB dos reatores R1, R2 e R3.



Fonte: A autora.

Os cálculos do rendimento de metano (RPM) permitiram a análise do potencial de volume de metano produzido em relação ao volume do reator. Essa análise foi fundamental para identificar qual biodigestor apresentou maior eficiência. Os percentuais de metano utilizados para cada reator (R1, R2, R3) foram de 63,33%, 66,20%, 66,63% respectivamente. Na Figura 4.2, são apresentados os resultados comparativos entre os diferentes biodigestores, destacando o desempenho superior do R2 em termos de produção de metano.

Figura 4.2 - RPM dos reatores R1, R2 e R3.



Fonte: A autora.

#### 4.4 ANOVA de uma via e *post-hoc* de Tukey HSD

A partir da aplicação da metodologia da ANOVA de uma via e do teste *post-hoc* de Tukey HSD, foi possível analisar os dados com maior precisão, considerando uma taxa de significância de 0,05. Foram formuladas hipóteses nulas e alternativas para cada parâmetro, avaliando se existem diferenças significativas entre os grupos comparados. Os resultados foram apresentados para os seguintes parâmetros: rendimento de produção de biogás (RPB), rendimento de produção de metano (RPM), sólidos totais, sólidos voláteis, pH, condutividade elétrica, e composição dos gases.

Para ST, SV, pH e condutividade elétrica, a comparação foi feita entre as amostras coletadas no fosso, R0, R1, R2 e R3. Já para a composição dos gases, as comparações envolverão os reatores R0, R1, R2 e R3. Em relação ao RPB e RPM, a análise foi realizada entre os reatores R1, R2 e R3.

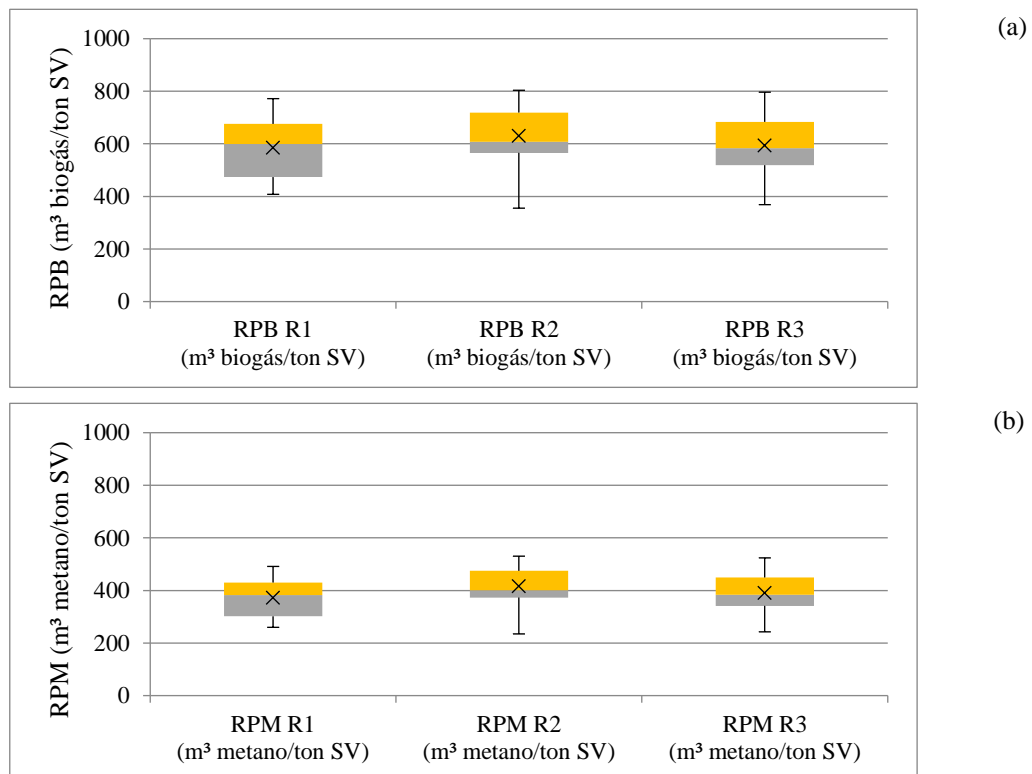
Os resultados também foram apresentados através de *boxplots*, que ilustram a distribuição dos dados e facilitam a visualização das variações entre os diferentes grupos. Esses gráficos fornecem uma representação das medianas, *quartis* e possíveis *outliers*, complementando a análise estatística e ajudando na interpretação dos resultados.

As tabelas resultantes dessas análises apresentam os valores médios, desvios padrão, variâncias, estatísticas *F* e valores *p*, indicando quais diferenças são estatisticamente significativas.

##### 4.4.1 RPB e RPM

Nas Tabela A1 e Tabela A2 (ver Apêndice A) são apresentados os dados descritivos das amostras analisadas para RPB e RPM, incluindo o número de amostras, somatório, média, desvio padrão, variância, menor e maior valor. Na Figura 4.3 (a) e Figura 4.3 (b) são apresentados os gráficos de *boxplot* com *outliers* para os dois parâmetros analisados. Entretanto, não foram identificados *outliers*.

Figura 4.3 - *Boxplot* das amostras de RPB (a) e RPM (b) dos reatores R1, R2 e R3;



Fonte: A autora.

Posteriormente foi possível realizar o cálculo da ANOVA, onde foram obtidos os seguintes resultados, apresentados na Tabela 4.3 - ANOVA de amostras de RPB e RPM dos reatores R1, R2 e R3.

A ANOVA de uma via mostrou que não há diferença significativa entre os três grupos analisados para ambos os parâmetros. Para o RPB, os resultados foram [ $F(2, 41) = 0,55$ ;  $p = 0,58$ ], enquanto para o RPM foram [ $F(2, 41) = 1,07$ ;  $p = 0,35$ ]. O teste *post-hoc* de Tukey HSD confirmou que não há diferença

entre as médias dos grupos RPB R1, RPB R2, RPB R3, bem como entre os grupos RPM R1, RPM R2 e RPM R3. Sendo assim, a hipótese alternativa foi descartada, visto que  $p$  é maior que 0,05.

Tabela 4.3 - ANOVA de amostras de RPB e RPM dos reatores R1, R2 e R3.

Fontes	$df$	RPM $F$	RPB Valor $p$	RPM $F$	RPM Valor $p$
Entre grupos	2	0,55	0,58	1,07	0,35
Dentro dos grupos	41				

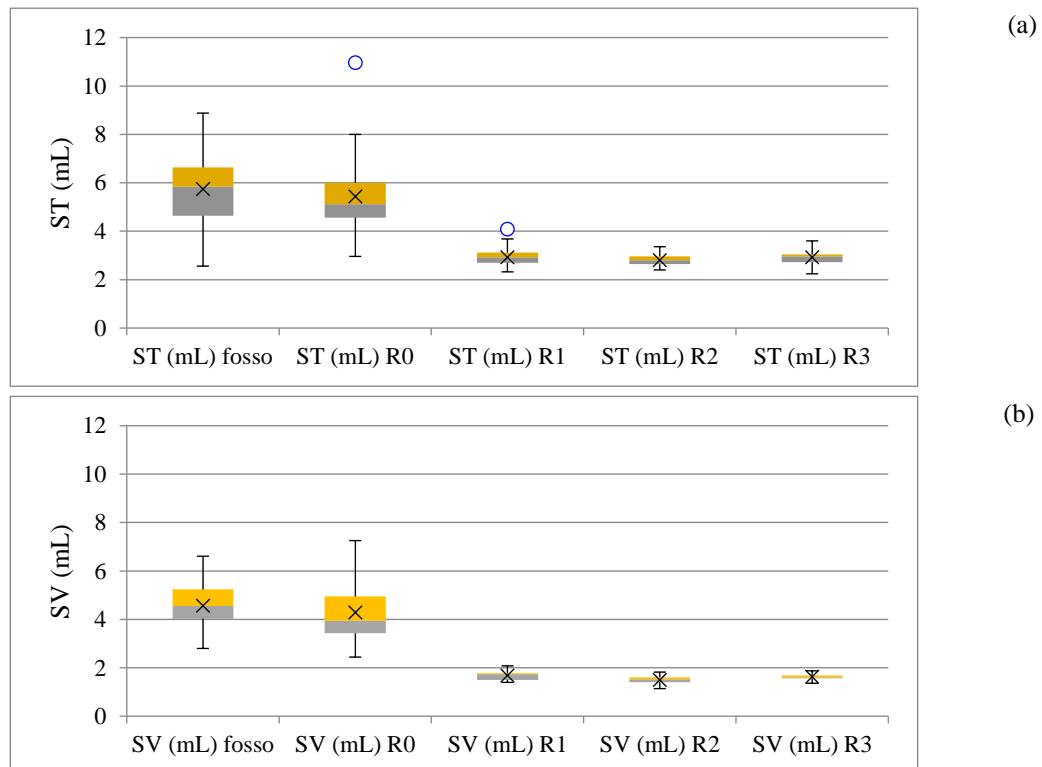
Fonte: A autora.

#### 4.4.2 Amostras de biomassa ou digestato

Os valores apresentados nesse tópico correspondem a amostras de 80 mL, com os valores de sólidos totais e sólidos voláteis convertidos em mL, pH e condutividade. A Tabela A3, Tabela A4 Tabela A5 e Tabela A6 (ver APÊNDICE A) apresentam as estatísticas descritivas das amostras coletadas, incluindo o número de amostras, somatório, média, desvio padrão, variância, menor e maior valor.

Na Figura 4.4, é apresentado o gráfico de *boxplot* das amostras de ST (a) e SV (b) dos diferentes grupos (Fosso, R0, R1, R2 e R3). As análises indicaram a presença de *outliers*.

Figura 4.4 - *Boxplot* das amostras de ST (a) e SV (b) dos diferentes grupos (Fosso, R0, R1, R2 e R3).



Fonte: A autora.

Os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 4.4 mostram que há diferenças significativas entre os grupos analisados para ST.

Tabela 4.4 - Resultados da ANOVA para ST nos diferentes grupos.

Fontes	$df$	$F$	Valor $p$
Entre grupos	4	139,55	<0,01
Dentro dos grupos	264		

Fonte: A autora.

A Tabela 4.5 revela que também há diferenças significativas entre os grupos analisados para SV.

Tabela 4.5 - Resultados da ANOVA para SV nos diferentes grupos.

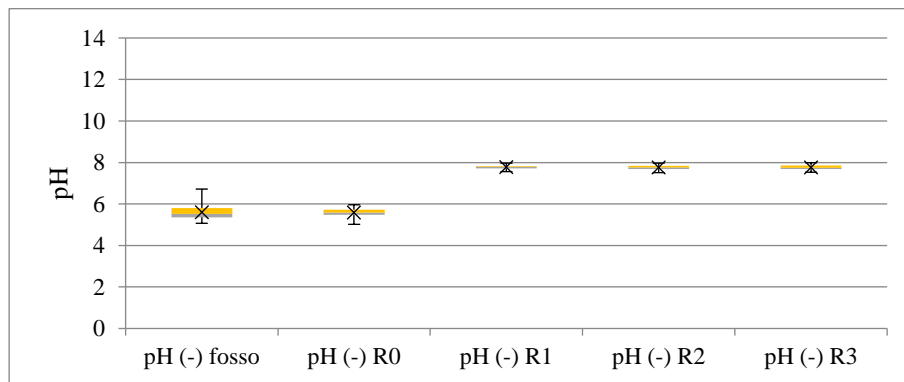
Fontes	df	F	Valor p
Entre grupos	4	64,66	<0,01
Dentro dos grupos	75		

Fonte: A autora.

A ANOVA de uma via revelou que há diferenças significativas entre os grupos analisados para ST [ $F(4, 264) = 139,55; p = 6,81E-64$ ] e também para SV [ $F(4, 75) = 64,66; p = 1,48E-23$ ]. Os resultados são apresentados na Tabela C1 e Tabela C2 (ver APÊNDICE C).

Os resultados da análise *post-hoc* de *Tukey HSD* indicaram que, para os dois parâmetros analisados (ST e SV), os grupos fosso e R0 diferem significativamente dos grupos R1, R2 e R3. Observou-se que os valores de ST e SV são mais altos no Fosso e no R0 (tanque de hidrólise), enquanto diminuem após a biodigestão nos reatores R1, R2 e R3. Este comportamento é consistente com a literatura, que aponta uma redução nos valores de ST e SV após o processo de biodigestão (PESSUTI, HERMES, *et al.*, 2015). Sendo assim, a hipótese nula foi rejeitada, e a hipótese alternativa foi aceita, indicando que pelo menos uma das médias é significativamente diferente entre os grupos analisados.

Na Figura 4.5, é apresentado o gráfico de *boxplot* das amostras de pH dos diferentes grupos (fosso, R0, R1, R2 e R3). As análises indicaram a presença de outliers, que são valores extremos que se destacam do restante dos dados.

Figura 4.5 - *Boxplot* das amostras de pH dos reatores.

Fonte: A autora.

Os resultados da ANOVA, apresentados na Tabela 4.6, mostram que há diferenças significativas entre os grupos analisados para pH.

Tabela 4.6 - Resultados da ANOVA para pH nos diferentes grupos.

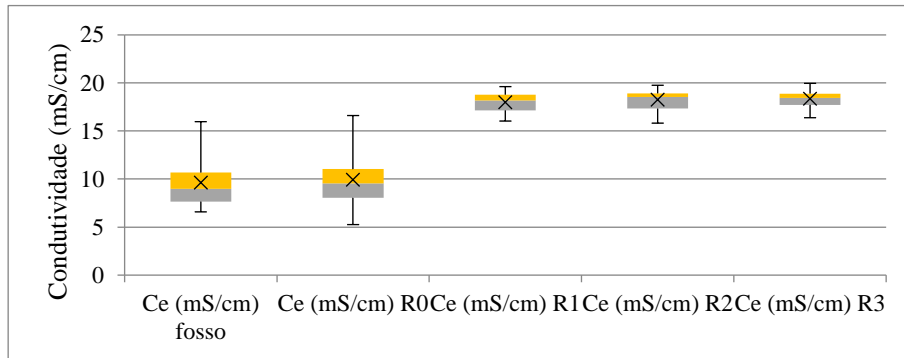
Fontes	df	F	Valor p
Entre grupos	4	2.066,97	<0,01
Dentro dos grupos	264		

Fonte: A autora.

A ANOVA revelou diferenças significativas entre os grupos analisados para pH [ $F(4, 264) = 2.066,97; p = 7,31E-198$ ]. Para identificar onde essas diferenças ocorrem, foi realizada a análise *post-hoc* de *Tukey HSD*. Os resultados são apresentados na Tabela C3.

Os resultados da análise *post-hoc* indicam que os grupos Fosso e R0 diferem significativamente dos grupos R1, R2 e R3, pois o pH é mais baixo nos primeiros. O aumento do pH após a biodigestão nos reatores R1, R2 e R3 está em linha com o relatado na literatura (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008). Com isso, rejeita-se a hipótese nula, aceitando-se a hipótese alternativa de que pelo menos uma das médias é significativamente diferente entre os grupos analisados.

Já na Figura 4.6, é apresentado o gráfico de *boxplot* das amostras de condutividade dos diferentes grupos (Fosso, R0, R1, R2 e R3). As análises indicaram a presença de *outliers*, ou seja, valores que se destacam do restante dos dados.

Figura 4.6 - *Boxplot* das amostras de Ce dos reatores.

Fonte: A autora.

Os resultados da ANOVA, apresentados na Tabela 4.7, mostram que há diferenças significativas entre os grupos analisados para condutividade.

Tabela 4.7 - Resultados da ANOVA para condutividade nos diferentes grupos.

Fontes	<i>df</i>	<i>F</i>	Valor <i>p</i>
Entre grupos	4	413,86	<0,01
Dentro dos grupos	264		

Fonte: A autora.

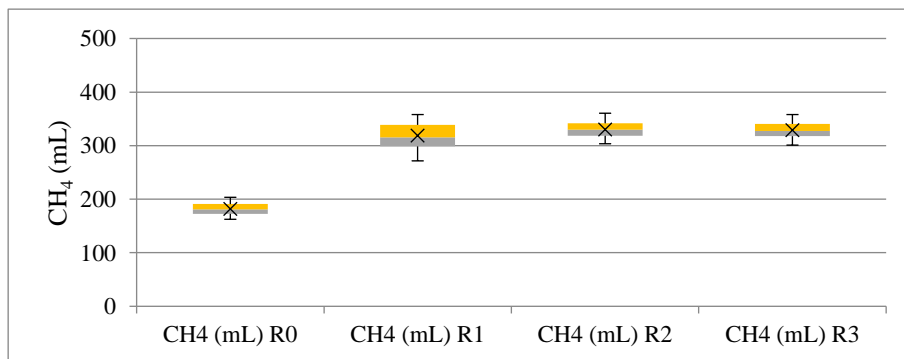
A ANOVA revelou diferenças significativas entre os grupos analisados para condutividade [ $F(4, 264) = 413,86; p = 2,15E-112$ ]. Para identificar onde essas diferenças ocorrem, foi realizada a análise *post-hoc* de *Tukey HSD*. Os resultados são apresentados na Tabela C4.

Os resultados da análise *post-hoc* indicam que os grupos fosso e R0 diferem significativamente dos grupos R1, R2 e R3, pois a condutividade é mais baixa nos primeiros. Portanto, rejeita-se a hipótese nula, aceitando-se a hipótese alternativa de que pelo menos uma das médias é significativamente diferente entre os grupos analisados.

#### 4.4.3 Amostras do biogás

Os valores apresentados neste tópico correspondem às amostras de 500 mL, focando nos gases mais significativos: CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Os demais gases foram considerados insignificantes em relação ao tamanho da amostra e, portanto, não serão apresentados.

As Tabela A7 e Tabela A8 (ver APÊNDICE A) apresentam as estatísticas descritivas das amostras coletadas de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, respectivamente, incluindo o número de amostras, somatório, média, desvio padrão, variância, menor e maior valor. A Figura 4.7 apresenta o *boxplot* das concentrações de CH<sub>4</sub> nos diferentes grupos. O gráfico permite visualizar a distribuição, mediana e possíveis outliers de CH<sub>4</sub> entre os grupos R0, R1, R2 e R3.

Figura 4.7 - *Boxplot* das amostras de CH<sub>4</sub> dos reatores.

Fonte: A autora.

A ANOVA realizada indicou diferenças significativas entre os grupos para o CH<sub>4</sub> [ $F(3, 107) = 481,81$ ;  $p = 5,72E-62$ ], conforme mostrado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resultados da ANOVA para CH<sub>4</sub> nos diferentes grupos.

Fontes	df	F	Valor p
Entre grupos	3	481,81	<0,01
Dentro dos grupos	107		

Fonte: A autora.

Para identificar onde essas diferenças ocorrem, foi realizada a análise *post-hoc* de *Tukey HSD*. Os resultados são apresentados na Tabela 4.9. Os resultados indicam que, para o parâmetro CH<sub>4</sub>, o grupo R0 difere significativamente dos grupos R1, R2 e R3. Isso se deve ao fato de que os valores de CH<sub>4</sub> aumentam após a biodigestão nos reatores (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008), sendo mais elevados em R1, R2 e R3.

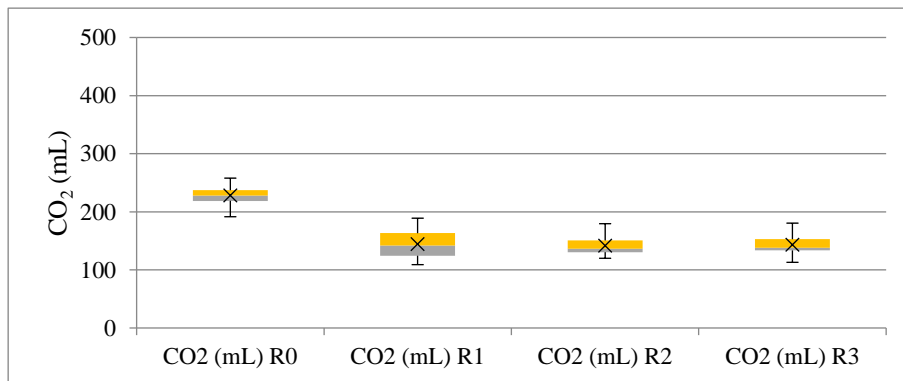
Tabela 4.9 - Comparação *post-hoc* de *Tukey HSD* para CH<sub>4</sub>.

Grupo 1	Grupo 2	Valor p
CH <sub>4</sub> (mL) R0	CH <sub>4</sub> (mL) R1	<0,01
CH <sub>4</sub> (mL) R0	CH <sub>4</sub> (mL) R2	<0,01
CH <sub>4</sub> (mL) R0	CH <sub>4</sub> (mL) R3	<0,01
CH <sub>4</sub> (mL) R1	CH <sub>4</sub> (mL) R2	0,05
CH <sub>4</sub> (mL) R1	CH <sub>4</sub> (mL) R3	0,12
CH <sub>4</sub> (mL) R2	CH <sub>4</sub> (mL) R3	0,99

Fonte: A autora.

A Figura 4.8 a seguir apresenta o *boxplot* das concentrações de CO<sub>2</sub> nos diferentes grupos. O gráfico permite visualizar a distribuição, mediana e possíveis *outliers* de CO<sub>2</sub> entre os grupos R0, R1, R2 e R3.

Figura 4.8 - *Boxplot* das amostras de CO<sub>2</sub> dos reatores.



Fonte: A autora.

A ANOVA realizada indicou diferenças significativas entre os grupos para o CO<sub>2</sub> [ $F(3, 107) = 149,29$ ;  $p = 4,29E-38$ ], conforme mostrado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Resultados da ANOVA para CO<sub>2</sub> nos diferentes grupos.

Fontes	df	F	Valor p
Entre grupos	3	149,29	<0,01
Dentro dos grupos	107		

Fonte: A autora.

Para identificar onde essas diferenças ocorrem, foi realizada a análise *post-hoc* de *Tukey HSD*. Os resultados são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Comparação *post-hoc* de Tukey HSD para CO<sub>2</sub>.

Grupo 1	Grupo 2	Valor <i>p</i>
CO <sub>2</sub> (mL) R0	CO <sub>2</sub> (mL) R1	<0,01
CO <sub>2</sub> (mL) R0	CO <sub>2</sub> (mL) R2	<0,01
CO <sub>2</sub> (mL) R0	CO <sub>2</sub> (mL) R3	<0,01
CO <sub>2</sub> (mL) R1	CO <sub>2</sub> (mL) R2	0,95
CO <sub>2</sub> (mL) R1	CO <sub>2</sub> (mL) R3	0,99
CO <sub>2</sub> (mL) R2	CO <sub>2</sub> (mL) R3	0,99

Fonte: A autora.

Os resultados indicam que, para o parâmetro CO<sub>2</sub>, os grupos R0 diferem significativamente dos grupos R1, R2 e R3. Isso ocorre porque os valores de CO<sub>2</sub> são mais altos em R0 e diminuem após a biodigestão nos reatores (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019).

#### 4.4.4 Comparativo das fases da digestão anaeróbia (DA)

Visto que a digestão anaeróbia é um processo biológico complexo que ocorre em quatro fases principais, a análise dos dados coletados ao longo das etapas de tratamento na planta da Ecocitrus revela detalhes importantes sobre as fases nos diferentes biodigestores estudados (R1, R2 e R3).

A hidrólise, primeira fase da DA, onde as macromoléculas orgânicas são quebradas em moléculas menores e solúveis, é possível perceber que no tanque de equalização (R0), os resultados indicam que essa fase tem início evidente. Isso é corroborado pelo pH ácido observado no R0 com média de 5,59 (mínimo de 5,02 e máximo de 5,96), que sugere a atividade hidrolítica intensa. Além disso, a baixa taxa de CH<sub>4</sub> observada nas amostras de 500 mL no R0 confirma que a metanogênese não está ocorrendo de forma significativa nesta etapa, já que a metanogênese é inibida em condições de pH ácido, tendo em média 180,78 mL de CH<sub>4</sub> na amostra, quando as dos reatores R1, R2 e R3 ficam na casa das 300 mL, como pode ser observado na Tabela A8 do APÊNDICE A. Sendo assim, é possível perceber que a etapa de hidrólise inicia ainda no tanque de equalização.

Durante a acetogênese, os ácidos voláteis são convertidos em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Nos biodigestores R1, R2 e R3, os valores de pH começam a subir, indicando a progressão da hidrólise e acidogênese para a acetogênese. Este aumento do pH é um indicativo da formação de compostos menos ácidos e mais neutros, como o acetato (AL SEADI et al., 2008). Já a metanogênese, sendo a fase final, é onde o acetato, hidrogênio e dióxido de carbono são convertidos em metano e água. Nos reatores R1, R2 e R3, a presença de metano em concentrações significativas indica que a metanogênese está ocorrendo.

A análise comparativa das fases da digestão anaeróbia nos diferentes biodigestores mostrou que o R0 (tanque de equalização) é o início da hidrólise, possuindo pH ácido, baixa produção de CH<sub>4</sub>. Já nos reatores R1, R2 e R3 foi possível perceber a progressão da acidogênese para a acetogênese e metanogênese, assim como o aumento do pH e produção significativa de metano. Esses resultados estão em conformidade com a literatura, que descreve a evolução do pH e a produção de metano como indicadores chave das diferentes fases da digestão anaeróbia (SEADI, RUTZ, et al., 2008), (KUNZ, STEINMETZ e DO AMARAL, 2019), (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

Em virtude das análises realizadas de ANOVA, não há diferença no rendimento de produção de metano e de biogás entre os biodigestores analisados, sendo assim, não foi possível afirmar se algum biodigestor possui um ambiente mais favorável para os microrganismos metanogênicos, devido a melhores condições de mistura e retenção de biomassa. Entretanto, é fundamental destacar que os resultados obtidos refletem o desempenho dos reatores com o efluente específico utilizado e suas características construtivas de reatores. Caso o efluente ou o modelo construtivo do reator sejam alterados, os resultados podem variar. Recomenda-se a continuação dos testes para expandir o banco de dados e validar as hipóteses do estudo.

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo investigou os rendimentos de produção de metano e biogás em três tecnologias distintas de biodigestores, alimentados pelo mesmo substrato inicial após a equalização na bacia R0. Os resultados da análise de variância (ANOVA) mostraram que, embora não houvesse diferenças significativas na produção de metano entre os reatores R1, R2 e R3 individualmente, foram observadas variações significativas quando comparados com o substrato inicial no fosso de recebimento e na bacia R0. Essas variações evidenciam a influência das fases iniciais de hidrólise e acidogênese no R0 na produção de metano.

A pesquisa permitiu uma análise detalhada das diferentes fases da biodigestão em cada reator, utilizando indicadores como o pH e a concentração de CH<sub>4</sub>. O pH ácido e a baixa presença de metano no substrato inicial no fosso de recebimento e posteriormente no R0 indicam a fase inicial de hidrólise e preparação do substrato. Em contraste, nos reatores R1, R2 e R3, o aumento do pH e a maior produção de CH<sub>4</sub> sugerem avanço nas fases subsequentes de fermentação e metanogênese. Essas observações são importantes para o monitoramento e controle das operações em escala industrial.

Embora não tenham sido encontradas diferenças estatísticas significativas entre as tecnologias de biodigestores, a análise das variações em relação ao substrato inicial ressalta a importância de monitorar todas as etapas do processo de biodigestão. As metodologias desenvolvidas neste estudo permitiram uma avaliação das condições operacionais dos biodigestores, utilizando uma modelagem adaptada para os reatores. Estes foram dimensionados especificamente para atender às necessidades da usina, levando em consideração as características dos efluentes industriais.

Os resultados indicaram que, nas condições de dimensionamento e materiais utilizadas, não foram observadas diferenças significativas entre as tecnologias de biodigestores avaliadas. Isso sugere que essas tecnologias têm um potencial similar de aplicação em diferentes indústrias, dependendo das necessidades específicas e características dos resíduos processados. Para futuros estudos, recomenda-se aumentar o número de amostras e realizar análises diárias de todos os parâmetros, o que pode refinar as análises e fortalecer as conclusões sobre a eficácia das diferentes tecnologias de biodigestão. Além disso, a instalação de um medidor de vazão poderia contribuir significativamente para a precisão do estudo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABATZOGLOU, N.; BOIVIN, S. A Review of Biogas Purification Processes. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, 8 Dezembro 2009. 42-71.
- ABRELPE. **Roteiro para Aproveitamento dos Resíduos Orgânicos**. ABREMA. São Paulo. 2017.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. [S.l.]. 2022.
- BEP. **Biogás no Brasil - Potencial Oferta a Curto Prazo**. Instituto 17. São Paulo/SP, p. 74. 2021. (ISBN 978-65-997883-5-2).
- CIBIOGÁS. **Panorama do Biogás no Brasil 2022**. CIBiogás. Foz do Iguaçu, p. 31. 2023. (Relatório Técnico nº 001/2023).
- CIOABLA, A. E. et al. Comparative Study on Factors Affecting Anaerobic Digestion of Agricultural Vegetal Residues. **Biotechnology for Biofuels**, 6 Junho 2012. 9.
- COELHO, S. T. et al. **A Conversão da Fonte Renovável Biogás em Energia**. Políticas públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio. Brasília: [s.n.]. 2006. p. 11.
- DEGANUTTI, R. et al. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. FAAC - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Bauru, SP, p. 5. 2002.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction**. 1ª. ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- KARLSSON, T. et al. **Manual Básico de Biogás**. ISBN: 978-85-8167-073-7. ed. Lajeado/RS: Univates, v. I, 2014.
- KHAN, I. U. et al. Biogas as a Renewable Energy Fuel – A Review of Biogas Upgrading, Utilisation and Storage. **Energy Conversion and Management**, 18 Agosto 2017. 277-294.
- KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2019.
- LIEBETRAU, J. et al. **The Role of Biogas and Biomethane in Pathway to Net Zero**. IEA Bioenergy Task 37. [S.l.], p. 12. 2022.
- MDR. **Caderno Temático: Valorização de Resíduos Orgânicos**. [S.l.]. 2019.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9ª. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- OLIVER, A. D. P. M. et al. **Manual de Treinamento em Biodigestão**. Instituto Winrock Brasil. [S.l.], p. 23. 2008.
- PESSUTI, C. A. et al. Remoção de Sólidos e Produção de Metano na Digestão Anaeróbia de Efluente de Processamento de Mandioca. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 110-116, 2015.
- SDPI. **Atlas Eólico: Rio Grande**. SDPI: AGDI. Porto Alegre, p. 116. 2014. (ISBN 978-85-67342-01-6).
- SEADI, T. A. et al. **Biogas Handbook**. Esbjerg: University of Southern Denmark, 2008.
- SHAH, S. V. et al. Sustainable Biogas Production via Anaerobic Digestion with Focus on CSTR Technology: A Review. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Taiwan, 2024.
- SOARES, C. M. T.; FEIDEN, A.; TAVARES, S. G. Fatores que Influenciam o Processo de Digestão Anaeróbia na Produção de Biogás. **Nativa**, v. 5, n. 7, p. 509-514, dez. 2017. ISSN ISSN: 2318-7670.
- STEINMETZ, R. L. R. et al. Enrichment and acclimation of an anaerobic mesophilic microorganism's inoculum for standardization of BMP assays. **Bioresource Technology**, 9 Julho 2016. 21-28.

SUNIL, L.; JOUNI, H. Anaerobic Digestion: Factors Affecting Anaerobic Digestion Process. In: \_\_\_\_\_  
**Waste Bioremediation: Energy, Environment, and Sustainability.** Singapore: Springer, 2018.

## APÊNDICE A – DADOS ESTATÍSTICOS DAS AMOSTRAS

Nas Tabela A1 e a Tabela A8 são apresentadas as estatísticas descritivas, incluindo o número de amostras, somatório do grupo, média do grupo, desvio padrão do grupo, variância do grupo, bem como os valores mínimo e máximo.

Tabela A1 - Estatística descritiva de RPB para os reatores R1, R2 e R3.

<b>Grupo</b>	<b>Nº Amostras</b>	<b>Somatório</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Variância</b>	<b>Menor</b>	<b>Maior</b>
RPB R1	14	8.201,44	585,82	125,59	15.772,86	519,44	652,19
RPB R2	15	9.461,29	630,75	120,99	14.637,68	566,63	694,88
RPB R3	15	8.922,27	594,82	122,48	15.002,44	530,69	658,94

Fonte: A autora.

Tabela A2 - Estatísticas descritivas de RPM para os reatores R1, R2 e R3.

<b>Grupo</b>	<b>Nº Amostras</b>	<b>Somatório</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Variância</b>	<b>Menor</b>	<b>Maior</b>
RPM R1	14	5.220,98	372,93	79,95	6.391,95	329,69	416,16
RPM R2	15	6.242,68	416,18	79,83	6.372,55	374,41	457,95
RPM R3	15	5.866,39	391,09	80,53	6.485,65	349,32	432,86

Fonte: A autora.

Tabela A3 - Estatísticas descritivas de ST para os diferentes grupos.

<b>Grupo</b>	<b>Nº Amostras</b>	<b>Somatório</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Variância</b>	<b>Menor</b>	<b>Maior</b>
ST fosso	55	315,28	5,73	1,43	2,05	5,49	5,98
ST R0	48	260,56	5,43	1,44	2,08	5,17	5,69
ST R1	52	152,08	2,92	0,36	0,13	2,67	3,18
ST R2	57	159,76	2,80	0,21	0,04	2,56	3,04
ST R3	57	166,16	2,92	0,29	0,08	2,68	3,15

Fonte: A autora.

Tabela A4 - Estatísticas descritivas de SV para os diferentes grupos.

<b>Grupo</b>	<b>Nº Amostras</b>	<b>Somatório</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Variância</b>	<b>Menor</b>	<b>Maior</b>
SV fosso	17	77,69	4,57	1,07	1,15	4,19	4,94
SV R0	15	64,37	4,29	1,35	1,82	3,89	4,69
SV R1	14	23,51	1,68	0,20	0,04	1,27	2,09
SV R2	17	25,56	1,50	0,17	0,03	1,13	1,88
SV R3	17	27,67	1,63	0,13	0,02	1,25	2,00

Fonte: A autora.

Tabela A5 - Estatísticas descritivas de pH para os diferentes grupos.

<b>Grupo</b>	<b>Nº Amostras</b>	<b>Somatório</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Variância</b>	<b>Menor</b>	<b>Maior</b>
pH fosso	55	307,98	5,60	0,33	0,11	5,55	5,65
pH R0	48	268,25	5,59	0,18	0,03	5,53	5,64
pH R1	52	404,29	7,77	0,10	0,01	7,72	7,83
pH R2	57	442,54	7,76	0,11	0,01	7,71	7,81
pH R3	57	442,73	7,77	0,12	0,01	7,72	7,82

Fonte: A autora.

Tabela A6 - Estatísticas descritivas de Ce para os diferentes grupos.

<b>Grupo</b>	<b>Nº Amostras</b>	<b>Somatório</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Variância</b>	<b>Menor</b>	<b>Maior</b>
Ce (mS/cm) fosso	55	529,71	9,63	2,47	6,11	9,19	10,07
Ce (mS/cm) R0	48	475,62	9,91	2,34	5,47	9,44	10,38
Ce (mS/cm) R1	52	935,10	17,98	1,00	1,00	17,53	18,43
Ce (mS/cm) R2	57	1.040,87	18,26	0,94	0,89	17,83	18,69
Ce (mS/cm) R3	57	1.044,72	18,33	0,79	0,62	17,90	18,76

Fonte: A autora.

Tabela A7 - Estatísticas descritivas de CH<sub>4</sub> para os diferentes grupos.

<b>Grupo</b>	<b>Nº Amostras</b>	<b>Somatório</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Variância</b>	<b>Menor</b>	<b>Maior</b>
CH <sub>4</sub> (mL) R0	26	4.718,50	181,48	12,25	150,05	174,87	188,09
CH <sub>4</sub> (mL) R1	27	8.594,00	318,30	23,54	554,04	311,81	324,78
CH <sub>4</sub> (mL) R2	32	10.557,00	329,91	14,02	196,56	323,95	335,86
CH <sub>4</sub> (mL) R3	26	8.547,50	328,75	16,30	265,79	322,14	335,36

Fonte: A autora.

Tabela A8 - Estatísticas descritivas de CO<sub>2</sub> para os diferentes grupos.

<b>Grupo</b>	<b>Nº Amostras</b>	<b>Somatório</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Variância</b>	<b>Menor</b>	<b>Maior</b>
CO <sub>2</sub> (mL) R0	26	5.918,50	227,63	16,40	268,81	220,67	234,60
CO <sub>2</sub> (mL) R1	27	3.889,50	144,06	23,42	548,54	137,22	150,89
CO <sub>2</sub> (mL) R2	32	4.527,00	141,47	15,37	236,29	135,19	147,75
CO <sub>2</sub> (mL) R3	26	3.713,50	142,83	15,53	241,04	135,86	149,79

Fonte: A autora.

## APÊNDICE B – TAXAS VOLUMÉTRICAS DE BIOGÁS

Na Tabela B1 é apresentada a taxa volumétrica diária de biogás produzida pelos biodigestores, calculada com base no volume dos reatores e nas amostras de sólidos voláteis de entrada e saída.

Tabela B1 - Taxa volumétrica diária dos biodigestores R1, R2 e R3.

<b>Data</b>	<b>VBiogás R1 (m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>VBiogás R2 (m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>VBiogás R3 (m<sup>3</sup>/dia)</b>
25/04/2024	397,06	776,58	958,44
02/05/2024	440,45	931,75	915,02
09/05/2024	-	1.035,89	1.271,32
16/05/2024	367,88	693,96	874,10
22/05/2024	270,55	728,54	802,51
28/05/2024	263,96	571,66	706,78
04/06/2024	183,34	476,25	477,24
06/06/2024	641,34	1.411,52	1.716,33
12/06/2024	175,81	299,44	388,37
13/06/2024	719,41	1.524,14	1.630,10
18/06/2024	965,59	1.954,62	2.491,25
20/06/2024	416,82	920,35	1.149,39
25/06/2024	476,79	1.038,03	1.298,02
27/06/2024	285,03	662,45	722,48
11/07/2024	803,54	1.667,48	2.047,74

Fonte: A autora.

### APÊNDICE C – *POST HOC DE TUKEY HSD*

Na Tabela C1 e Tabela C4 é possível visualizar a análise *post-hoc* de *Tukey HSD*, mostrando os valores de *p* para as comparações entre os grupos analisados.

Tabela C1 - Comparação *post-hoc* de *Tukey HSD* para ST.

<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Valor <i>p</i></b>
ST fosso	ST R0	0,45
ST fosso	ST R1	<0,01
ST fosso	ST R2	<0,01
ST fosso	ST R3	<0,01
ST R0	ST R1	<0,01
ST R0	ST R2	<0,01
ST R0	ST R3	<0,01
ST R1	ST R2	0,96
ST R1	ST R3	1,00
ST R2	ST R3	0,97

Fonte: A autora.

Tabela C2 - Comparação *post-hoc* de Tukey HSD para SV.

<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Valor <i>p</i></b>
SV fosso	SV R0	0,85
SV fosso	SV R1	<0,01
SV fosso	SV R2	<0,01
SV fosso	SV R3	<0,01
SV R0	SV R1	<0,01
SV R0	SV R2	<0,01
SV R0	SV R3	<0,01
SV R1	SV R2	0,97
SV R1	SV R3	1,00
SV R2	SV R3	0,99

Fonte: A autora.

Tabela C3- Comparação *post-hoc* de Tukey HSD para pH.

<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Valor <i>p</i></b>
pH fosso	pH R0	1,00
pH fosso	pH R1	<0,01
pH fosso	pH R2	<0,01
pH fosso	pH R3	<0,01
pH R0	pH R1	<0,01
pH R0	pH R2	<0,01
pH R0	pH R3	<0,01
pH R1	pH R2	1,00
pH R1	pH R3	1,00
pH R2	pH R3	1,00

Fonte: A autora.

Tabela C4 - Comparação *post-hoc* de Tukey HSD para condutividade.

<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Valor <i>p</i></b>
Ce (mS/cm) fosso	Ce (mS/cm) R0	0,91
Ce (mS/cm) fosso	Ce (mS/cm) R1	<0,01
Ce (mS/cm) fosso	Ce (mS/cm) R2	<0,01
Ce (mS/cm) fosso	Ce (mS/cm) R3	<0,01
Ce (mS/cm) R0	Ce (mS/cm) R1	<0,01
Ce (mS/cm) R0	Ce (mS/cm) R2	<0,01
Ce (mS/cm) R0	Ce (mS/cm) R3	<0,01
Ce (mS/cm) R1	Ce (mS/cm) R2	0,91
Ce (mS/cm) R1	Ce (mS/cm) R3	0,81
Ce (mS/cm) R2	Ce (mS/cm) R3	1,00

Fonte: A autora.