

# **ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE UM BIODIGESTOR TIPO LAGOA COBERTA EM ESCALA LABORATORIAL, UTILIZANDO CARÇAÇAS SUÍNAS COMO SUBSTRATO**

Rafaela Faust Meyer\*  
Rodrigo Monteiro Eliott\*\*

## **RESUMO**

Foi analisado neste trabalho, a viabilidade técnica do uso de carcaças suínas, como substrato para biodigestores tipo lagoa coberta (BLC), analisando o potencial de produção de biogás e os limites operacionais do sistema. Foi avaliada uma mistura de efluente de suinocultura e carcaça suína desidratada, operando em duas condições distintas de sólidos totais (ST): uma próxima a 3% e outra acima de 4%. Foram avaliados, os principais parâmetros como volume de produção de biogás, concentração de metano, carga orgânica volumétrica (COV) e estabilidade do processo através do indicador FOS/TAC. Com os resultados de volume de biogás produzido, rendimento da operação e concentração de metano obtidos, foi demonstrado que o aumento do teor de ST no substrato de alimentação reduziu a eficiência da produção de biogás e qualidade do biogás, validando o limite tecnológico de 3% para reatores de lagoa coberta.

Palavras-chave: resíduos; matriz energética; biogás; suinocultura; biodigestor tipo lagoa coberta.

## **RESUMEN**

En este trabajo se analizó la viabilidad técnica del uso de carcasas porcinas como sustrato para biodigestores tipo laguna cubierta (BLC), analizando el potencial de producción de biogás y los límites operacionales del sistema. A través de una mezcla de efluente porcino y carcasa porcina deshidratada, operando en dos condiciones distintas de sólidos totales (ST): una cercana al 3% y otra por encima del 4%. Se evaluaron los principales parámetros como volumen de producción de biogás, concentración de metano, carga orgánica volumétrica (COV) y estabilidad del proceso a través del indicador FOS/TAC. Con los resultados del volumen de biogás producido, rendimiento de la operación y concentración de metano obtenidos, se demostró que el aumento del contenido de ST en el sustrato de alimentación redujo la eficiencia de la producción de biogás y la calidad del biogás, validando el límite tecnológico del 3% para reactores de laguna cubierta.

## **1 INTRODUÇÃO**

A demanda global por energia limpa tem aumentado significativamente nas últimas décadas, devido ao crescimento populacional, desenvolvimento econômico, aumento do consumo per capita e principalmente para minimizar os impactos climáticos causados pela constatare emissão de poluentes ocasionado pelo consumo de combustíveis fósseis não renováveis. Isso exige a necessidade de diversificar a matriz energética, buscando alternativas

---

\* Universidade Federal da Integração Latinoamericana – Engenharia de Energia

\*\* Orientador

mais sustentáveis e ambientalmente amigáveis, como o aproveitamento de resíduos para geração de energia. Nesse cenário, se destaca a exploração de técnicas de aproveitamento de resíduos como os processos utilizados para obtenção do biogás, este combustível renovável é gerado pela digestão anaeróbia da matéria orgânica, como os resíduos provenientes da suinocultura, que apresentam alto potencial para conversão em energia.

A suinocultura brasileira abrange um expressivo número de alojamento de matrizes, totalizando 2.067.749 animais (1). Essa atividade desempenha um papel fundamental na economia do país, ocupando o 4º lugar tanto em termos de produção como de exportação. No entanto, a produção de suínos também está associada a desafios, como o índice de mortalidade de animais em locais de criação para comercialização, que tem média de 6% ao ano (2). Nesse sentido, o aproveitamento dos resíduos da suinocultura para a produção de biogás se mostra uma alternativa promissora. A utilização desses resíduos como substrato para a digestão anaeróbia, em um processo que degrada a matéria orgânica e produz biogás, pode trazer benefícios do ponto de vista ambiental e econômico. A geração de biogás a partir de resíduos reduz a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas, além de gerar energia renovável e promover a diversificação da matriz energética.

Devido às limitações ambientais, o descarte adequado dos resíduos gerados no processo de alimentação, cuidados e abates destes animais se tornam difíceis e custosos, pois o transporte e descarte destes resíduos deve ser realizado por veículo e equipe especializada (3). Além disso, o substrato apresenta grande potencial de produção de biogás em um processo de biodigestão visto que sua composição é predominantemente proteína.

Mierlo (4) apresenta evidências de redução do impacto ambiental ao utilizar proteína animal em um biodigestor, além de apresentar economia nos gastos de energia elétrica, visto que parte da energia elétrica passou a ser gerada a partir da produção de biogás. Ricardo et al (5) afirmam que a implantação de um sistema de tratamento de resíduos da suinocultura a partir de biodigestores tubulares se mostra atrativa economicamente, além da possibilidade de venda de energia elétrica criar um cenário favorável em aspectos econômicos, ambientais, sociais e agrônômicos.

Silva (6) testou a operação de reatores de bancada, no modelo CSTR e BLC, com utilização de dejetos suíno e carcaça hidrolisada como substrato de alimentação, com incremento de carcaça suína hidrolisada em uma proporção de até 114,8 kg de carcaça por m<sup>3</sup> de dejetos sem prejudicar a produção de biogás no reator tipo BLC.

Esses resultados destacam a viabilidade da utilização destes resíduos como fonte de alimentação de biodigestores para geração de biogás. Portanto neste trabalho é apresentado o estudo de viabilidade técnica do uso de carcaças suínas como substrato para operação de um biodigestor tipo lagoa coberta (BLC) a partir da análise de dados obtidos na operação de um biodigestor de bancada, a fim de validar o limite tecnológico de operação.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 BIODIGESTOR TIPO LAGOA COBERTA**

Kunz et al (7) afirmam que a seleção do modelo do biodigestor é o ponto central do sistema anaeróbio e que esse deve ser escolhido de acordo com o substrato a ser tratado, nível de investimento e condições ambientais. O BLC é um modelo amplamente utilizado no meio rural, para tratamento de efluentes de animais. Devido à extensa utilização de efluente de suinocultura para a produção de biogás, é conveniente destinar a carcaça no mesmo equipamento que já está instalado na propriedade.

O biodigestor de lagoa coberta é um tanque escavado no solo, que é impermeabilizado e coberto com material geossintético caracterizado pela baixa permeabilidade a fluidos, e suficientemente flexível para acumular biogás (Figura 1) (7). Esse tipo de biodigestor é considerado de baixo nível tecnológico, sendo fácil de construir e operar, além de apresentar baixo custo de implantação. Em geral, o equipamento não possui sistema de aquecimento nem de agitação, mas é comum que a recirculação do efluente por meio de uma tubulação lateral seja realizada. Devido à sua estrutura simplificada, esse modelo tem um limite de operação de 3% de Sólidos Totais (ST), enquanto outros modelos podem suportar até 12% ST (7).

Figura 1 Biodigestor tipo Lagoa coberta



Fonte: Acervo CIBiogás.

## 2.2 AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO BIODIGESTOR

Para otimizar a produção de biogás a partir do substrato, é necessário monitorar alguns parâmetros de operação do biodigestor. Segundo DROSG (8), os principais parâmetros de caracterização do processo são: Quantidade e composição do substrato, produção de biogás e composição do gás, temperatura, relação FOS/TAC, entre outros. Deste modo, estes parâmetros foram selecionados para o acompanhamento e controle da operação durante os ensaios.

O uso de métodos padronizados descritos no *Standard Methods for Examination of Water & Wastewater (SMEWW)* (9) é amplamente reconhecido e adotado para análise da qualidade da água e águas residuais. Essa publicação fornece uma série de métodos analíticos padronizados para determinar parâmetros de interesse, garantindo a consistência e a confiabilidade dos resultados obtidos. Os parâmetros monitorados são determinados conforme os métodos do Laboratório de Biogás e para o acompanhamento deste teste utilizou-se mesmo padrão.

O método 2540 (SMEWW) trata da análise de sólidos presentes em uma amostra e é utilizado para determinar a composição do substrato. Essa análise é importante no contexto da digestão anaeróbia, pois a presença de sólidos no material pode afetar negativamente o desempenho dos sistemas. O acúmulo excessivo de sólidos pode causar problemas de agitação e mistura nos reatores de biogás. No contexto da análise de sólidos, é relevante compreender o conceito de sólidos totais, que se refere à quantidade de matéria sólida presente na amostra em

questão. No entanto, é especialmente importante destacar os sólidos voláteis na composição dos sólidos totais, pois eles representam a quantidade de matéria orgânica presente na amostra, que é a fonte principal para a produção de biogás durante a digestão anaeróbia (8).

O método 2320 (SMEWW) avalia a alcalinidade, essencial para manter o equilíbrio de pH nos sistemas de digestão anaeróbia, garantindo condições para a atividade microbiana e a produção de biogás. Ela previne a inibição por acidificação, ao neutralizar o efeito do ácido por meio do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), bicarbonatos e carbonatos. Segundo Kunz et al (7) o monitoramento é feito pela razão AI/AP (Alcalinidade Intermediária/Alcalinidade Parcial) sendo AI relacionada a bicarbonatos e AP a ácidos voláteis, permitindo controle eficiente do sistema. Conforme apresentado na Tabela 1, o monitoramento da relação AI/AP auxilia no acompanhamento de carga de operação do biodigestor. O maior aproveitamento do substrato e do seu potencial de produção de biogás ocorre na faixa ótima. Quando o biodigestor está operando abaixo da capacidade ideal, ou seja, em subcarga, significa que ele poderia receber uma maior quantidade de substrato na alimentação e potencialmente aumentar a produção de biogás. Por outro lado, quando o biodigestor está em sobrecarga, significa que está recebendo uma quantidade excessiva de substratos além do que o sistema é capaz de lidar. Esse desequilíbrio pode resultar em uma digestão incompleta do substrato, e o digestato resultante terá um potencial de produção de biogás não aproveitado. Segundo DROSG (8), essa relação também é denominada FOS/TAC.

*Tabela 1 Valores controle para a relação FOS/TAC*

< 0,3	Geralmente considerado processo estável
0,3 – 0,8	Valores máximos de limite reportados em literatura para faixa estável.
> 0,8	Instabilidade do processo

*Fonte: Adaptada - DROSG (8).*

Para a determinação do Potencial Bioquímico de Metano (PBM), são seguidos os padrões e métodos descritos na norma alemã VDI 4630 (10). Essa norma tem como objetivo fornece diretrizes e procedimentos para a análise e caracterização dos substratos utilizados na produção de biogás. Segundo Kunz et al (7), essa norma é resultado de um aperfeiçoamento da norma DIN 38414-8 e além de ser amplamente utilizada para determinação do PBM, também é utilizada como referência para simulação de processos em escala de bancada, auxiliando na operação de plantas de produção de biogás em grande escala.

Zeferino (11) descreve o biogás como uma fonte promissora de energia, de acordo com o Panorama do Biogás 2023 (12), 17% do substrato disponível é de fonte agropecuária sendo responsável por 80% das plantas instaladas e por 20% do volume de produção de biogás, equivalente a 809 milhões de m<sup>3</sup> normalizado. Além disso, o biogás pode ser usado para calefação e como combustível veicular, após passar por um processo de beneficiamento para aumentar a concentração de metano. O autor também destaca as diversas aplicações do biogás em instalações rurais, como fonte de energia para aquecimento e movimentação mecânica, o que pode reduzir custos e evitar o descarte inadequado de resíduos.

### 2.3 PRÉ TRATAMENTO DE CARCAÇAS SUÍNAS

Tápparo et al (13) afirmam que os resíduos de origem animal são considerados excelentes substratos para a produção de biogás, pois são ricos em proteínas e lipídios. No entanto, a degradação destes resíduos pode ser instável devido à alta produção de compostos como ácidos orgânicos voláteis, ácidos de cadeia longa e o nitrogênio amoniacal. Para diminuir

o nível de instabilidade no processo, é recomendado que o resíduo seja utilizado em codigestão com outro substrato.

No Comunicado Técnico 579 publicado pela EMBRAPA (2), é apresentado que a codigestão dos dois resíduos advindos da suinocultura, como dejetos e carcaças animais, é uma excelente alternativa. Nesse sentido, os dejetos podem contribuir com a diluição de compostos produzidos durante a decomposição das carcaças.

Para que a digestão anaeróbia de carcaças de suínos como co-substrato funcione de maneira apropriada, o projeto e a operação do sistema devem garantir a degradação adequada dos resíduos. Sem o devido tratamento, os resíduos da produção animal podem conter mais de 150 tipos de patógenos geradores de zoonoses segundo a Nota Técnica publicada pela UNIDO (14). O Ministério da Agricultura (15) realiza a inspeção de *Salmonella* spp. em abatedores suínos, e cerca de 5,4% das amostras analisadas resultam positivas para a presença do patógeno. Para garantir a salubridade ambiental na cadeia produtiva, é recomendado o tratamento térmico (pasteurização) ou a desidratação das carcaças antes da digestão anaeróbia. Nesse processo, os patógenos são inativados e o volume de material é reduzido, sem a necessidade de queima ou incineração das carcaças.

A Nota Técnica (14) recomenda o tratamento térmico com uma temperatura mínima de 70°C por período de duas horas para a sanitização. Já o processo de desidratação requer um período de aproximadamente 5 horas, dependendo do tamanho do animal (16). Estima-se que durante o processo de tratamento térmico ocorra uma redução de 60 a 80% do volume por conta da perda de água, esta redução beneficia os custos de transporte do resíduo.

Conforme Kunz et al (2), a temperatura desempenha um papel importante na inativação de patógenos. Kunz et al também apresentam a relação carcaça/dejeto e afirmam que esta é limitada a 15  $[\text{kg}_{\text{carc}}/\text{m}^3_{\text{dej}}]$  para reatores do tipo lagoa coberta, critério ao qual norteou a definição da proporção entre os substratos utilizados.

### 3 METODOLOGIA

A Central de Bioenergia de Toledo (CBT) foi construída em um terreno de 55,3 mil metros quadrados, doados pela Prefeitura do Município de Toledo, e conta com três biodigestores com capacidade para processar 9,5 mil metros cúbicos de dejetos (17). O presente trabalho visou simular, no Laboratório de Biogás do CIBiogás, a operação de um biodigestor de bancada, que simula a operação de um biodigestor de lagoa coberta em escala reduzida, com volume operacional de 10 litros. O propósito da simulação foi operar o biodigestor aclimatado nas condições de operação do biodigestor da Central de Bioenergia de Toledo, para validação do uso dos resíduos na unidade.

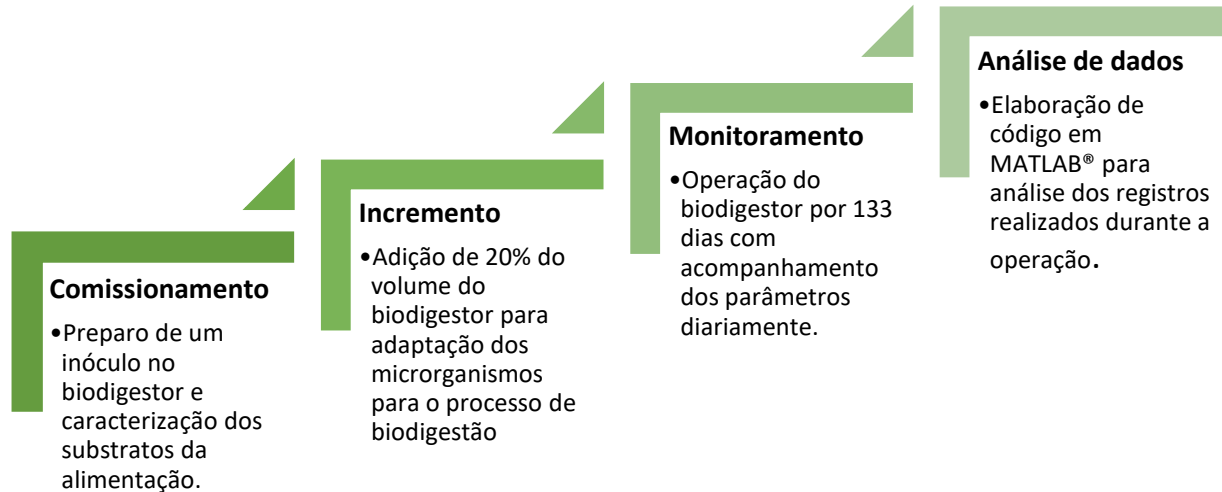
A fim de testar melhor desempenho e maior aproveitamento dos resíduos na Central de Bioenergia de Toledo, o volume testado dos substratos foi determinado a partir da disponibilidade dos substratos, resultado em uma relação de 20  $[\text{kg}_{\text{carc}}/\text{m}^3_{\text{dej}}]$ . Segundo Kunz et al, a relação (de 15  $[\text{kg}_{\text{carc}}/\text{m}^3_{\text{dej}}]$  indicada anteriormente) é maior para reatores do tipo CSTR, porém os autores justificam o valor do limitante devido à falta de aquecimento (normalmente operando em temperatura psicrófila) e pouca agitação a que os reatores tipo lagoa coberta são submetidos. Visto que o equipamento utilizado para a operação foi um modelo de bancada com aquecimento e agitação e o ensaio foi realizado no Laboratório de Biogás que possui condições controladas, aquecimento e agitação, a relação de 20  $[\text{kg}_{\text{carc}}/\text{m}^3_{\text{dej}}]$  foi mantida para o teste e foi utilizado o parâmetro de FOS/TAC para acompanhamento e determinação da necessidade de redução da relação, caso fossem observadas instabilidades na operação.

A temperatura de operação do biodigestor foi a mesofílica, pois, esta é a temperatura em que é realizado o teste de PBM no Laboratório de Biogás e para manter um dado

comparativo sem influência da temperatura, manteve-se a mesma. O sistema de agitação do equipamento utilizado é realizado por bomba peristáltica e pode ser programado, para esta operação considerou-se a agitação de 10 minutos a cada intervalo de 1 hora. O tempo de retenção hidráulica (TRH) simulado foi de 20 dias, considerando o TRH projetado para a CBT.

A metodologia do trabalho consistiu em 4 principais etapas, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 Fluxograma das etapas do trabalho



A metodologia proposta, utilizando as normas técnicas apresentadas anteriormente, envolveu o comissionamento do biodigestor de bancada utilizado (apresentado na Figura 3), que consistiu no preparo de um inóculo no biodigestor. Para isso, o volume do biodigestor foi preenchido com efluente de suinocultura. Após este preenchimento, o biodigestor foi mantido, em batelada, nas condições de operação, ou seja, sob aquecimento na faixa de temperatura mesofílica ( $37^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ), por 10 dias.

Figura 3: Reator de bancada tipo BLC



Fonte: Acervo CIBiogs.

Como substratos de alimentação foram utilizados efluente de suinocultura e carcaça suína. A escolha do pré-tratamento se deu pelo benefício de maior redução de volume, para gerar economia no transporte do resíduo. Portanto, foi utilizada a carcaça suína desidratada, processo pelo qual o substrato é aquecido até completa eliminação da água e a formação de um farelo, visto que esta condição oferece menores custos de logística, uma vez que a água é eliminada antes do transporte.

Para determinar a caracterização dos sólidos totais, fixos e voláteis (ST, SF e SV) de ambos os substratos utilizados na dieta do reator, foi utilizado o método 2540 (SMWW) e considerando o quantitativo de massa disponibilizado para alimentação diária, determinou-se o teor ST (kg) de cada um dos substratos adicionado diariamente no biodigestor, conforme Equações 1 e 2.

$$ST_{efluente}(kg) = Massa \left( \frac{kg}{dia} \right) * ST(\%) * 100 \quad 1$$

$$ST_{carcaça}(kg) = Massa \left( \frac{kg}{dia} \right) * ST(\%) * 100 \quad 2$$

A massa da codigestão utilizada durante a alimentação foi determinada pela soma dos teores definidos anteriormente, conforme Equação 3.

$$ST_{codigestão}(kg) = ST_{efluente}(kg) + ST_{carcaça}(kg) \quad 3$$

A segunda etapa envolveu o incremento de substrato no biodigestor, em quantidade equivalente a 20% do volume do biodigestor, composto pela mistura de efluente de suinocultura e carcaça suína. Após essa manobra o biodigestor teve suas condições de operação mantidas em batelada por mais 10 dias de adaptação. Esse processo permite que as bactérias presentes no inóculo se adaptem à mistura que será utilizada como alimentação, evitando perturbações no sistema.

Durante a etapa de operação e monitoramento do biodigestor, foram simuladas duas condições de  $ST_{codigestão}$  (%) de alimentação. Na primeira condição, o  $ST_{codigestão}$  (%) resultou próximo a 3% (Equação 4) e na segunda condição, o  $ST_{codigestão}$  (%) foi maior, acima de 4%.

$$ST_{codigestão}(\%) = ST_{efluente}(\%) + ST_{carcaça}(\%) \quad 4$$

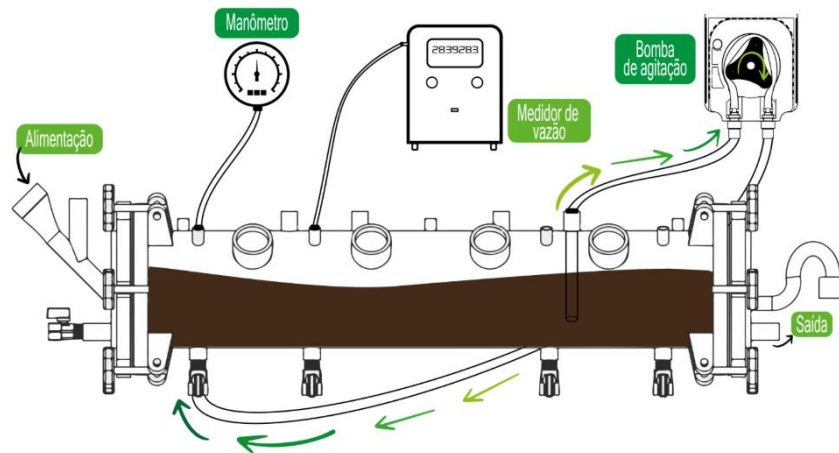
Em ambas condições se considerou o mesmo volume total diário, entretanto, utilizou-se efluente de suinocultura com maior teor de ST (%) na segunda condição, aumentando assim, o  $ST_{codigestão}$  (%). Para realizar esta variação de ST (%) foram coletados efluentes de suinocultura em propriedades diferentes, a fim de obter características físico-químicas diferentes devido ao manejo realizado pelo proprietário (com maior taxa de água, ou menor).

Os parâmetros mais influentes na produção de biogás são a concentração de metano e FOS/TAC, cada um destes parâmetros foi monitorado ao longo da operação. A temperatura foi controlada de forma automática a partir de controlador instalado no sistema de aquecimento.

A agitação, além de realizada de forma hidráulica como comentado anteriormente, foi realizada de forma manual, através da recirculação do substrato. A recirculação foi realizada diariamente de forma manual, por meio da retirada de dois litros de efluente que foram reintroduzidos na extremidade oposta do reator, simulando a recirculação de um sistema BLC real, onde a recirculação acontece por tubulação lateral.

Na Figura 4 pode ser observado o esquema de operação do biodigestor utilizado na pesquisa, com a identificação de ponto de retirada de efluente e inserção de alimentação e material recirculado, bem como pontos de conexão das mangueiras para agitação hidráulica. Os dados de produção de biogás foram obtidos a partir de um medidor de vazão acoplado ao biodigestor, enquanto que a composição do biogás foi determinada a partir de um analisador portátil calibrado.

Figura 4 Esquema de alimentação do Biodigestor de Bancada



Fonte: Acervo CIBiogás.

Por fim, os resultados gerados durante a operação foram compilados em uma planilha e um código de MATLAB® foi elaborado para avaliação desses parâmetros e comparados com os dados de produção de biogás.

Para determinação do potencial de produção de biogás da codigestão utilizada foi realizado o ensaio de PBM, na mesma proporção determinada para alimentação do biodigestor. Esse ensaio (PBM) foi realizado de acordo com as informações descritas na norma alemã VDI 4630 (10) e metodologia de execução do Laboratório de Biogás. O ensaio de PBM foi realizado em temperatura mesofílica ( $37,0 \pm 2,0$  °C) em sistema de batelada, utilizando um inóculo previamente produzido e condicionado no laboratório. O inóculo, proveniente do Laboratório de Biogás, consiste em um lodo rico em microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica dos substratos. Ele é mantido em um reator anaeróbico de mistura completa e tem como base efluente de suinocultura e dejetos de bovinocultura, sendo suplementado com uma dieta equilibrada de carboidratos, proteínas e lipídios.

O valor de produção de biogás registrado no PBM, em  $L_{\text{biogás}}/kgs_v$ , foi utilizado para estimar o volume de biogás que seria produzido durante a operação do biodigestor de bancada a partir da quantidade de  $kgs_v$  adicionado. Tendo estes valores, estimado e produzido, foi determinada a eficiência da operação. Para que a análise apresente valores mais confiáveis e representativos foi realizada a correção do volume para as condições CNTP.

Para melhor comparação de dados médios diários durante a operação, o volume corrigido em 24h também pode ser utilizado, a fim de desconsiderar picos causados pela ausência de registro em finais de semana, ou em horários diferentes. Esta produção foi determinada a partir da Equação 5.

$$\text{Produção em 24h} \left( \frac{L}{\text{dia}} \right) = \frac{\text{Volume registrado (L)}}{\text{Intervalo entre registros (h)}} * 24h \quad 5$$

A partir do volume de produção de biogás e metano obtido da operação do biodigestor, foram avaliados a eficiência média em cada condição, bem como a produção diária de biogás e concentração diária para observação de tendências. A análise de eficiência em consideração a produção de biogás estimada a partir dos resultados obtidos no PBM dos substratos.

A eficiência de produção diária pode ser calculada de acordo com a Equação 6, enquanto que a eficiência média é calculada a partir do volume acumulado produzido em determinada condição em função do volume esperado a partir da quantidade de matéria orgânica adicionada no biodigestor, conforme a Equação 7.

$$\text{Eficiência diária (\%)} = \frac{\text{produção registrada diária}}{(PBM * \text{Vazão de SV})} \quad 6$$

$$\text{Eficiência média (\%)} = \frac{\text{produção acumulada na condição}}{(PBM * \sum \text{Vazão de SV})} \quad 7$$

A fim de quantificar o potencial energético do biogás gerado durante o teste, foi realizado o cálculo do poder calorífico inferior, a partir da Equação 8, fornecida por (11) e para isso, utilizou-se a concentração média de metano obtida em cada condição.

$$PCI_B = (\%CH_4) \times \rho_{CH_4}(0,72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}) \times PCI_{CH_4}(50.000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad 8$$

#### 4 RESULTADOS OBTIDOS

Para determinação das características físico-químicas iniciais do substrato utilizado, foram obtidos os resultados médios apresentados na Tabela 2.

*Tabela 2 Caracterização físico-química inicial*

<b>Amostra</b>	<b>ST (%)</b>	<b>SV (%)</b>
Efluente de suinocultura 1	1,95	70,17
Carcaça suína	52,54	95,39
Efluente de suinocultura 2	3,45	73,56

Considerando o teor de ST na carcaça suína separadamente, a operação do biodigestor se tornaria inviável, visto que o limite tecnológico de um modelo tipo Lagoa coberta é de 3%, conforme citado anteriormente. Portanto, utilizou-se efluente de suinocultura como substrato diluente, em uma proporção adequada para a operação dentro dos limites a serem testados.

Ambos efluentes foram coletados em propriedades fornecedoras deste material na Central de Bioenergia de Toledo. A fim de variar as condições físico-químicas, o efluente de suinocultura 1 foi utilizado na condição 1 e o efluente de suinocultura 2 foi utilizado na condição 2. A proporção de carcaça com o efluente de suinocultura 1 (até a codigestão atingir 3% de ST) foi utilizada na condição 2.

A proporção dos substratos foi determinada a partir da disponibilidade do efluente de suinocultura na unidade utilizada como base (CBT) e foi mantida durante todo o período. Os valores determinados podem ser observados na Tabela 3.

*Tabela 3: Disponibilidade dos substratos*

<b>Amostra</b>	<b>Disponibilidade de material (ton./dia)</b>	<b>Proporção</b>
Efluente de suinocultura	350	98,04%
Carcaça suína	7	1,96%

Foram realizados testes em duas principais condições, a fim de avaliar o real limite tecnológico do modelo de biodigestor utilizado. Na primeira condição, a codigestão foi realizada com o valor de ST próximo a 3%, enquanto na segunda condição os testes foram realizados com teor de ST total acima de 4%. As características físico-químicas para cada efluente preparado nessas condições pré-definidas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Característica físico-química dos substratos

Condição	Amostra	ST (%)	SV (%) em base úmida
1	Efluente de suinocultura 1	2,94%	2,32%
	Carcaça suína		
2	Efluente de suinocultura 2	4,41%	3,47%
	Carcaça suína		

A melhor condição entre as testadas foi determinada a partir do rendimento da operação, comparando variação de ST do substrato de alimentação e a produção de biogás obtida. O resultado de potencial de produção de biogás, obtido a partir do PBM foi de 638 L<sub>biogás</sub>/ kg<sub>SV</sub> e 469 L<sub>metano</sub>/ kg<sub>SV</sub>, estes potenciais foram os valores obtidos para o cálculo de produção de biogás estimada.

Para obtenção dos resultados, foram compilados os dados obtidos a partir das duas condições apresentadas, totalizando 133 dias de operação, onde 10 dias não houve adição de substrato (período de inoculação), 72 dias a alimentação foi equivalente à condição 1 e 51 dias a alimentação foi equivalente à condição 2. Durante toda a operação foram tomados dados diários, com exceção à finais de semana e feriados. Na Tabela 5 estão apresentados os valores obtidos nos testes de ambas as condições. Após o aumento do teor de ST presente no substrato de alimentação, observou-se redução no volume de produção de biogás, em comparação com o volume esperado. Adicionalmente, observou-se redução na qualidade do metano, o que indica menor eficiência no processo de biodigestão, principalmente na etapa de metanogênese.

Tabela 5: Volumes médios de produção de biogás e metano e eficiência da operação

Condição	COV (kg SV/m <sup>3</sup> .dia)	Média de volume de biogás (L)	Média de volume de metano (L)	Eficiência de produção de biogás (%)
1	2,32	9,8859 ± 1,8544	6,6614 ± 1,316	66,79
2	3,34	12,583 ± 0,73414	8,2195 ± 0,7138	59,772

Observou-se que, o aumento do teor de ST utilizado no substrato de alimentação causou redução na eficiência da produção de biogás, o que valida o limite tecnológico de 3% de operação para um reator tipo lagoa coberta.

Durante o acompanhamento do rendimento diário de cada teste (Figura 5) foi possível observar um comportamento similar (o pico da curva é caracterizado pelo registro em segundas-feiras, visto no domingo não havia registro e o volume era acumulado) por este motivo, o rendimento acumulado é mais representativo para análise (Figura 6).

Figura 5 Produção de Biogás diária e concentração de Metano

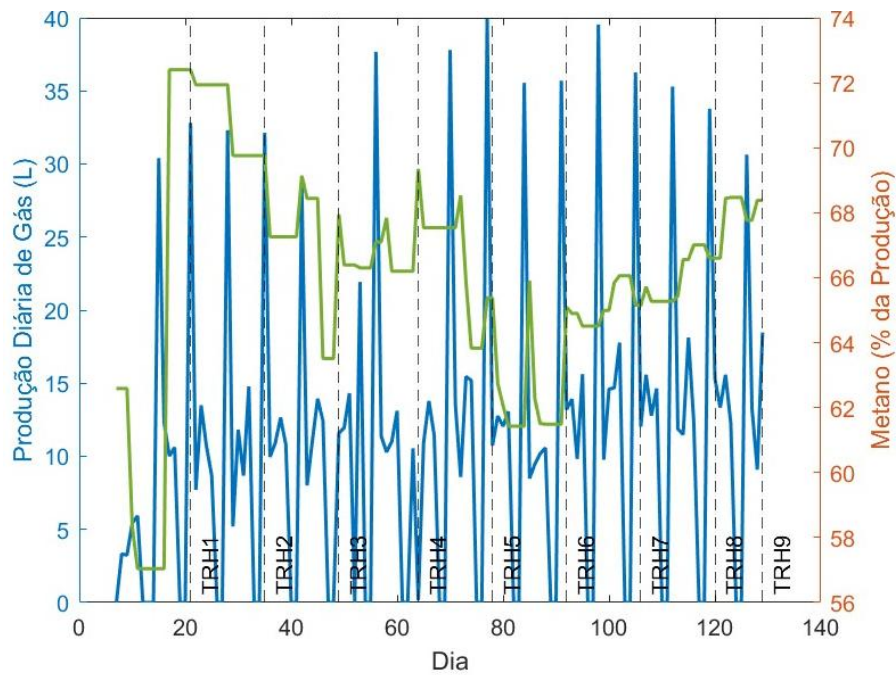
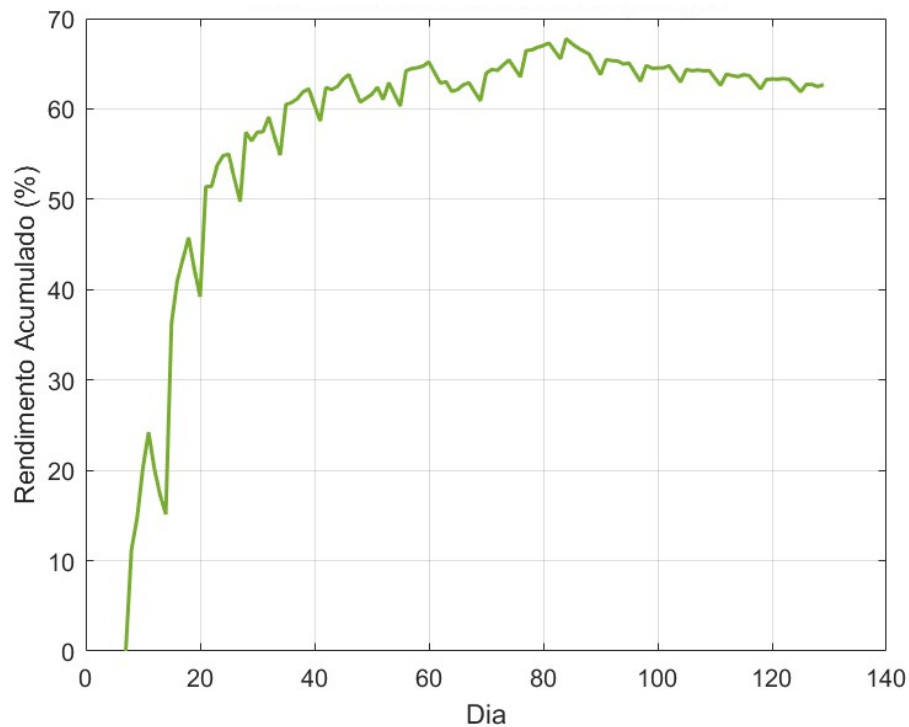
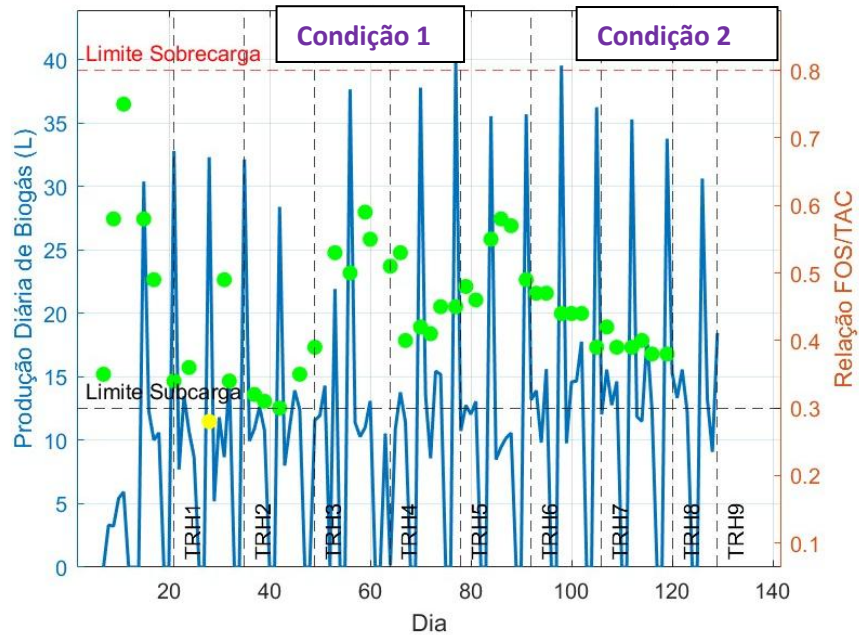


Figura 6 Rendimento de Biogás acumulado



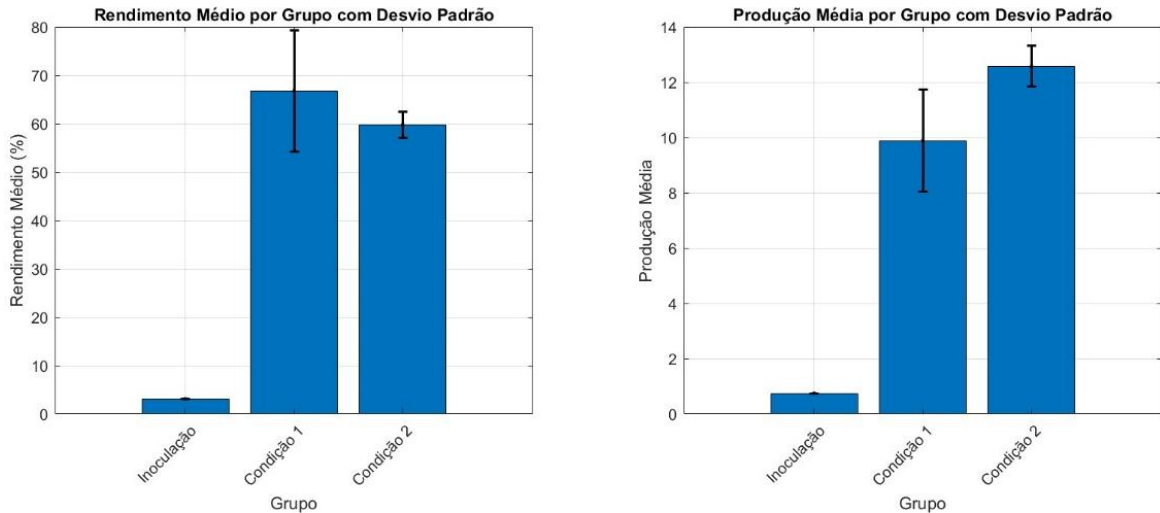
O FOS/TAC não apontou sobrecarga durante a operação, como mostra a Figura 7, o que evidencia que o efluente ainda possuía capacidade de tamponamento e consumo da matéria orgânica, entretanto a redução do rendimento na segunda condição pode ter sido causada devido à maior dificuldade dos microrganismos acessarem o material, causada por acúmulo de sedimentos e/ou formação de zonas mortas.

Figura 7 Monitoramento de FOS/TAC



O volume de produção de biogás obtido na condição 2 foi maior do que da condição 1, conforme Figura 8, entretanto, quando comparados os rendimentos, observa-se redução de cerca de 7%. Apesar do volume ter sido superior, o aumento de carga orgânica foi ainda maior, o que torna a produção esperada maior do que a obtida e por isso, resultou em menor rendimento.

Figura 8 Análise de Rendimento e Produção por condição.



A última etapa de análise consistiu na realização do cálculo do poder calorífico do biogás a fim de avaliar se houve melhora ou piora entre uma condição e outra. Na Tabela 6 estão apresentados os valores de concentração média de metano e PCI do Biogás para cada condição testada.

Tabela 6 Concentração média de metano e PCI do Biogás.

Condição	Concentração média de metano (%)	PCI do Biogás (kJ/m <sup>3</sup> )
1	66,79 %	24.043,20
2	65,15%	23.452,71

Pode-se observar que o poder calorífico do biogás na primeira condição foi melhor, visto que este fator depende diretamente da concentração de metano presente no gás e esse resultado também foi superior na primeira condição (variando de 66,79% a 65,15%).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo comprovou a viabilidade técnica do uso de carcaças suínas como substrato para produção de biogás em biodigestores tipo lagoa coberta, especialmente quando combinadas com efluentes de suinocultura.

Foi possível verificar o limite tecnológico de 3% de sólidos totais para biodigestores de lagoa coberta quando utilizada a codigestão de resíduos de suinocultura. Esse limite foi evidenciado a partir da redução da eficiência de produção de biogás (de 66,79% para 59,77%) e diminuição da quantidade do metano produzido quando o teor de sólidos totais foi aumentado, mostrando uma possível dificuldade dos microrganismos em acessar o material.

O método proposto oferece uma solução sustentável para o descarte de carcaças suínas, reduzindo impactos ambientais e gerando energia renovável, bem como uma possível opção para a redução de patógenos presentes neste tipo de resíduo.

Para melhor análise é importante investigar estratégias de pré-tratamento para melhorar a acessibilidade do substrato aos microrganismos, testar diferentes proporções de mistura entre carcaça e efluente, avaliar técnicas para manter a eficiência em cargas orgânicas mais elevadas e investigar a presença de patógenos no substrato e sua redução após a biodigestão.

## 6 AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Laboratório de Biogás do CIBiogás por me proporcionar a oportunidade de realizar os testes necessários para este trabalho de conclusão de curso em suas instalações. Agradeço imensamente a toda a equipe do laboratório pela atenção e apoio técnico durante a execução dos experimentos.

Agradeço também ao professor Rodrigo Monteiro Elliott, pela orientação e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Gostaria de agradecer também ao Delman Lopes Cardeli Junior, pela ajuda, suporte e parceria não só durante a realização deste trabalho, mas também durante toda a graduação, você é perfeito.

Por fim, gostaria de agradecer a UNILA, por me proporcionar a oportunidade de realizar este trabalho de conclusão de curso.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABPA. **RELATÓRIO ANUAL 2023**. [s.l: s.n.].
- [2] KUNZ, A. et al. **Considerações técnicas sobre o uso de carcaças de animais mortos não abatidos em processos de digestão**. Concórdia,SC: [s.n.].
- [3] BARROS, E. C.; NICOLOSO, R. DA S. **Manual de dimensionamento e manejo de unidades de compostagem de animais mortos para granjas de suínos e aves - Documentos 203Embrapa Suínos e Aves**. Concórdia: [s.n.].

- [4] MIERLO, K. G. VAN. **AVALIAÇÃO AMBIENTAL E DE INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS ECONÔMICAS NA CADEIA PRODUTIVA DE PROTEÍNA SUÍNA COM A INCLUSÃO DE BIODIGESTORES**. Ponta Grossa: [s.n.].
- [5] RICARDO, C. M. et al. **AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE TRAMENTO DE RESÍDUOS DA SUINOCULTURA CONTENDO BIODIGESTORES TUBULARES**. **REVISTA ENGENHARIA NA AGRICULTURA - REVENG**, v. 26, n. 6, p. 516–525, 19 dez. 2018.
- [6] SILVA, J. F. F. **CODIGESTÃO DE DEJETO SUÍNO E CARÇAÇA SUÍNA HIDROLISADA**. CASCAVEL-PR: [s.n.].
- [7] KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA, PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS, USO E TRATAMENTO DO DIGESTATO**. [s.l: s.n.].
- [8] DROSG, B. **Process monitoring in biogas plants**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/261070596>>.
- [9] C. LIPPS, WI.; BRAUN-HOWLAN, E. B.; BAXTER, T. E. **Standard Methods for Examination of Water & Wastewater**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.standardmethods.org/>>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- [10] REGENERATIVE ENERGIEN, F. **VDI 4630- Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche**. Düsseldorf: [s.n.].
- [11] JÚNIOR, Z. A. M. **Análise das propriedades do biogás produzido através de diferentes substratos provenientes do mercado grossista do Zimpeto**. Maputo: [s.n.].
- [12] CIBIOGÁS. **PANORAMA DO BIOGÁS NO BRASIL 2023. Relatório Técnico nº 001/2024**Foz do IguaçuCentro Internacional de Energias Renováveis - Biogás, , 2024.
- [13] TÁPPARO, D. C. et al. **PROCESS PERFORMANCE OF SWINE CARCASS AND MANURE CO-DIGESTION IN COMPARING OF MANURE MONO-DIGESTION: IMPACT OF ORGANIC LOADING RATE**. Florianópolis: [s.n.].
- [14] GEF BIOGAS BRASIL. **Nota Técnica: Manejo de carcaças suínas: aproveitamento por meio da digestão anaeróbia**. [s.l: s.n.].
- [15] Anuário dos Programas de Controle de Alimentos de Origem Animal do DIPOA. **Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA)**, v. 9, 2023.
- [16] USO de desidratador é opção para manejo de carcaças na propriedade rural: Redução em perda de água dos animais mortos pode chegar a 80%. **Revista Copagril, ano 15, ed 114**, fev. 2020.
- [17] IMPRENSA/ITAIPU BINACIONAL. Toledo (PR) ganha Central de Bioenergia movida a dejetos/ da suinocultura. 13 out. 2023.