

AValiação da Produção de Biogás por Meio da Co-digestão de Lodo Sanitário, Resíduos de Frutas e Verdura, Resíduos de Peixe e Outros Resíduos Orgânicos em Escala Plena

Thiago Marendra Rosa de Lima ⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Especialista em Tecnologia da Cadeia Produtiva de Biogás pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial pela Universidade Federal do Paraná (PPGMAUI/UFPR). Supervisor de Qualidade em Planta de Biogás com Co-digestão de Resíduos Orgânicos e Lodo Sanitário pela Rotaria do Brasil e mais de 9 anos de experiência em Tratamento de Efluentes pela Sanepar.

Carolina Bayer Gomes Cabral ⁽²⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEA/UFSC). Doutoranda em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlin (TU Berlin). Diretora do setor de consultoria e projetos especiais da Rotária do Brasil

Aretha Rodrigues Fiore ⁽³⁾

Técnica em Química com 23 anos de experiência na área de Saneamento

Maria Natalia da Silva ⁽⁴⁾

Graduanda em Engenharia Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Estagiária da Rotária do Brasil.

Orlando Antônio Duarte Hernández ⁽⁵⁾

Engenheiro Industrial pela Universidade Nacional Experimental do Táchira, Venezuela, Mestre em Gestão e Auditorias Ambientais, Universidade Europeia Miguel de Cervantes (UEMC), Espanha. Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Endereço⁽¹⁾: Rua Teodoro Manoel Dias, 421 – Santo Antônio de Lisboa - Florianópolis - SC - CEP: 88050-540 - Brasil - Tel: (48) 3234-3164 - e-mail: thiago.lima@rotaria.net.

RESUMO

Diante da necessidade urgente de buscar alternativas sustentáveis alinhadas com a economia circular no saneamento, a co-digestão anaeróbia de lodo com resíduos orgânicos apresenta uma solução promissora para aumentar a produção de biogás e reduzir impactos ambientais. Este estudo aborda quatro anos de análises de variação na produção de biogás em uma planta de escala real, conforme a composição e diversidade dos resíduos, incluindo frutas, verduras, gorduras e resíduos da indústria alimentícia. Utilizando medidores específicos, monitorou-se a quantidade e qualidade do biogás gerado. Resíduos de frutas e verduras, biodegradáveis e ricos em umidade, mostraram-se promissores para a produção de biogás. A co-digestão de lodo com resíduos de peixe aumentou significativamente a produção de biogás devido ao alto teor de sólidos voláteis. A combinação de diferentes resíduos, como frutas, verduras e peixe, demonstrou ser eficaz para maximizar a produção de biogás, oferecendo uma solução sustentável para o gerenciamento de resíduos e geração de energia renovável. O lodo representa 76,8% dos sólidos de entrada e 46,6% do potencial de metano, enquanto resíduos de peixe, com 10% dos sólidos, representam 28% do potencial de metano, e resíduos de frutas e verduras, com 7,1% dos sólidos, representam 13,3% do potencial de metano.

PALAVRAS-CHAVE: Co-digestão de lodo e RSO, biogás, economia circular

INTRODUÇÃO

Diante das crises ambientais e climáticas em curso, é crucial reavaliar a sustentabilidade do sistema econômico atual, especialmente no setor de saneamento. Surge, portanto, a necessidade urgente de buscar alternativas mais sustentáveis que estejam alinhadas com os princípios da economia circular, promovendo um sistema econômico que não apenas atenda às demandas presentes, mas também pensando a longo prazo.

Tratando-se do contexto do setor do saneamento, os processos convencionais de tratamento de esgoto em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) são essenciais para o tratamento dos efluentes sanitários, mas geram subprodutos significativos, de forma contínua e de larga escala (PANDINI et al., 2022 apud BRINGHENTI et al., 2018).

Os lodos, como subproduto essencial das ETEs, representam um desafio significativo devido aos elevados custos de seu gerenciamento, que podem atingir até 60% do custo total de uma ETE (SPERLING, 2014), e ao seu impacto ambiental considerável devido sua disposição. No Brasil, o lodo é frequentemente destinado a aterros sanitários, o que não só contribui para a acumulação de resíduos, mas também intensifica as emissões de gases de efeito estufa (IBGE, 2010; BRINGHENTI et al., 2018).

Da mesma maneira, grandes quantidades de resíduos de frutas e vegetais são produzidas diariamente nas grandes cidades do mundo, tornando o descarte eficaz desses resíduos altamente biodegradáveis um desafio considerável (KONG, 2017 apud BOUALLAGUI et al., 2003), resultando em altos custos de transporte tanto para locais de compostagem como para aterro sanitário. A utilização desse tipo de resíduo em plantas de digestão anaeróbia é altamente promissora devido à sua elevada biodegradabilidade e alto teor de umidade (SALEHIYOUN et al., 2019).

Os dados de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) obtidos em diversos estudos indicam que diferentes tipos de resíduos apresentam variações significativas em suas capacidades de gerar biogás. Por exemplo, o lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto apresenta um potencial de geração de biogás de 143 LN CH₄/kg SV (GROSSER, 2018), enquanto resíduos orgânicos como restos de vegetais possuem um potencial de 377 LN CH₄/kg SV (EDWIGES, 2017). O PBM do esterco bovino indica valores significativos, sugerindo sua eficácia na produção de metano e, conseqüentemente, na geração de energia sustentável (PEREIRA et al., 2024). O seu potencial é um dos mais baixos tendo apenas 160 LN CH₄/kg SV (MITO et al., 2018; PALHARES, 2013; PERDOMO, ARMANDO e OLIVEIRA, 2003). Já o de resíduo de peixe apresenta valores de 540 LN CH₄/kg SV (BÜCKER et al., 2020), apresentando, portanto, um maior potencial de geração de biogás e metano.

Esses exemplos ilustram como a caracterização adequada dos substratos é essencial para determinar quais resíduos são mais adequados para maximizar a produção de biogás e melhorar a eficiência dos reatores anaeróbios.

Nesse sentido, a co-digestão anaeróbia, associada a outros resíduos de alto teor de carbono, se destaca como uma solução cada vez mais atraente, aumentando a produção de biogás e minimizando os impactos ambientais. Além disso, a geração de energia a partir de resíduos da indústria alimentícia (SINGH et al., 2010), especialmente da indústria pesqueira, representa uma fonte adicional significativa de energia e tem um grande potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

A co-digestão de resíduos de frutas e vegetais com outros materiais é um exemplo claro de como essa técnica pode ser eficaz. Ela pode neutralizar o pH e fornecer nitrogênio adicional à mistura, resultando em uma maior produção de biogás e melhor eficiência do equipamento (ARHOUN et al., 2019). Estudos mostram que a co-digestão de resíduos de frutas e vegetais com lodo, por exemplo, pode aumentar significativamente a produção de metano, estabilizando o processo anaeróbio e mitigando problemas de acidificação que podem ocorrer quando esses resíduos são digeridos separadamente (KONG et al., 2017). Atualmente, há uma escassez significativa de estudos em escala plena, especialmente aqueles que abordam questões operacionais específicas. Isso é especialmente crucial no contexto de materiais de resíduos, dada a sua natureza altamente variável em composição. Os dados provenientes de experimentos realizados em escala laboratorial, muitas vezes com amostras reduzidas, não podem ser facilmente extrapolados ou aplicados diretamente a operações em escala completa. Esta lacuna na pesquisa destaca a necessidade urgente de mais estudos em escala plena, a fim de compreender melhor os desafios e otimizar os processos relacionados ao tratamento e gestão de resíduos.

OBJETIVO

Dessa maneira, o propósito deste estudo foi avaliar a produção de biogás por meio da co-digestão de lodo e resíduos em escala plena, utilizando uma planta operacional há quatro anos, com dados de quatro anos consecutivos, com a finalização do mesmo estudo em abril de 2024. O estudo teve como objetivo analisar como

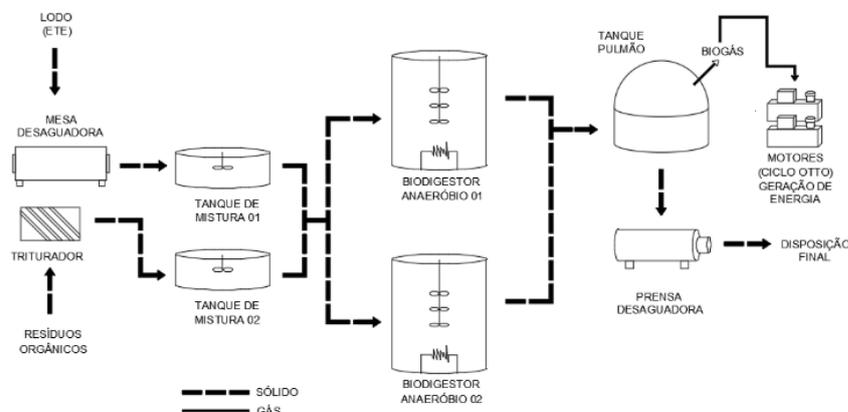
a produção de biogás varia de acordo com a composição e a diversidade dos resíduos, tanto em termos de tipo de resíduo quanto de seu comportamento quando co-digerido com outros resíduos e lodo.

METODOLOGIA

A usina de biodigestão localizada ao lado de uma ETE de Curitiba, utiliza um processo de co-digestão anaeróbia para tratar resíduos orgânicos. Este processo inclui o lodo sanitário da ETE e resíduos de frutas, legumes, verduras e hortaliças vindos da Central de Abastecimento, além de resíduos de comércios e indústrias locais, que podem ser sólidos ou líquidos.

Na *Figura 1*, é possível visualizar o fluxograma do processo, em que, os resíduos orgânicos são inicialmente triturados e depois misturados em tanques antes de serem enviados para biodigestores anaeróbios, onde ocorre a digestão e produção de biogás. Esse biogás é armazenado temporariamente em um tanque pulmão e utilizado para gerar energia em motores de ciclo Otto. O material sólido restante é tratado em uma prensa desaguadora e encaminhado para disposição final.

Figura 1 – Fluxograma simplificado – Usina de Biodigestão



Fonte: OJEA et al., (2023).

Tipos e Origem dos Resíduos

Lodo:

O lodo é proveniente de uma ETE de Curitiba, com lodos ativados que está localizada ao lado da planta de biodigestão, a planta recebe tanto lodo primário quanto secundário, o lodo, oriundo dos decantadores primários, é encaminhado diretamente ao tanque de equalização. O lodo proveniente dos decantadores secundários encaminhado para adensamento, tipo gravitacional, e posteriormente ao tanque de equalização, onde ocorre a mistura com o lodo primário. Após homogeneizado, parcela do lodo segue para a usina de biodigestão e o lodo excedente é encaminhado para desaguamento, realizado por centrífugas.

Resíduos orgânicos da central de abastecimento (frutas e verduras):

Os resíduos orgânicos são encaminhados diariamente para a usina, com uma média de 4 a 5 caminhões provenientes da central de abastecimento, localizada a 20 km de distância. Ainda todos os resíduos passam por uma seleção inicial com base em suas características físico-químicas, conforme detalhado no relatório de caracterização, seguindo as diretrizes do padrão ABNT NBR 10.004 (OJEA et al., 2023). Adicionalmente, a qualidade desses resíduos é analisada para determinar se são adequados para utilização no processo em questão. Todos os resíduos passam por uma seleção inicial com base em suas características físico-químicas. A digestão anaeróbia de resíduos de frutas e vegetais envolve sistemas de tipo úmido (menos de 10% de Sólidos Totais) ou de tipo seco (mais de 20% de Sólidos Totais). Em geral, esses resíduos têm baixo conteúdo de Sólidos Totais e alto conteúdo de Sólidos Voláteis (KONG et al., 2017).

Gordura:

Os resíduos gordurosos provenientes de Curitiba e da Região Metropolitana de Curitiba (RMC) são compostos principalmente por restos de óleos e gorduras resultantes de atividades culinárias e industriais. Esses resíduos são coletados de diversas fontes, incluindo restaurantes, indústrias alimentícias e residências, onde são gerados em grandes quantidades. Caracterizados por sua alta concentração de matéria orgânica, esses resíduos de caixas de gordura têm um grande potencial para a produção de biogás através de processos de digestão anaeróbia. A concentração de Sólidos Totais (ST) nesses resíduos é de 11,81% (Os Autores, 2024), enquanto o teor de Sólidos Totais Voláteis (STV) é de 99,00% (GROSSER, 2018).

Escuma:

A escuma gerada nas ETEs de Curitiba, apresentam características distintas que impactam o processo de tratamento de esgoto. A concentração de Sólidos Totais (ST) na escuma varia entre 13,46% e 16,38%, enquanto a de Sólidos Totais Voláteis (STV) está entre 5,82% e 9,99%. Essa escuma não passa por processos de desaguamento antes da avaliação, o que contribui para sua menor estabilidade quando comparada ao lodo de esgoto anaeróbio caledado (ROSS, 2015).

A escuma acumulada pode aprisionar o biogás, dificultando sua remoção e comprometendo a eficiência do sistema de tratamento. A remoção dessa escuma é desafiadora devido à variabilidade na composição e quantidade entre as diferentes ETEs. Esse aprisionamento de biogás não apenas prejudica o desempenho do reator, mas também pode levar a perdas significativas de biogás que poderia ser utilizado para a geração de energia (ROSS, 2015).

A planta estudada recebeu escuma de janeiro de 2020 a abril de 2021, cuja contribuição para a co-digestão será analisada no capítulo seguinte.

Resíduos de peixe:

Os Resíduos de peixe são recebidos de indústrias alimentícia localizadas em Itajaí a aproximadamente, 200 km de distância. A planta recebe média 2 a 3 caminhões por semana, os resíduos que são recebidos desse tipo de indústria são: vísceras, escamas, carcaças e peles que são processados para a produção de farinha e em óleo de peixe. A farinha de pescado é produzida através de um processo o que envolve a cocção, prensagem, secagem e moagem dos resíduos. Esse produto é utilizado principalmente na alimentação animal, devido ao seu alto valor proteico (LIMA, 2013 apud VIDOTTI et al., 2006), óleo de pescado o produto líquido obtido pelo tratamento de matérias-primas pela cocção a vapor, separado por decantação ou centrifugação e filtração (LIMA, 2013), O óleo de pescado, extraído durante as etapas de cocção e prensagem, é empregado na produção de ração animal, cosméticos e até biodiesel, contribuindo para o aproveitamento integral dos resíduos (LIMA, 2013 apud FEIDEN et al., 2007). A concentração média de Sólidos Totais (ST) nesses resíduos é de 20,65% (Os Autores, 2024), enquanto a de Sólidos Totais Voláteis (STV) é de 89,00% (Os Autores, 2024).

Esterco:

Os resíduos de esterco bovino foram recebidos diariamente de uma Fazenda Experimental pertencente a uma universidade localizada na região de Curitiba, a 25 km de distância, no período de janeiro de 2020 a maio de 2023 O teor de sólidos totais (ST) do esterco bovino dessa fazenda é de aproximadamente 2,6% (PEREIRA., 2024). Em relação aos sólidos voláteis (SV), que representam a fração orgânica biodegradável, o esterco bovino apresentou um valor de 2,0%, com uma relação SV/ST de 77% (PEREIRA, 2024 apud ALINO et al., 2022). Esses valores indicam uma quantidade significativa de fração orgânica biodegradável, adequada para a digestão anaeróbia, demonstrando um potencial considerável para a produção de biogás.

Resíduos Indústria alimentícia:

Os resíduos industriais foram recebidos de uma indústria localizada no centro de Curitiba, a 21 km de distância, durante o período de abril de 2020 a setembro de 2023. Esses resíduos incluíam soro de leite, lodo, massa de bolacha, chiclete e gordura, sendo esta última recebida de forma sazonal. A composição dos resíduos apresentava 14,76% de sólidos totais e 70,00% de sólidos voláteis em relação aos sólidos totais (Os Autores, 2024).

Na etapa inicial do trabalho, o foco foi na identificação e separação quantitativa de cada tipo de resíduo, além do monitoramento da produção global de biogás. Para medir a quantidade de biogás gerado, foram utilizados dois tipos de medidores: o Multitec 560, da Sewerin (*Figura 2*), e o Vortex - Höntzsch (UVA-Ex-d-VA40-E-10) pode ser observado na *Figura 3*. O Multitec 560, que é dispositivo de medição portátil, desenvolvido para

unidades de produção de biogás de pequena e média dimensão, aterros, estações de tratamento de águas residuais e de compostagem. O Multitec é um equipamento para a medição da composição dos gases produzidos durante o processo biológico, o dispositivo utiliza sensores infravermelhos seletivos para a medição do CH₄ (0 a 100% Vol.), CO₂ (0 a 100% Vol.) E sensores eletroquímicos para os gases O₂ (0 a 25,0% Vol.) e H₂S (0 a 2000 ppm), (HERNANDEZ et al., 2021).

O sistema de medição da vazão de biogás é composto por unidade de medição tipo vórtice da marca Höntzsch, com adicional de medição de temperatura e pressão. Como vantagens o medidor não possui partes móveis tem alta acurácia e resistência à corrosão, além de ter baixa perda de carga (HERNANDEZ et al., 2021), com leituras realizadas três vezes ao dia, complementou o monitoramento. Esse processo foi conduzido ao longo de um período de quatro anos, começando em 2020 e terminando em abril de 2024. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada e comparativa da produção de biogás em relação aos diferentes tipos de resíduos.

Figura 2 – Medidor Multitec 560



Fonte: Sewerin

Figura 3 - Vortex - Höntzsch (UVA-Ex-d-VA40-E-10)



Fonte: Os autores, (2024)

A preservação, transporte e armazenamento das amostras para a caracterização dos resíduos e o gás seguiram as especificações detalhadas pelo procedimento *Preservation and Storage 9060 B*, definida pelo *Standard Methods* (APHA, 2012). A metodologia de análise do teor de sólidos totais, fixos e voláteis em amostras sólidas e semissólidas foi realizada em acordo com a metodologia *Standard Methods, 2450 Solids – 2450 G* (APHA, 2012).

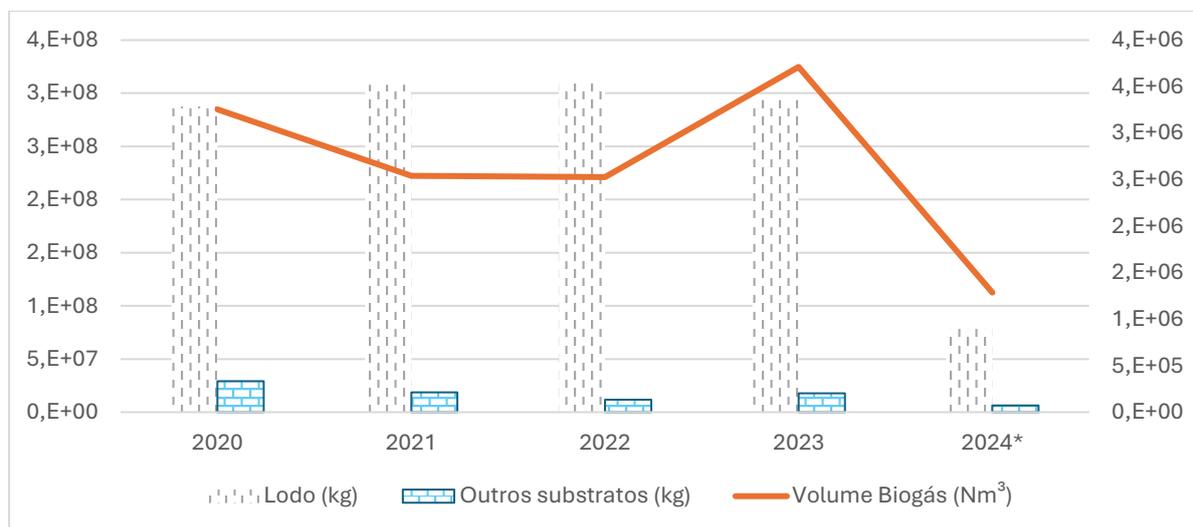
Para a análise dos dados, foram aplicados diversos métodos estatísticos, incluindo gráficos de dispersão e boxplots. O gráfico de dispersão foi utilizado para examinar a relação entre os tipos de resíduos recebidos, permitindo a visualização de padrões, tendências e possíveis correlações. Já o boxplot, ou diagrama de caixa, foi empregado para resumir a distribuição do teor de metano, destacando a mediana, os quartis e possíveis outliers. Esses métodos proporcionaram uma compreensão clara e visual dos dados coletados, auxiliando na identificação de características importantes e comportamentos dos conjuntos de dados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados monitorados foram plotados, revelando que a massa de lodo natural é significativamente superior à entrada de outros resíduos, conforme exibido na *Figura 4*, que apresenta o total anual de lodo e o total de todos os resíduos somados. Observa-se que o volume de biogás está mais relacionado aos outros resíduos do que ao lodo, isso porque o desempenho da digestão anaeróbia do lodo pode ser melhorado com a co-digestão de resíduos de frutas e verduras (DI MARIA e BARRATTA, 2015). Para entender melhor a influência dos outros resíduos, foi necessário separá-los em grupos para analisar seu comportamento assim como possíveis sazonalidades. Embora o lodo sanitário recebido seja proporcionalmente muito maior do que outros resíduos (*Figura 4*), é crucial compreender como cada tipo de resíduo contribui para a geração de biogás e influencia a qualidade do metano gerado.

Além disso, houve uma variação na concentração de metano (*Figura 5*), que segue a mesma tendência do volume de biogás, confirmando que a composição dos outros substratos afeta não apenas a quantidade, mas também a qualidade do biogás produzido.

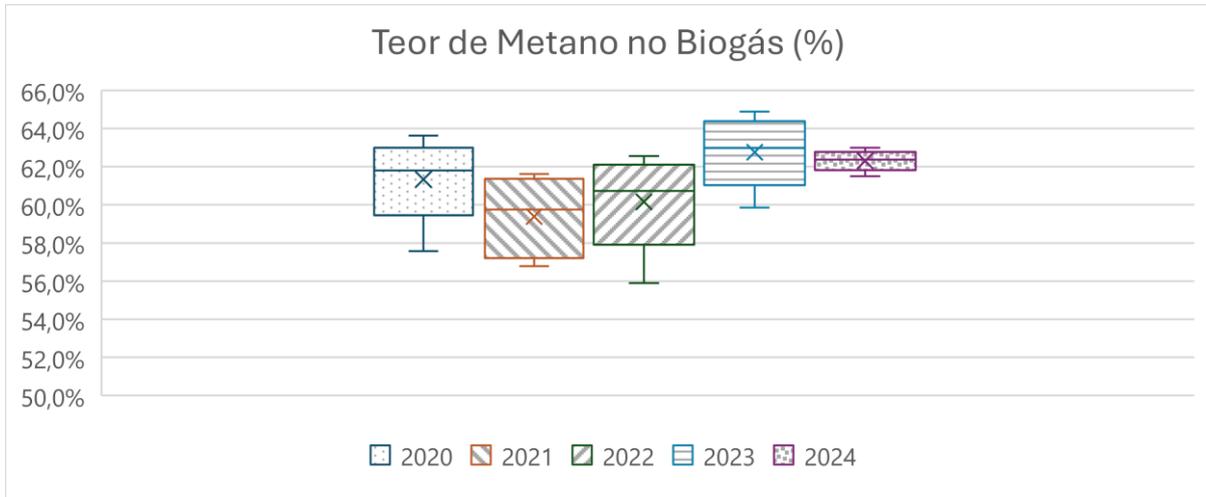
Figura 4 - Recepção anual de resíduos e o volume de biogás gerado



Fonte: Os autores, 2024

Dentre os resíduos temos como os principais o de frutas e verduras (Orgânicos), resíduos de gordura (Gordura), resíduos escuma de estações de tratamento de esgoto e resíduos de indústria alimentícia dentre outros (Resíduos Especiais). Fazendo uma correlação visual e entender quais resíduos são os mais benéficos para uma maior produção de biogás e conseqüentemente de energia para a Usina, conforme *Figura 5*.

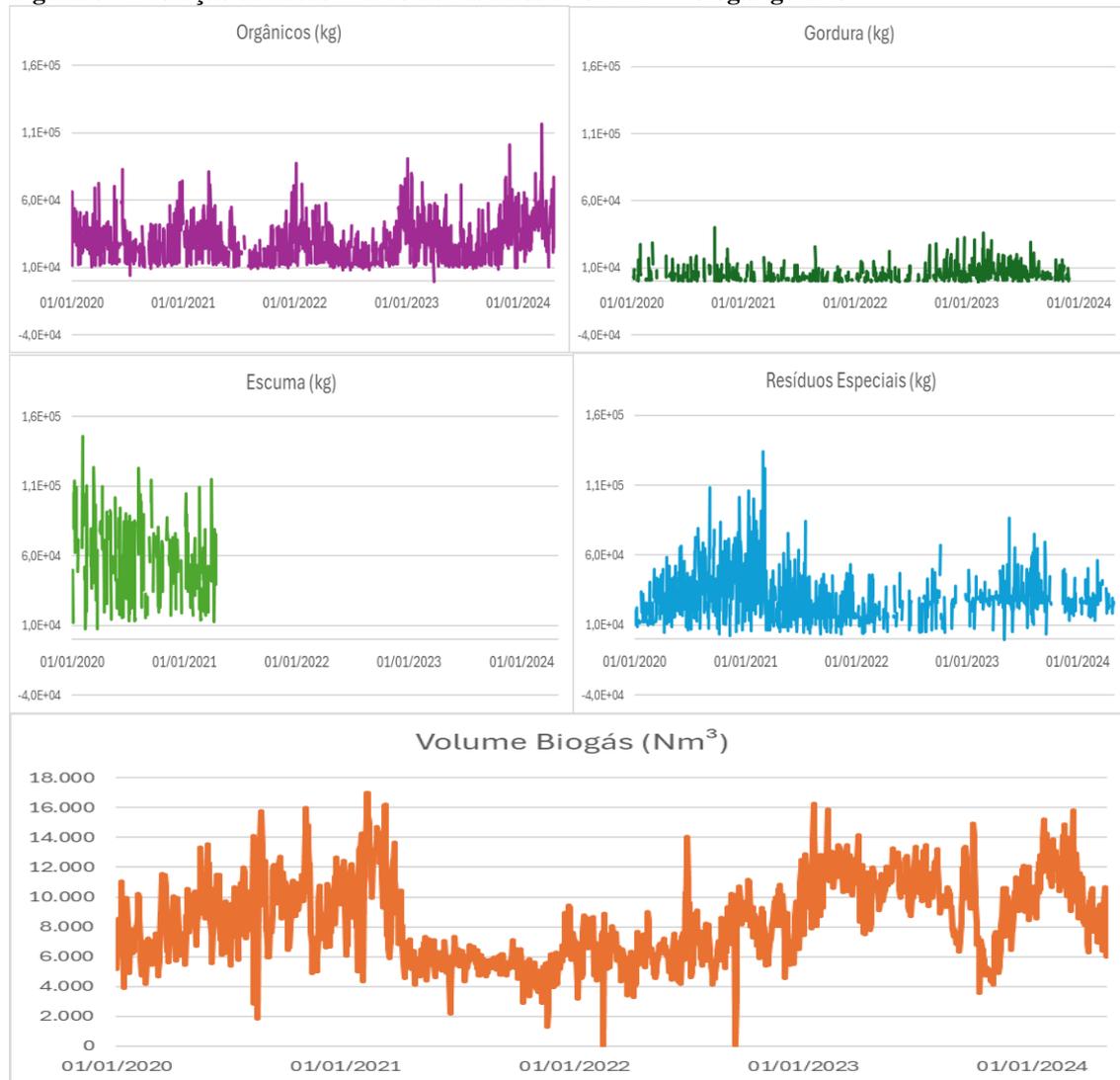
Figura 5 - Qualidade do biogás anual



Fonte: Os autores, 2024

A partir da observação dos gráficos (*Figura 6*), percebe-se a variação da produção de biogás e uma tendência de alta nos períodos de janeiro de 2022 a dezembro de 2022 e novamente de janeiro de 2023 a abril de 2024. Os resíduos orgânicos de frutas e verduras foram recebidos em maior quantidade, especialmente a partir de janeiro de 2023, enquanto a contribuição de resíduos especiais (peixe e esterco) foi menor. O volume de biogás produzido mostra uma tendência de alta nos períodos mencionados, com o volume médio de 312.370 Nm³/mês de janeiro de 2023 a abril de 2024. A gordura, embora tenha quantidades variáveis, esteve significativamente presente ao longo do período.

Figura 6 - Evolução de recebimento de resíduos e volume de biogás gerado



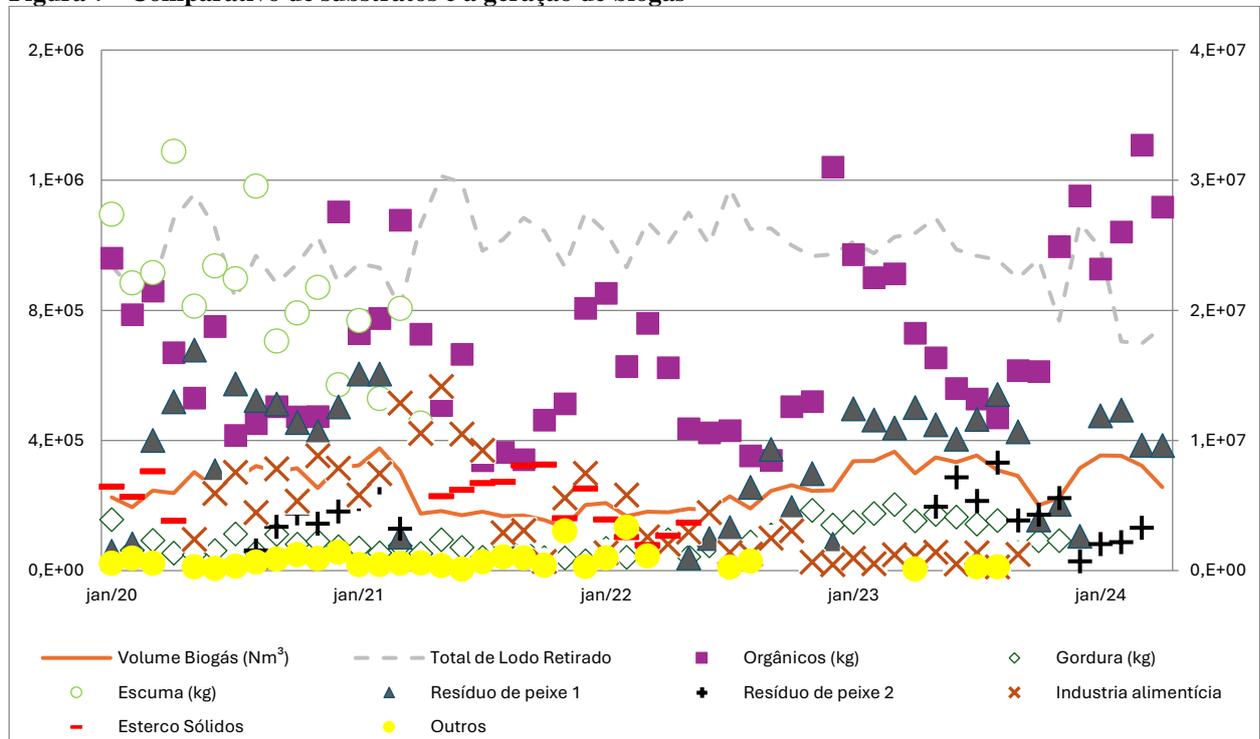
Fonte: Os autores, 2024

Para entender melhor o comportamento dos substratos, foi necessário decompor o grupo de resíduos especiais em vários subgrupos conforme sua importância e características. Esses resíduos especiais incluem resíduo de peixe 1, resíduo de peixe 2, indústria alimentícia, esterco bovino e outros resíduos. Os resíduos de peixe apresentaram variações sazonais, com picos em determinados meses. Os resíduos provenientes da indústria alimentícia mostraram quantidades mais constantes, enquanto o esterco apresentou quantidades irregulares, com picos em alguns meses. Outros tipos de resíduos mantiveram quantidades constantes ao longo do tempo.

Ao comparar todos os resíduos, verifica-se uma tendência de maior geração de biogás quando alguns destes resíduos estão presentes, conforme observado na *Figura 7*. Os maiores valores de biogás na série histórica envolvem lodo, resíduos orgânicos, resíduos de peixe 1 e 2, indústria alimentícia e gordura. No entanto, no último pico de grande geração de biogás, os resíduos da indústria alimentícia e a gordura não estavam mais presentes, indicando que foram importantes em alguns momentos, mas a combinação mais eficiente inclui lodo, resíduos orgânicos e resíduos de peixe 1 e 2. Isso fica evidente entre outubro e novembro de 2023, quando a paralisação dos resíduos de peixe 1 e 2 devido a férias coletivas de 30 dias resultou em uma queda brusca na produção de biogás, confirmando a importância desses resíduos na Co digestão e produção de biogás na Usina.

Pelos dados demonstrados na *Figura 7*, houve redução de biogás quando houve uma ausência de um determinado tipo de substrato, os de resíduos de peixe 1 e 2. O lodo devido ao seu grande volume foi colocado em outra escala (direita) para poder ser avaliado a sua tendência e ser possível sua comparação com os demais resíduos. Conforme afirmam DI MARIA e BARRATTA (2015) e GROSSER (2018) a co-digestão oferece uma solução para obter a melhor combinação dos substratos.

Figura 7 - Comparativo de substratos e a geração de biogás



Fonte: Os autores, 2024

Quando se compara os potenciais dos substratos recebidos os valores apresentados variam de 143 LN CH₄ / kg SV até 570 LN CH₄ / kg SV, conforme Tabela 01. Na literatura são encontrados valores variados para a taxa de produção referente ao mesmo tipo de substrato. O lodo pode variar de 143 a 460 LN CH₄ / kg SV (GROSSER, 2018). O resíduo de frutas e verduras assim como os outros resíduos também variam, principalmente devido a região, as culturas que são produzidas na região de estudo. E a maioria destes resíduos são feitos em escala de laboratório, e muitas vezes com reatores semi-contínuos. O presente trabalho explora a geração de biogás em escala plena, comparando os dados de volume de metano com os valores de potencial de cada tipo de resíduo. Os valores da Tabela 1 foram utilizados para o levantamento de qual seria o potencial do resíduo recebido, assim como a caracterização dos resíduos executados na planta.

Quando se compara o teor de sólidos totais e o a relação dos sólidos totais e sólidos voláteis temos uma similaridade com a literatura, o resíduo de peixe 1 é o que mais se aproxima pois varia de 25 a 35 % de sólidos totais e sua média de SV/ST é de 94,80% que é maior que o apresentado por CHOE et. al. (2019), 43,54% de sólidos totais e 90,00% de sólidos voláteis. Os valores de BPM variam de 445 LN CH₄ / kg SV (FONSECA et. al, 2020) a 543 LN CH₄ / kg SV (KAFLE et. al, 2013). Sendo um dos responsáveis pela grande geração de biogás da usina.

Tabela 1 - Características dos substratos como sólidos totais, relação sólidos totais sólidos voláteis e BPM

| Substrato | Sólidos Totais (%) | Fonte | Sólidos Voláteis/Sólidos Totais (%) | Fonte | BPM (LN CH ₄ /kg SV) | Fonte |
|-----------------------|--------------------|------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|---|
| Lodo | 2,65% | Os Autores, 2024 | 76,10% | Os Autores, 2024 | 143 | GROSSER, 2018 |
| Frutas e verduras | 8,67% | Os Autores, 2024 | 88,80% | Os Autores, 2024 | 377 | EDWIGES, 2017 |
| Gordura | 11,81% | Os Autores, 2024 | 99,00% | GROSSER, 2018 | 570 | GROSSER, 2018 |
| Escuma | 6,91% | Os Autores, 2024 | 74,40% | PAULA et al, | 541 | Adaptado de ROSS, 2015 |
| Resíduo de peixe 1 | 27,14% | Os Autores, 2024 | 94,80% | Os Autores, 2024 | 540 | BÜCKER et al, 2020 |
| Resíduo de peixe 2 | 14,17% | Os Autores, 2024 | 83,20% | Os Autores, 2024 | 540 | BÜCKER et al, 2020 |
| Industria alimentícia | 14,76% | Os Autores, 2024 | 70,00% | Os Autores, 2024 | 400 | * |
| Esterco Bovino | 7,73% | Os Autores, 2024 | 51,50% | MITO et al., 2018; PALHARES,2013; PERDOMO; ARMANDO; OLIVEIRA, 2003. | 160 | MITO et al., 2018; PALHARES,2013; PERDOMO; ARMANDO; OLIVEIRA, 2003. |
| Outros | 12,67% | Os Autores, 2024 | 70,00% | Os Autores, 2024 | 400 | * |

Fonte: Os autores, 2024

* Valores obtidos através das aproximações das simulações efetuadas durante os estudos.

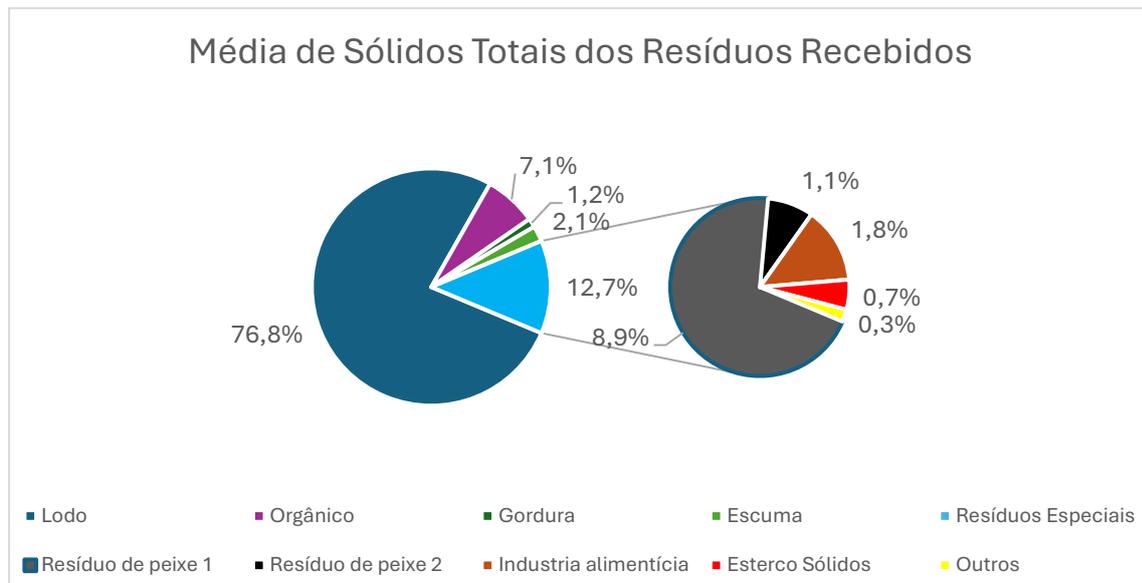
Os valores de sólidos totais e sólidos voláteis são muito parecidos com a literatura, indicando que os valores de BPM da literatura podem ser utilizados com confiabilidade para estes resíduos. Com as médias dos resíduos multiplicada pelo teor de sólidos totais médio, obtemos a média de sólidos totais de todos os resíduos (*Figura 8*), e dessa forma podemos quantificar a proporção dos substratos individualmente. Com o teor de sólidos voláteis multiplicado pela matéria seca (obtida com a massa do substrato multiplicada pelo teor de sólidos totais) seca podemos quantificar o teor de sólidos voláteis (*Figura 9*) e finalizando com a proporção do potencial de geração de biogás individual (*Figura 10*), e assim conseguir definir os melhores resíduos, ou buscar resíduos com características parecidas para a melhoria da eficiência da Usina.

Pode se observar a composição de sólidos totais do lodo (*Figura 8*) ainda é o maior volume, representando uma média de 76,8% dos sólidos totais de entrada na usina. Quando comparado ao montante natural, já é bem menor,

isso acontece devido ao baixo teor de sólidos totais proveniente da ETE, em níveis de 3,0% (GROSSER, 2018). Por esse motivo é necessário um pré tratamento para que esse lodo seja enviado ao sistema de digestão anaeróbia. As escumas possuíam um grande volume, porém, por decisão estratégica não foram mais recebidas, mas representam (2,1%) mais que o montante de gordura recebida quase em toda a série histórica (1,2%). Os resíduos de frutas e verduras representam 7,1% do total de sólidos totais recebidos, apresentam sazonalidade (diminuem no outono e inverno), mas estão presentes durante toda a série histórica, assim como o lodo.

Os resíduos especiais representam 12,7% do total de sólidos. Sendo os resíduos de peixes mais representativos, pois somam 10,0% do total de sólidos geral e a maior parte dos sólidos dos resíduos especiais. Eles foram recebidos em diferentes períodos, mas sempre que foram recebidos tiveram um papel importante na geração de biogás. Os resíduos de indústria alimentícia, e esterco foram importantes nos períodos que os resíduos de peixe ficaram ausentes, não conseguindo apresentar resultados parecidos, pois possuem diferentes características.

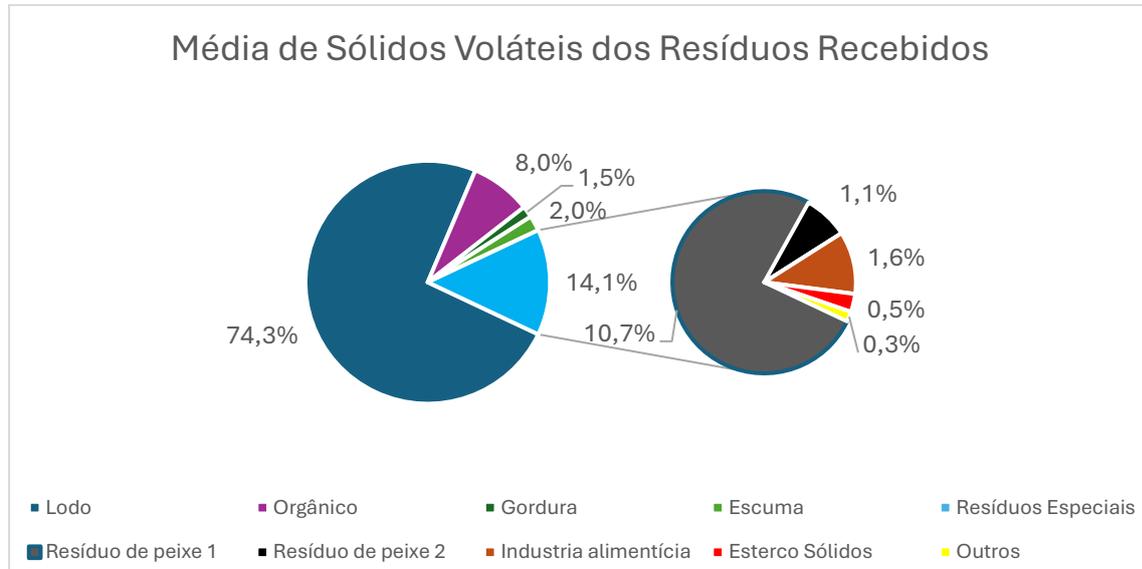
Figura 8 - Média do teor de sólidos totais dos substratos recebidos



Fonte: Os autores, 2024

Ao analisar as porcentagens de sólidos voláteis (*Figura 9*), ainda o lodo tem uma participação expressiva de 74,3%, devido ao seu grande volume. Porém, também se observa um aumento nos resíduos de frutas e verduras para 8,0% do total de sólidos voláteis devido a sua alta concentração de sólidos voláteis. Os resíduos especiais tiveram um aumento na representatividade, totalizando 14,1% do total de sólidos voláteis, isso devido à alta concentração de sólidos voláteis do resíduo de peixe 1, que possui um teor de voláteis acima de 94,0% (CHOE et al., 2019).

Figura 9 - Média do teor de sólidos voláteis dos substratos recebidos

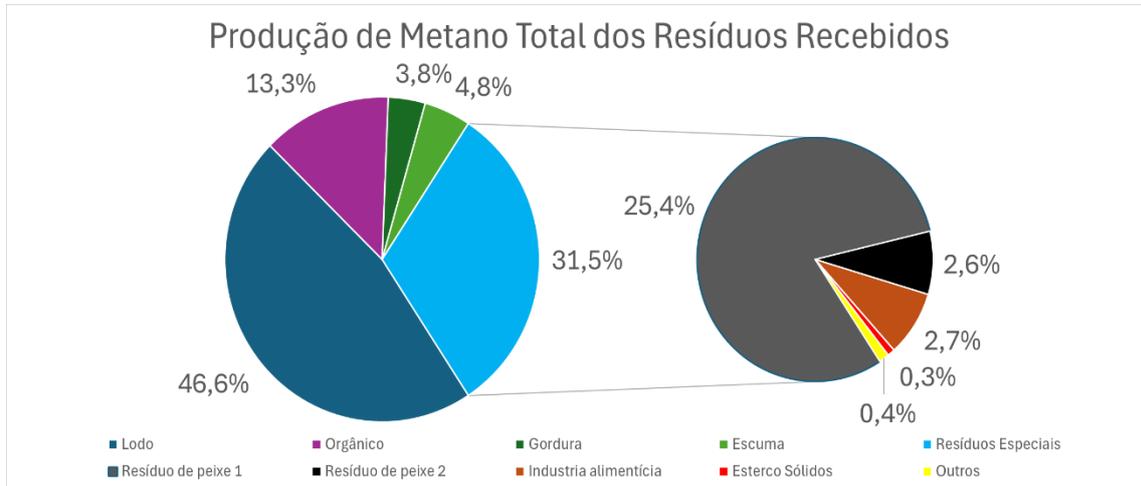


Fonte: Os autores, 2024

O gráfico que ilustra a produção de metano dos resíduos recebidos (*Figura 10*) destaca que o lodo tem uma contribuição de 46,6% para o potencial de produção de metano. Porém, ao comparar com a *Figura 9*, percebe-se que é muito inferior à sua participação nos teores de sólidos totais e sólidos voláteis. Isto deve-se ao baixo potencial de produção de metano que o lodo de ETE apresenta em comparação com os demais resíduos, apresentando um valor de 143 LN CH₄/kg SV (GROSSER, 2018). É o menor valor dentre os resíduos recebidos e avaliados, os resíduos de frutas e verduras mostram um potencial considerável, representando 13,3% do BMP, enquanto a escuma e a gordura somadas contribuem com 8,6%. Os resíduos especiais apresentam um potencial expressivo de 31,5%, esse valor se deve ao elevado BPM apresentado pelos resíduos de peixe, com valores de 540 LN CH₄/kg SV (BÜCKER et al., 2020; KAFLE et al., 2013). Os resíduos de peixe têm um impacto notável no BMP, somando 28,0%, apesar de sua menor proporção nos sólidos totais e voláteis. Demonstrado não apenas na teoria, mas em resultados práticos que esse resíduo, desde que controlado, pode significar a garantia de viabilidade de uma planta de biogás, devido a suas características. Outros resíduos especiais, como indústria alimentícia, esterco e outros resíduos têm uma contribuição menor para o BMP, totalizando cerca de 3,4%.

Em resumo, o lodo é o componente em maior quantidade dos resíduos tratados na planta de biogás, predominando tanto em valor total de sólidos totais quanto em sólidos voláteis e produção de biogás. Os resíduos que se sobressaem são os resíduos de peixe pois têm uma participação significativa, especialmente no potencial de produção de metano. O resíduo de fruta e verdura contribuí com suas características para intensificar a geração de biogás. Os outros resíduos têm participação, porém não contribuem de forma significativa para a produção de biogás. Este resultado é importante pois leva a conclusão de que estes resíduos devem ser recebidos somente se uma taxa atrativa for cobrada por seu recebimento já que não irão contribuir significativamente para a geração de energia, e consequente receita.

Figura 10 - Média da produção de metano total dos substratos recebidos

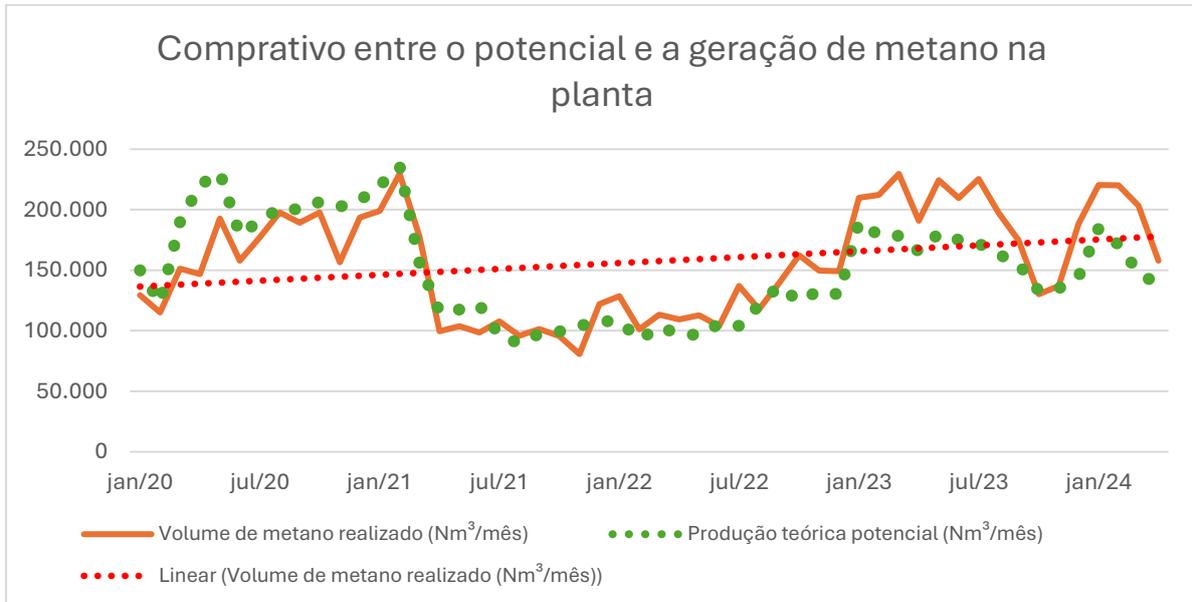


Os autores, 2024

A partir dos valores apresentados, foi realizada uma análise comparativa entre a geração de metano e a estimativa de geração teórica potencial dos resíduos, conforme *Figura 11*. No primeiro ano de acompanhamento, observou-se que a geração de metano estava abaixo do potencial somado dos resíduos. Isso ocorreu porque o recebimento dos resíduos não era controlado pela qualidade, mas sim pela necessidade de diversificar os tipos de resíduos. Nesse período, a planta ainda estava no início da operação plena e precisava aumentar suas receitas por meio do recebimento de resíduos variados. Essa fase inicial demandava uma maior flexibilidade na aceitação de resíduos para garantir a viabilidade econômica da operação e estabilizar o processo de digestão anaeróbia.

Conforme pode ser observado na *Figura 7*, foram recebidos vários resíduos nesse primeiro ano. Em março de 2021 é possível visualizar uma queda bastante grande tanto do potencial, quanto da geração, isso é devido à ausência de resíduos de peixe. Para manter a produção de biogás e estabilidade do processo, foram buscados outros resíduos, tais como resíduos de indústria alimentícia e esterco bovino. Em dezembro de 2021, observa-se uma mudança no que diz respeito a geração de metano e o seu potencial. Sendo que a geração de metano supera o potencial teórico. Isso aconteceu quando a qualidade dos substratos foi priorizada em relação ao volume. Após esse período, vemos a geração se afastando positivamente do potencial, e em janeiro de 2023 temos o retorno dos resíduos de peixe, que melhorou ainda mais a geração de metano superando em até 137% o potencial durante o período restante da série histórica.

Figura 11 - Comparação do potencial de geração de metano com o volume de metano gerado na planta

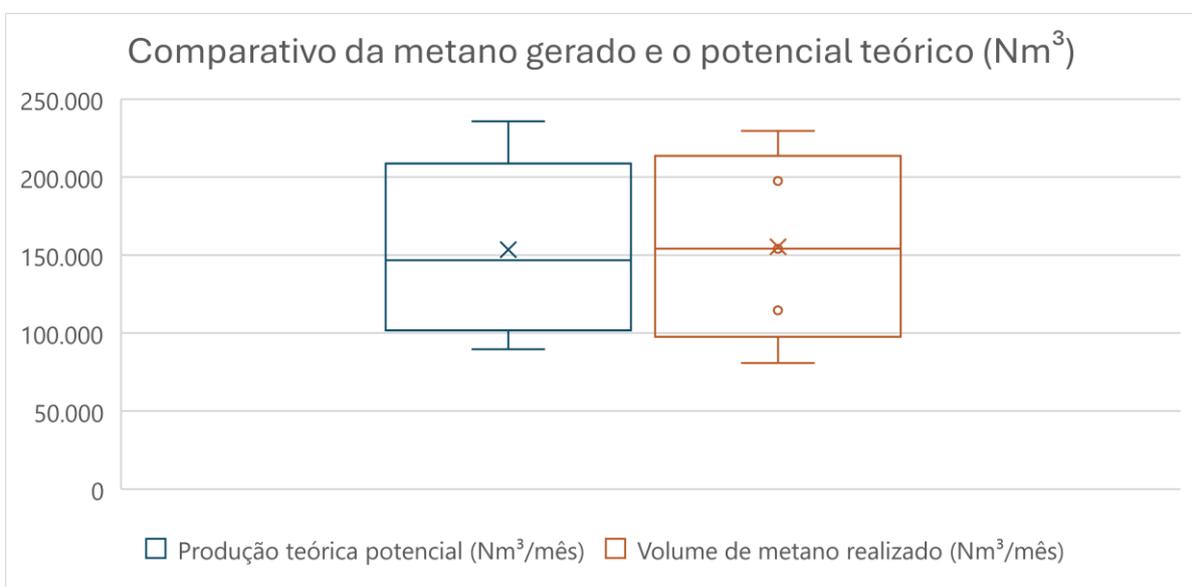


Fonte: O autor, 2024

Como pode ser observado na Figura 12, os valores máximos da geração teórica com base no BPM de cada resíduo, estão acima do máximo da geração de metano, isso ocorreu devido ao grande volume de substratos de 2020 a abril de 2021, coincidindo com a presença de escumas e resíduos de peixe em grande quantidade. Após esse período houve uma mudança de comportamento, conforme observado na Figura 11.

Pode-se observar que tanto a média, a mediana e os valores do terceiro quartil de geração de metano são superiores em relação ao potencial teórico. Demonstrando que o número de valores acima do potencial teórico também pode ser observado através de uma análise estatística, como o boxplot.

Figura 12 - Comparação da distribuição de valores do potencial de geração de metano e do volume de metano gerado



Fonte: O autor, 2024

CONCLUSÃO

Para a produção de biogás é fundamental a qualidade dos substratos recebidos, uma estratégia eficaz proporciona uma maior geração de biogás e estabilidade do processo.

Neste trabalho foi identificado que nem todos os resíduos recebidos trazem benefícios para a geração de biogás, e em alguns casos podem trazer complicações como por exemplo a utilização de espaço hidráulico no sistema, de um resíduo que possua melhor desempenho.

Este estudo nos mostra a importância dos resíduos de peixe para a geração de metano, produzindo mais biogás e com maior teor de metano, com valores de sólidos totais de 27,14% (peixe 1) e 14,17% (peixe 2) e valores de 94,8% (peixe 1) e 83,2% (peixe 2) de sólidos voláteis.

A combinação que obteve os melhores resultados de produção de biogás foi a composição de lodo, resíduos de frutas e verduras e resíduos de peixe 1 e 2. Que corrobora com vários autores sobre a importância da co-digestão para produção otimizada de biogás.

Importante ressaltar que com a composição citada foi alcançado o equilíbrio entre os carboidratos, proteína e gordura para a co-digestão de lodo (2,65% de ST e 76,10% de SV), frutas e verduras (8,67% de ST e 88,80% de SV) e resíduos de peixe. Para manter esse equilíbrio, será necessário mais resíduo com características parecidas com os resíduos de peixe em teores de sólidos totais, sólidos voláteis e composição.

Desta forma, fica demonstrada a possibilidade de aumentar a geração de biogás na planta, que foi de 13.320.040 Nm³ no período avaliado. O recebimento de resíduos com alto potencial, como o de peixe, aumentam a produção de biogás que está ligada diretamente com o aumento de produção de energia, promovendo maior receita, além da própria receita com o aumento da recepção de resíduos, impactando positivamente a viabilidade econômica desse tipo de projeto.

Destaca-se que os resíduos a serem recebidos devem passar por uma avaliação criteriosa, para que sejam avaliados todos os aspectos técnicos. Um dos primeiros itens a ser avaliado é o valor de BMP, que para os resíduos de peixe está em 540 LN CH₄/kg SV, de frutas e verduras em 377 LN CH₄/kg SV e o de lodo em somente 143 LN CH₄/kg SV. Caso o valor de BMP seja baixo, mas o resíduo possa ser recebido por não apresentar características inibidoras, deve-se avaliar a taxa de recebimento (reais por tonelada) deste resíduo, para haver uma compensação financeira por estar ocupando espaço de um resíduo que traria melhor desempenho na produção de biogás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 2012. Edição 22. Washington, USA
2. ARHOUN, B. GUZMAN, M. V. LAHOZ, C. G. Maroto, J. M. R. HERRZO, F. G. ALONSO, C. V. *Anaerobic co-digestion of mixed sewage sludge and fruits and vegetable wholesale market waste: Composition and seasonality effect*, Journal of Water Process Engineering, Volume 31, 2019, 100848, ISSN 2214-7144, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100848>.
3. BRINGHENTI, J. R. BOSCOV, M. E. G. PIVELI, R. P. GÜNTHER, W. M. R. *Codisposição de lodos de tratamento de esgotos em aterros sanitários brasileiros: aspectos técnicos e critérios mínimos de aplicação*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, p. 891-899, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018124980>.
4. BÜCKER, F. MARDER, M. PEITER, M. R. LEHN, D. N. ESQUERDO, V. M. PINTO, L. A. A. KONRAD, O. *Fish waste: An efficient alternative to biogas and methane production in an anaerobic mono-digestion system*, Renewable Energy, Volume 147, Part 1, 2020, Pages 798-805, ISSN 0960-1481, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.140>.

5. CHOE, U. MUSTAFA, A. M. LIN, H. XU, J. SHENG, K. *Effect of bamboo hydrochar on anaerobic digestion of fish processing waste for biogas production*, *Bioresource Technology*, Volume 283, 2019, Pages 340-349, ISSN 0960-8524, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.084>.
6. DI MARIA, F. BARRATTA, M. *Boosting methane generation by co-digestion of sludge with fruit and vegetable waste: Internal environment of digester and methanogenic pathway*, *Waste Management*, Volume 43, 2015, Pages 130-136, ISSN 0956-053X, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.007>.
7. EDWIGES, T. *Biodigestão Anaeróbia de resíduos vegetais provenientes de Central de Abastecimento*. 2017. 78 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus Cascavel, Cascavel, 2017
8. FONSECA, C. FRARE, L. M. D'AVILA, L. EDWIGES, T. *Influence of different waste compositions from tilapia fish on methane production*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 265, 2020, 121795, ISSN 0959-6526, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121795>.
9. GROSSER, A. *Determination of methane potential of mixtures composed of sewage sludge, organic fraction of municipal waste and grease trap sludge using biochemical methane potential assays. A comparison of BMP tests and semi-continuous trial results*, *Energy*, Volume 143, 2018, Pages 488-499, ISSN 0360-5442, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.010>.
10. HERNANDEZ, O. A. D. PAULA, A. C. POSSETTI, G. R. C. CANTÃO, M. P. AISSE, M. M. *Quali-quantitative characterization of biogas with the temporal behavior of organic load on wastewater treatment plant with upflow anaerobic sludge blanket reactors through measurement in full scale systems*. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais (RBCIAMB)*, 56(4), 621–629, 2021 Disponível em : <https://doi.org/10.5327/Z217694781059>.
INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2010 *Pesquisa nacional de saneamento básico Rio de Janeiro*: IBGE. Disponível em: <Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1691&id_pagina=1 >.
11. KAFLE, G. K., KIM, S. H., SUNG, K. *Ensiling of fish industry waste for biogas production: A lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics*, *Bioresource Technology*, Volume 127, 2013, Pages 326-336, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.032>.
12. KONG, C.-X.; MEI, Z.-L.; LI, J. *A Review of the Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Waste*. *Applied Biochemistry And Biotechnology*, [S.L.], v. 183, n. 3, p. 906-922. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12010-017-2472-x>.
13. LIMA, L. K. F. D. *Reaproveitamento de Resíduos Sólidos na Cadeia Agroindustrial do Pescado: exemplares desta publicação podem ser adquiridos na*: Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2013. 30 p
14. MITO, J. Y. DE L. et al. *Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil*. Embrapa Suínos e Aves, p. 56, 2018.
15. OJEA, A. P. C. S. MARENDA, T. HERNANDEZ, O. A. D. AISSE, M. M. *Avaliação preliminar do desempenho de biogás de um digestor anaeróbio a partir da co-digestão de lodo de ETE com resíduos orgânicos urbanos e industriais*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 32., 2023, Belo Horizonte. Artigo. Belo Horizonte: Abes, 2023. p. 1-10.
16. PALHARES, J. C. P. *Consumo de água na produção animal. Comunicado Técnico 102 - Consumo de água na produção animal*, p. 1–6, 2013
17. PANDINI, D. FREITAS, Y. C. KORRES, A. M. N. *Green waste management methods in educational institutions: a systematic review focused in sustainability*. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, Vitória, v. 26, p. 4, 26 dez. 2022. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/2236117067073.IBEG>:
18. PEREIRA, Larissa Maria Silveira. *Determinação do potencial bioquímico de metano de lodo aeróbio e esterco bovino em sistema de batelada*. In: Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 7., 2024, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: Ibeas - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2024. p. 1-6

19. PERDOMO, C. C. ARMANDO, P. OLIVEIRA, V. D. *Metodologia Sugerida para Estimar o Volume e a Carga de Poluentes Gerados em uma Granja de Suínos*. p. 2–7, 2003.
20. PETROVIC, A. ZIRNGAST, K. PREDIKAKA, T. C. SIMONIC, M. ČUČEK, L. *The advantages of co-digestion of vegetable oil industry by-products and sewage sludge: Biogas production potential, kinetic analysis and digestate valorisation*, Journal of Environmental Management, Volume 318, 2022, 115566, ISSN 0301-4797, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115566>
21. ROSS, B. Z. L. *Escuma de reatores anaeróbios tratando esgotos domésticos em escala real: produção, caracterização e proposição de parâmetros para seu gerenciamento*. 2015. 163 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2015.
22. SALEHIYOUN, Ahmad Reza et al. *Effect of substituting organic fraction of municipal solid waste with fruit and vegetable wastes on anaerobic digestion*. Journal Of Material Cycles And Waste Management, [S.L.], v. 21, n. 6, p. 1321-1331, 25 jun. 2019. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-019-00887-5>.
23. SINGH, A. PANT, D. KORRES, N. E. NIZAMI, A. S. PRASAD, S.; MURPHY, J. D. *Key issues in life cycle assessment of ethanol production from lignocellulosic biomass: challenges and perspectives*. *Bioresource Technology*, [S.L.], v. 101, n. 13, p. 5003-5012, jul. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.062>.
24. SUKSONG, W. et al. *Anaerobic Co-Digestion of Palm Oil Mill Waste Residues with Sewage Sludge for Biogas Production*. *Energy Procedia*, p. 790, 26 maio 2017.
25. VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 1.