

## **1094 - AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO DESEMPENHO E PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE UM DIGESTOR ANAERÓBIO A PARTIR DA CODIGESTÃO DE LODO DE ETE COM RESÍDUOS ORGÂNICOS URBANOS E INDUSTRIAIS**

**Ana Paula Cristina dos Santos Ojea** <sup>(1)</sup>

Engenheira Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Pós-graduada em Gerenciamento e Execução de Obras (IDD), Mestranda em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – Universidade Federal do Paraná (UFPR), Engenheira Projetista da Gouvêa da Costa Consultoria e Projetos de Engenharia.

**Thiago Marendá** <sup>(2)</sup>

Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Engenheiro Químico pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR).

**Orlando Antonio Duarte Hernandez** <sup>(3)</sup>

Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR).

**Miguel Mansur Aisse** <sup>(4)</sup>

Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e Professor Permanente do PPGERHA/UFPR.

**Endereço** <sup>(1)</sup>: PPGERHA – UFPR. Centro Politécnico, Bloco V, Primeiro andar, Jd. das Américas - Curitiba - Paraná, CEP: 81.531.990; Tel: +55 (41) 3361-3144 - e-mail: anapaulasantos@ufpr.br.

### **RESUMO**

O manejo, gerenciamento e disposição final dos resíduos sólidos consistem em desafios para o desenvolvimento sustentável. Especificamente, para as empresas de saneamento, a destinação do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto consiste num grande problema ambiental. Neste contexto, a digestão anaeróbia é uma alternativa promissora para o tratamento de resíduos orgânicos, incluindo lodo de ETE, dejetos de animais, culturas agrícolas entre outros. O biogás, subproduto do processo de digestão, pode ser considerado uma fonte alternativa para produção de energia. O potencial de geração de biogás, e o teor de metano componente deste biogás, está diretamente ligado a composição macromolecular dos substratos afluentes ao processo de digestão anaeróbia. Este trabalho integra a etapa preliminar de análise de um sistema de biodigestão anaeróbia, em escala plena, que realiza a codigestão de lodo de ETE com resíduos orgânicos urbanos e industriais. Nesta etapa, foram levantados os fluxos de processos da estação de tratamento de esgoto, que emprega sistema de lodos ativados tipo convencional, e da usina de biodigestão anaeróbia e geração de energia, os dados de operação, cargas afluentes ao sistema de biodigestão, produção de biogás e correspondente fração de metano. Com os dados foram calculadas a taxa de aplicação de sólidos voláteis, tempo de detenção, e indicadores de produção de biogás e produção de metano. A taxa de aplicação média de SV sobre o digestor, aquecido e misturado, foi 1,99kg/m<sup>3</sup>. d, caracterizando um sistema de alta taxa. O tempo de detenção calculado foi de 21 dias, muito próximo ao tempo de detenção adotado na operação do sistema, de 19 dias. O indicador de produção de biogás obtido nos cálculos foi de 0,72 Nm<sup>3</sup>/kgSV.d, e a fração levantada de metano na composição do biogás foi de 59,30%. A avaliação preliminar do sistema permitiu a verificação do seu desempenho, contudo observa-se que a fração de metano, na composição do biogás, está um pouco abaixo do apresentado na literatura, o que pode sinalizar a ocorrência de algum componente fator de inibição da rota metanogênica do processo bioquímico de digestão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biogás, Digestão Anaeróbia, Lodos Ativados, Lodo de ETE, Resíduos Orgânicos.

### **INTRODUÇÃO**

O manejo, gerenciamento e disposição final dos resíduos sólidos, tanto do tratamento de esgoto sanitário quanto da coleta urbana, são desafios a serem superados para atendimento das diretrizes do desenvolvimento sustentável, conforme indicado no Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB, 2019). Em específico

para as empresas de saneamento, sejam elas públicas ou privadas, a destinação do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto consiste em um grande problema ambiental (METCALF e EDDY, 1991).

O volume de lodo gerado no processo de tratamento de esgotos tem sua variação de acordo com o tipo de tratamento. A determinação do processo de tratamento, de uma estação de tratamento de esgotos (ETE), acontece em função da eficiência necessária para a remoção de carga orgânica, nutrientes e patógenos. Normalmente os processos aeróbios são escolhidos quando há a necessidade de maior eficiência na remoção de carga orgânica e/ou nutrientes (JORDÃO E PESSÔA, 2014). Contudo, nos processos aeróbios, em especial o de lodos ativados, ocorre maior geração de lodo, se comparados aos processos anaeróbios (Andreoli, et al. 2001). A tabela 1 apresenta o volume de lodo produzido por processo de tratamento.

**Tabela 1: Volume de produção de lodo por tipologia de tratamento.**

| TIPO DE SISTEMAS                    | VOLUME DE LODO PRODUZIDO (L/HAB.D) |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| Lagoa Anaeróbia                     | 0,1 – 0,15                         |
| Lagoa de Estabilização Facultativa  | 0,15 – 0,45                        |
| Lagoa Aerada Facultativa            | 0,08 – 0,6                         |
| Reator UASB                         | 0,2 – 0,6                          |
| Filtro Biológico de Alta Carga      | 1,4 – 5,2                          |
| Lodos Ativados – Aeração Prolongada | 3,3 – 5,6                          |
| Lodos Ativados – Convencional       | 3,1 – 8,2                          |

Fonte: ANDREOLI et al. (2001)

Quando não ocorre a fermentação do lodo, na fase líquida do tratamento biológico, o lodo residual (fase sólida) é caracterizado pela alta concentração de microorganismos patogênicos, odor e pelo potencial de atração de vetores, devido a isto há a necessidade de estabilização, para a disposição final acontecer de forma segura e não causar impactos ao meio ambiente, ou à saúde da população (JORDÃO E PESSÔA, 2014). A digestão anaeróbia é um processo de estabilização biológica que ocorre por meio da oxidação biológica do conteúdo volátil, no qual, microorganismos convertem compostos orgânicos complexos, de elevado peso molecular, em produtos mais simples, são eles matéria orgânica estabilizada, e biogás (CAMPOS et al.,1999).

Chernicharo (2007) descreveu os quatro estágios do processo bioquímico da digestão anaeróbia, são eles hidrólise, acidogênese, acetogênese, e por fim metanogênese (ou sulfetogênese), sendo a metanogênese o estágio responsável pela presença de gás metano na composição do biogás. Ainda, no processo bioquímico, as rotas metabólicas dependem diretamente da composição química do substrato, portanto, se o substrato possuir presença significativa de compostos a base de enxofre (sulfetos) ocorre a sulfetogênese. Na sulfetogênese, a capacidade de utilizar o acetato e hidrogênio, torna as bactérias responsáveis por este processo agentes competidores por substratos comuns aos das metanogênicas, responsáveis pelo processo de metanogênese.

O biogás, gerado no processo de digestão anaeróbia, é composto por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor d'água, amônia ( $\text{NH}_3$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), e, em menores concentrações, outros compostos (BORTH, 2021). Devido a presença de gás metano, o biogás é considerado uma fonte renovável de energia. O potencial de geração de biogás, e correspondente teor de metano componente deste biogás, está diretamente ligado a composição macromolecular dos substratos afluentes ao processo de digestão (FONOLL et al. 2015). O metano tem o poder calorífico inferior de 35,9 MJ. Nm<sup>-3</sup> e o poder calorífico do biogás é de aproximadamente 21,5 MJ. Nm<sup>-3</sup>, cerca de 67% do poder calorífico inferior do gás natural (SILVEIRA et al.,2015). De acordo com Andreoli et al. (2014), a produção de biogás é estimada em 0,8 m<sup>3</sup>/kg de sólidos voláteis destruídos, e na composição típica do biogás o percentual de metano está na faixa de 60 a 70%.

Miki (2017), aborda um estudo realizado pelo PROBIOGÁS (Programa de Cooperação Técnica entre o Brasil e a Alemanha) no qual indica que a viabilidade econômica do uso do biogás, para cogeração de energia para ETES, acontece a partir do atendimento de no mínimo 30 mil habitantes (equivalente  $\pm 60$  L/s). Em países desenvolvidos como os EUA, a WERF apresentou um levantamento no qual o potencial de energia a partir do biogás, no ano de 2011, era na faixa de 200 a 400 MW, aproximadamente 4% da energia consumida em sistemas de água e esgoto no país.

Dentre as vantagens da digestão anaeróbia, estão a redução do volume dos resíduos, a estabilização dos resíduos sólidos afluentes, o abatimento de microorganismos patogênicos, a possibilidade da utilização do subproduto sólido no solo para fins agrícolas ou recuperação de solos degradados, e a geração de energia (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

A codigestão de resíduos sólidos orgânicos para produção de biogás apresenta vantagens em relação a digestão de um único substrato, como melhor rendimento do biogás (SUKSONG et al., 2017). Com isto, a codigestão anaeróbia do lodo, proveniente de estações de tratamento de esgoto, juntamente com resíduos orgânicos, tem se apresentado como uma opção promissora para a estabilização do lodo, gerenciamento dos resíduos orgânicos, e fonte alternativa e renovável para produção de energia. Diversos trabalhos abordam a digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, tais como lodo de esgotos, resíduos vegetais (Miki, 2017; Edwiges, 2017; Xu; Gong; Dai, 2020), estabelecendo relações entre concentração de sólidos, fração volátil, composição química dos resíduos afluente aos digestores, eficiência da digestão, produção, medição e composição do biogás.

## OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo a avaliação preliminar do desempenho e produção de biogás do digestor anaeróbio, a partir da codigestão de lodo, proveniente do tratamento de esgoto sanitário, com resíduos orgânicos urbanos e industriais. Os objetivos específicos desta pesquisa constituem em verificar os resíduos orgânicos afluentes ao digestor, analisar o desempenho do digestor e analisar a produção, medição e composição do biogás produzido a partir da codigestão.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em escala plena, a partir de uma usina de biodigestão anaeróbia e geração de energia elétrica, implantada em 2019, instalada ao lado de uma estação de tratamento de esgoto (ETE), em Curitiba/PR.

A ETE que compõe o estudo, em funcionamento desde 1980, operava com o sistema de lodos ativados com aeração prolongada (AISSE, 1985), mas foi modificada, recentemente, para lodos ativados convencional. Atualmente a estação atende 1.300.000 habitantes, com vazão média de tratamento de 2.520 L/s, e eficiência superior a 90% na remoção de DBO. O fluxo de tratamento da fase líquida se inicia com o tratamento preliminar, compreendendo gradeamento e desarenação, o esgoto efluente do tratamento preliminar segue para os decantadores primários, e posteriormente é encaminhado ao tratamento secundário tipo lodos ativados, composto por tanques de aeração, tipo valos de oxidação, e decantadores secundários.

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.

A usina de biodigestão, instalada ao lado da ETE, realiza a codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos provenientes da ETE (lodo sanitário) combinada com resíduos orgânicos de frutas, legumes, verduras e hortaliças, provenientes da Central de Abastecimento do Paraná S.A – CEASA, e resíduos orgânicos de comércio e indústrias locais, na forma de resíduos orgânicos sólidos ou líquidos.

Parcela do lodo misto, gerado na ETE vizinha, é bombeado por bombas helicoidais até a usina de biodigestão, e encaminhado diretamente para desaguamento, realizado em mesas desaguadoras. O lodo chega aos equipamentos de desague com teor de sólidos de aproximadamente 3%, e sai com o teor de sólidos de aproximadamente 7%. Após o desague o lodo é encaminhado ao primeiro tanque de mistura, no qual acontece a primeira fase da digestão anaeróbia, a acidificação.

Os resíduos orgânicos chegam à planta da usina por meio de caminhões, e são transportados por rosca transportadora ao moinho de martelos, no qual acontece a moagem dos resíduos. Os resíduos moídos são encaminhados ao segundo tanque de mistura, no qual também acontece a acidificação.

O produto acidificado, efluente dos dois tanques de mistura, é bombeado por bombas helicoidais aos tanques biodigestores. Os biodigestores anaeróbios, objetos deste estudo, são aquecidos por serpentinas que conduzem água quente no interior do digestor. O aquecimento da água se dá pelo calor produzido nos motores quando realizam a conversão de biogás em energia elétrica.

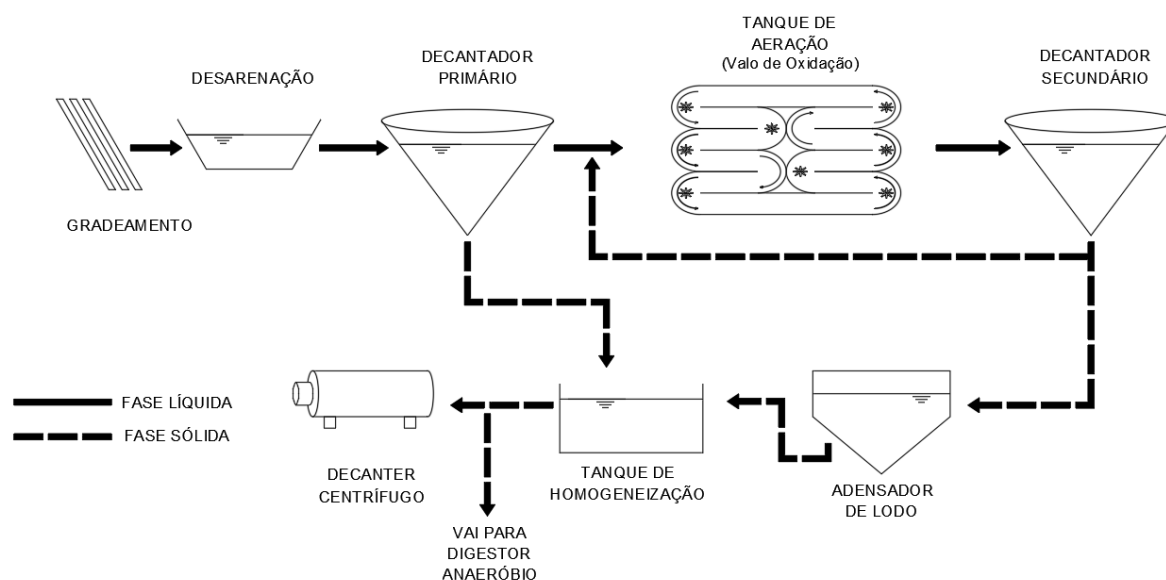
O digestato, efluente dos tanques digestores, vai para o tanque de pós digestão, no qual acontece a separação de gás e sólidos (biogás e digestato). O biogás gerado no processo vai para o sistema de conversão de biogás em energia, compreendidos por motores de ciclo Otto.

O digestato, efluente o tanque de pós digestão, é encaminhado para a prensa desaguadora, saindo da prensa com teor de sólidos de aproximadamente 20%. O efluente da prensa é direcionado ao sistema de secagem, composto por secador tipo rotativo, saindo do secador com teor de sólidos na faixa de 80 a 90%.

O ciclo de processo da usina é fechado, tendo todos os subprodutos aproveitados: o digestato final, seco, é encaminhado para aproveitamento no coprocessamento em fábricas de cimento, e o biogás, que é aproveitado em sua máxima eficiência na mesma planta, convertido dentro da usina em energia, a qual é distribuída na rede elétrica urbana.

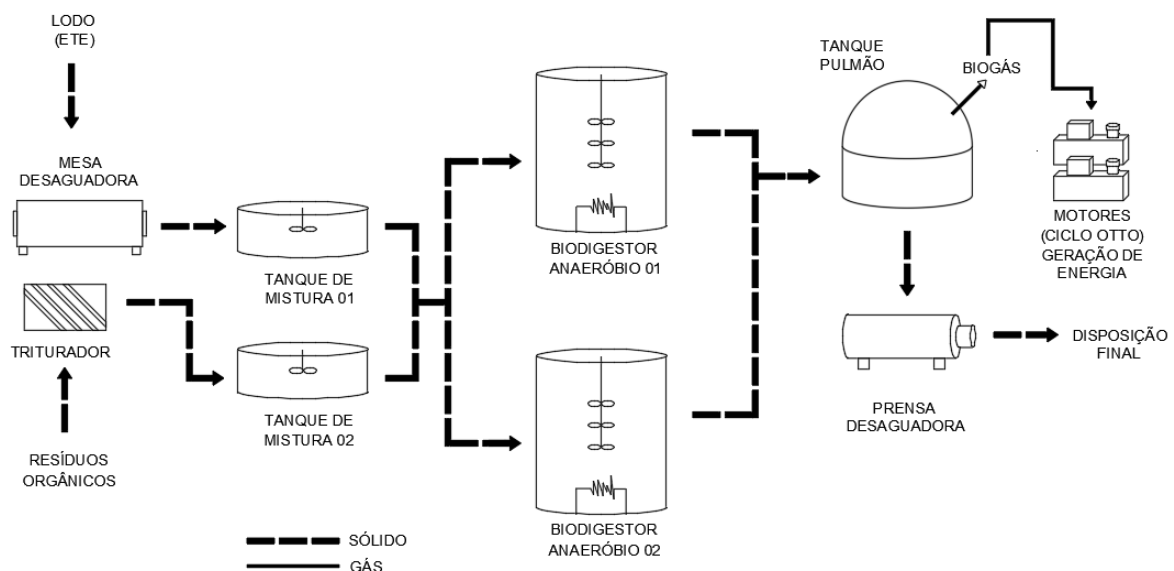
A metodologia empregada na etapa preliminar foi a visita na ETE e na usina de biodigestão, com o posterior desenvolvimento dos fluxogramas de processos. Os fluxogramas foram realizados a partir do levantamento local dos processos de operação da ETE e da usina de biodigestão, alinhado com informações concedidas pelas equipes de gestão da ETE e da usina.

O primeiro fluxograma desenvolvido foi o da ETE, e apresentado na Figura 1.



**Figura 1: Fluxograma simplificado de processo - Estação de Tratamento de Esgoto**  
Fonte: Autores (2022)

O segundo fluxograma, correspondente ao processo da Usina de Biodigestão, está apresentado na Figura 2.



**Figura 2: Fluxograma simplificado de processo - Usina de Biodigestão**

Fonte: Autores (2022)

Todo o processo da usina é automatizado e controlado por uma central, na qual a equipe técnica acompanha o funcionamento dos equipamentos, dados e informações pertinentes ao processo.

Após o desenvolvimento dos fluxogramas de processo, foram levantados, junto a equipe de gestão da usina, os dados diários de volume e características do lodo, proveniente da ETE, bem como os dados de características e peso dos resíduos orgânicos. Os dados correspondem ao período de três meses consecutivos, são eles julho, agosto e setembro de 2022.

A metodologia de levantamento dos dados, adotada pela equipe de operação da usina de biodigestão, ocorre da seguinte forma:

### **Resíduos Orgânicos**

Os resíduos orgânicos chegam à usina em caminhões, estes são pesados em balança (tipo rodoviária) na entrada e na saída da usina, a diferença do peso (entrada-saída) é equivalente ao peso dos resíduos depositados na usina. Amostras dos resíduos são recolhidas, para análise de sólidos e da fração volátil em laboratório local.

Destaca-se que, antes do aceite dos resíduos na usina de biodigestão, acontece um processo de seleção a partir do relatório de caracterização do resíduo (padrão ABNT NBR 10.004), no qual a equipe técnica da usina verifica a qualidade do resíduo, e analisa se este pode integrar ou não o processo de biodigestão, de acordo com suas características físico-químicas.

### **Lodo da ETE**

O lodo de esgoto, lodo misto, proveniente da ETE vizinha, tem sua vazão medida por medidores de vazão, posicionados na entrada da usina de biodigestão. São registrados os dados diários do volume de lodo que é recepcionado na usina.

### **Vazão e qualidade do biogás**

Na usina de biodigestão há equipamentos instalados para medição da vazão e da composição do biogás. O equipamento com função de medir a vazão do biogás é o medidor tipo Vortex - Höntzsch (UVA-Ex-d -VA40-E-10), e o equipamento que identifica a composição do biogás é o medidor multigases - Sewerin (Multitec 560). O registro de vazão do biogás é realizado diariamente, e o levantamento da qualidade do biogás realizado quatro vezes ao dia.

### Processamento dos dados

Neste trabalho, a relação de sólidos voláteis por sólidos totais (SV/ST) foi adotada de acordo com os valores médios comunicados pela empresa gestora da usina, parametrizados com estudos de referência. A fração de sólidos voláteis adotada nos cálculos para os resíduos provenientes do CEASA foi de 92%, baseado na pesquisa desenvolvida por Edwiges (2017), para os resíduos especiais a fração adotada foi de 80%, conforme apresentado por Cassini (2003), e para o lodo proveniente da ETE a fração de sólidos voláteis adotada foi de 70%, conforme indicado por Andreoli et al (2014).

Na tabela 2 e na figura 3, apresentadas a seguir, estão os valores médios e máximos mensais de sólidos voláteis correspondente a cada resíduo orgânico afluente ao sistema de biodigestão. Estes dados foram utilizados na análise de desempenho da codigestão anaeróbia.

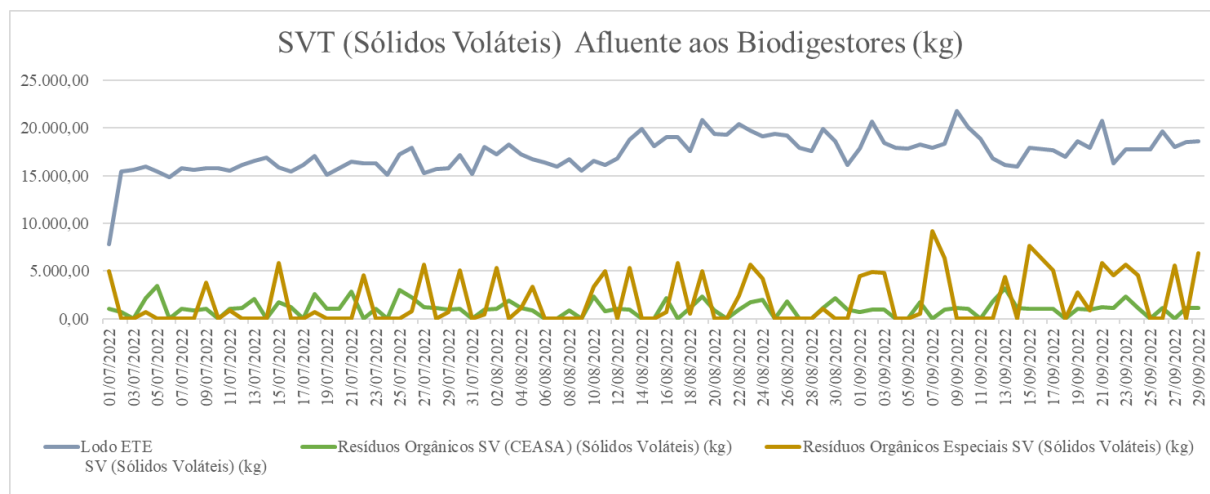
**Tabela 2: Sólidos Voláteis - Afluentes aos Biodigestores Anaeróbios**

| SV AFLUENTES (SÓLIDOS VOLÁTEIS) (KG) |           |           |           |                  |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| DESCRIÇÃO / MÊS                      | JUL/22    | AGO/22    | SET/22    | MÉDIA DO PERÍODO |
| Lodo ETE (Médio)                     | 15.701,03 | 18.109,55 | 18.243,85 | 17.351,48        |
| Lodo ETE (Máximo)                    | 17.887,04 | 20.856,78 | 21.745,47 | 20.163,10        |
| RSO (CEASA) (Médio)                  | 1.088,34  | 1.587,14  | 3.002,79  | 1.892,76         |
| RSO (CEASA) (Máximo)                 | 5.834,70  | 5.859,42  | 9.221,52  | 6.971,88         |
| ROE (Médio)                          | 1.088,34  | 1.587,14  | 3.002,79  | 1.892,76         |
| ROE (Máximo)                         | 5.834,70  | 5.859,42  | 9.221,52  | 6.971,88         |

Fonte: Usina de biodigestão, 2022.

\*RSO – Resíduos Sólidos Orgânicos (CEASA);

\*ROE – Resíduos Orgânicos Especiais.



**Figura 3: Sólidos Voláteis - Afluentes aos Biodigestores Anaeróbios**

Fonte: Usina de biodigestão, 2022.

Também, com a equipe de gestão da usina, foram levantados nesta etapa os dados do biogás produzido, com o correspondente percentual de metano.

A metodologia de análise adotada, a partir dos dados relacionados, foi a verificação das taxas e índices de produção correspondentes ao processo. Sobre estes resultados foi realizada uma avaliação comparativa, tendo como parâmetros de referência os dados da ABNT NBR 12.209 (2011), e literaturas correlatas.



A taxa de aplicação de sólidos voláteis (Txa) foi obtida a partir da divisão do peso médio diário de sólidos voláteis (SV) afluente ao biodigestor pelo volume útil do digestor, de acordo com a seguinte equação:

$$Txa = \frac{SV \text{ (kg)}}{\text{Volume dos Digestores (m}^3\text{)}} \quad \text{equação (01)}$$

O tempo de detenção hidráulica (TDH) foi calculado a partir da divisão do volume útil do digestor pela vazão (Q) da mistura afluente ao biodigestor, conforme a seguinte equação:

$$TDH = \frac{\text{Volume dos Digestores (m}^3\text{)}}{Q \text{ (m}^3\text{/d)}} \quad \text{equação (02)}$$

Sendo a vazão (Q):

$$Q = \frac{M}{10TS} \quad \text{equação (03)}$$

Em que:

M= Massa de sólidos afluente

TS=Teor de sólidos

O primeiro indicador de produção de biogás e gás metano foi calculado a partir dos dados diários de volume de biogás produzido, e correspondente fração de metano, divididos pelo peso total de sólidos solúveis voláteis destruídos (SV).

$$\text{Indicador de produção 01. a: } \frac{\text{Volume de biogás (Nm}^3\text{.d)}}{\text{SV destruído (kg)}} \quad \text{equação (04)}$$

$$\text{Indicador de produção 01. b: } \frac{\text{Volume de gás metano (Nm}^3\text{.d)}}{\text{SV destruído (kg)}} \quad \text{equação (05)}$$

O segundo indicador de produção de biogás e gás metano foi calculado a partir dos dados diários de volume de biogás produzido, e correspondente fração de metano, divididos pelo volume útil total dos digestores.

$$\text{Indicador de produção 02. a: } \frac{\text{Volume de biogás (Nm}^3\text{.d)}}{\text{Volume dos Digestores (m}^3\text{)}} \quad \text{equação (06)}$$

$$\text{Indicador de produção 02. b: } \frac{\text{Volume de gás metano (Nm}^3\text{.d)}}{\text{Volume dos Digestores (m}^3\text{)}} \quad \text{equação (07)}$$

## RESULTADOS

A partir dos dados fornecidos do sistema, e, admitindo uma eficiência na destruição de sólidos voláteis de 50%, foram calculados: as taxas de aplicação, o tempo de detenção equivalente, os índices de produção de biogás e produção de metano correspondentes. Os resultados obtidos, estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 3: Taxa de aplicação de Tempo de Detenção Hidráulica obtidos**

| CARACTERÍSTICAS DOS BIODIGESTORES ANAERÓBIOS - USINA DE BIODIGESTÃO |                  |                  |
|---------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Temperatura do digestor                                             | 37               | °C               |
| ST afluyente (mínimo)                                               | 18.462,27        | kg/d             |
| <b>ST afluyente (média)</b>                                         | <b>28.175,16</b> | <b>kg/d</b>      |
| ST afluyente (máxima)                                               | 38.517,82        | kg/d             |
| SV afluyente (mínimo)                                               | 13.794,43        | kg/d             |
| <b>SV afluyente (média)</b>                                         | <b>20.198,81</b> | <b>kg/d</b>      |
| SV afluyente (máxima)                                               | 28.139,93        | kg/d             |
| Volume Efetivo (por tanque)                                         | 5.080,00         | m³               |
| Número de digestores                                                | 2                | Und              |
| Volume Efetivo total                                                | 10.160,00        | m³               |
| <b>Taxa de aplicação calculada (Txa) para SVmín</b>                 | <b>1,36</b>      | <b>kgSV/m³.d</b> |
| <b>Taxa de aplicação calculada (Txa) para SVmed</b>                 | <b>1,99</b>      | <b>kgSV/m³.d</b> |
| <b>Taxa de aplicação calculada (Txa) para SVMáx</b>                 | <b>2,77</b>      | <b>kgSV/m³.d</b> |
| SV destruídos na digestão (Aprox. 50%)                              | 10.099,40        | kg/d             |
| Teor de sólidos médio dos resíduos afluentes                        | 6,00%            |                  |
| Tempo de Detenção (TDH) calculado                                   | 21               | dias             |
| Tempo de Detenção (TDH) praticado                                   | 19               | dias             |

Fonte: Autores, 2022.

**Tabela 4: Indicadores de produção de biogás e gás metano obtidos**

| INDICADORES OBTIDOS - PRODUÇÃO DE BIOGÁS - USINA DE BIODIGESTÃO |                 |                        |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|
| Produção de Biogás (mín)                                        | 1.971,00        | Nm³/d                  |
| <b>Produção de Biogás (méd)</b>                                 | <b>7.271,80</b> | <b>Nm³/d</b>           |
| Produção de Biogás (máx)                                        | 14.028,00       | Nm³/d                  |
| Produção de Gás Metano (mín)                                    | 1.196,08        | Nm³/d                  |
| <b>Produção de Gás Metano (méd)</b>                             | <b>4.312,31</b> | <b>Nm³/d</b>           |
| Produção de Gás Metano (máx)                                    | 8.346,66        | Nm³/d                  |
| <b>Indicador 01.a de produção de biogás calculado</b>           | <b>0,72</b>     | <b>Nm³/kgSV.d</b>      |
| <b>Indicador 01.b de produção de gás metano calculado</b>       | <b>0,43</b>     | <b>Nm³/kgSV.d</b>      |
| <b>Indicador 02.a de produção de biogás calculado</b>           | <b>0,72</b>     | <b>Nm³/ m³digestor</b> |
| <b>Indicador 02.b de produção de gás metano calculado</b>       | <b>0,42</b>     | <b>Nm³/ m³digestor</b> |

Fonte: Autores, 2022.

## ANÁLISE DE RESULTADOS

Conforme apresentado na Tabela 3, as taxas resultantes compreendem uma variação de 1,36 a 2,77 kg/m³. d, o que, de acordo com a ABNT NBR 12.209 (2011) caracteriza uma digestão anaeróbia de alta taxa, pois se processa com taxa de aplicação de SV sobre o digestor na faixa de 1,2 kg/m³.d e 4,8 kg/m³.d.

O tempo de digestão praticado na rotina de operação da usina é de 19 dias, este tempo atende o preconizado em norma, que determina para digestores aquecidos, o tempo de digestão  $\geq 18$  dias. O tempo de digestão calculado para o digestor equivalente foi de 21 dias, ficando muito próximo do praticado na operação real do sistema.

Também atendendo ao preconizado em norma para digestores de alta taxa, os biodigestores deste estudo operam com misturador tipo hélice de agitação interna.



De acordo com o apresentado na tabela 4, o indicador de produção de biogás obtido nos cálculos foi de 0,72 Nm<sup>3</sup>/kgSV.d, muito próximo da produção indicada por Andreoli (de 0,8 Nm<sup>3</sup>/kgSV). O valor médio do percentual metano, componente do biogás, resultante dos cálculos foi 59,30%, um pouco abaixo da faixa indicada por Andreoli, de 60 a 70%.

## CONCLUSÕES

Neste estudo foi possível realizar a caracterização dos biodigestores como alta taxa, a partir da comparação com as diretrizes preconizadas na norma NBR 12.209 (ABNT, 2011) e literaturas correlatas. Os dados recebidos e calculados, subsidiaram a verificação do processo de digestão adotado na usina como de alta taxa, pois o digestor opera misturado e aquecido, com taxa de aplicação média de SV de 1,99 kg/m<sup>3</sup>.d, ou seja, inserido na faixa de 1,2 kg/m<sup>3</sup>. d e 4,8 kg/m<sup>3</sup>.d.

O indicador de produção de biogás dos biodigestores 0,72 Nm<sup>3</sup>/kgSV.d ficou muito próximo ao referenciado em literatura, sendo a referência adotada neste estudo, o citado por Andreoli et al. (2014), de 0,8 m<sup>3</sup>/kg de sólidos voláteis destruídos. A composição de metano obtida, correspondente ao biogás produzido, foi de 59,30%, um pouco abaixo do valor mínimo de desempenho esperado no sistema, a faixa indicada por Andreoli é de 60 a 70%. Como a finalidade do sistema de biodigestão é a produção de energia a partir do gás metano, componente do biogás, este indicador pode sinalizar a ocorrência de algum componente, fator de inibição da rota metanogênica no processo bioquímico de digestão.

Com isto, para a finalidade de obtenção de um biogás com maior concentração de metano em sua composição, indica-se o estudo da composição bioquímica do substrato afluente aos biodigestores, para permitir assim a predominância da metanogênese no processo bioquímico, tendo como possível resultado o aumento no percentual de gás metano na composição do biogás.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004: ABNT NBR 10.004:2004. Resíduos Sólidos – Classificação.
2. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011: ABNT NBR 12.209:2011. Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário.
3. AISSE, M. M. Sedimentação de lodo secundário obtido no processo de lodos ativados. Orientador: Jurandir Povinelli. 228 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 1985.
4. ANDREOLI, C. V. e PINTO, M. A. T. Processamento de lodos de estações de tratamento de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 282 p. 2001.
5. ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. V. FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG, 2014.
6. BORTH, P. L. B. Influência da adição de resíduo lignocelulósico no desempenho da digestão anaeróbia de resíduos alimentares. Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes. 2021. 146 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, Londrina-PR, 2021.
7. CAMPOS, J.R. (coord.) Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 1999.

8. CASSINI, S.T. (coord.) Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 2003.
9. CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios. 2a.ed. Departamento de engenharia Sanitária e Ambiental da UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG. Belo Horizonte. 2007.
10. EDWIGES, T. Biodigestão anaeróbia de resíduos vegetais provenientes de central de abastecimento. Orientador: Dra. Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa. 2017. Tese (Doutorado), UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ UNIOESTE. Cascavel-PR, 2017.
11. FONOLL, X. et al. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and fruit wastes: Evaluation of the transitory states when the co-substrate is changed. Chemical Engineering Journal, v. 262, p. 1268–1274, 2015.
12. JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 7ª Edição. Rio de Janeiro. 2014.
13. METCALF, A.; EDDY, M.S. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. New York: McGraw-Hill International Editions, 3rd ed., 1991.
14. MIKI, M. Vicissitudes dos digestores anaeróbios de lodo no Brasil. Revista DAE, São Paulo, n. 1678, ed. 207, set. 2017.
15. PLANSAB. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Plano Nacional de Saneamento Básico. Brasília, Brasil. 25 jul. 2019.
16. SILVEIRA, B. et al. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Probiogás. Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH – GIZ. Brasília. 2015.
17. 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.
18. XU, Y.; GONG, H; DAI, X. High-solid anaerobic digestion of sewage sludge: achievements and perspectives. Frontiers of Environmental Science & Engineering, [s. l.], n. 71, 2021.