



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**JÚLIA CÂMARA DE FREITAS**

**ANÁLISE DA GERAÇÃO DE BIOGÁS POR MEIO DO MODELO MONTE CARLO  
EM REATOR ANAERÓBIO EM BATELADA**

**CAMPINA GRANDE  
2022**

**JÚLIA CÂMARA DE FREITAS**

**ANÁLISE DA GERAÇÃO DE BIOGÁS POR MEIO DO MODELO MONTE CARLO  
EM REATOR ANAERÓBIO EM BATELADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Marcia Ramos Luiz

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira

**CAMPINA GRANDE  
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

F862a Freitas, Julia Camara de.  
Análise da geração de biogás por meio do modelo Monte Carlo em reator anaeróbio em batelada [manuscrito] / Julia Camara de Freitas. - 2022.  
56 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia , 2022.

"Orientação : Profa. Dra. Marcia Ramos Luiz , Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

"Coorientação: Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira , Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Modelagem matemática. 2. Modelo Monte Carlo. 3. Biogás. I. Título

21. ed. CDD 371.3

**JÚLIA CÂMARA DE FREITAS**

**ANÁLISE DA GERAÇÃO DE BIOGÁS POR MEIO DO MODELO MONTE  
CARLO EM REATOR ANAERÓBIO EM BATELADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental

Aprovada em: 19 / 07 / 2022 .

**BANCA EXAMINADORA**

*Márcia Ramos Luiz*

---

Profa. Dra. Marcia Ramos Luiz  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

*Marcello Maia de Almeida*

---

Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

*Valderi Duarte Leite*

---

Prof. Dr. Valderi Duarte Leite  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

*"Você é mais corajoso do que acredita, mais forte do que parece e mais inteligente do que pensa"*

*Christopher Robin, Ursinho Pooh*

À minha família e amigos, cuja força, amor e paciência tornaram-se o alicerce para eu me tornar uma pessoa melhor e conquistar meus objetivos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e ao Universo pela oportunidade de realizar mais um sonho e fazer acreditar no valor do meu esforço, pois nesse momento é que os olhos marejam na perspectiva de reviver toda trajetória pela qual fui capaz de passar.

Aos meus pais, Ângela e Walter (*In memoriam*), que embora não estejam aqui, espero que vejam minha conquista e sintam orgulho de mim, pois a minha essência vem deles.

Aos meus irmãos, Clarissa e Joaquim, que são minha inspiração diária de vida e de força, que me deram amor e suporte durante toda a minha estrada e que por meio do acalanto deles pude perceber a força que tenho pra superar cada obstáculo, sou imensamente grata e essa conquista também é deles.

Aos meus familiares, em especial, Luiz Alberto e Salete Leite, que deram todo amor e suporte durante a caminhada e se fizeram presentes em cada passo dessa estrada.

A meus professores e mestres, Márcia Ramos Luiz, Fernando Fernandes, Valderi Duarte Leite e Marcello Maia de Almeida, que me deram subsídios para que a cada dia eu me tornasse uma pessoa e uma profissional melhor.

Aos meus amigos que me deram tanta força e alegria, em especial a Milena D'arc, Danielly Abrantes, Emanuela Figueiredo, Joyce Milena, Matheus Brandão e Jesielly Andrade, pela paciência e carinho em cada momento dessa trajetória.

Aos meus companheiros de turma, que sempre se mostraram prestativos e me ajudaram a ser uma pessoa e profissional melhores diante dos desafios.

À Larissa Barreto Barbosa por sempre se apresentar solícita e, por meio de sua pesquisa, tornar este trabalho possível.

E por fim, a cada um dos professores e funcionários da Universidade Estadual da Paraíba que fizeram parte da conquista do Título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

## RESUMO

A modelagem matemática tem como objetivo apresentar novas perspectivas de como solucionar problemas, considerando riscos e buscando prever cenários na busca de dirimir futuras problemáticas. Baseado nessa asserção, estreita-se a perspectiva do que seria o conceito de Modelo de Monte Carlo, baseando-se em uma aproximação matemática com a capacidade de calcular e gerar simulações levando em consideração os dados de entrada como histórico na geração da antevisão do cenário, com a finalidade de analisar dados preditivos na geração de biogás a partir de resíduo alimentício por meio de simulações de Monte Carlo. Este trabalho apresenta um estudo acerca de simulações no Excel utilizando os dados experimentais da dissertação de Larissa Barreto Barbosa com a finalidade de gerar dados preditivos acerca dos parâmetros NTK, Nitrogênio Amoniacal, DQO total, DQO de saída do reator e geração de biogás para a seleção de dados à temperatura de 24°C e Sólidos Totais de 30,6 g/L. Esta proposta mostrou-se satisfatória, com ajuste aceitável, prever a geração de Biogás, assim como suprir lacunas de dados, sendo esta metodologia uma excelente forma de aplicação por fácil utilização por meio do *Excel*, apresentando resultados satisfatórios com ajuste da curva adequado, apesar da apresentação de outliers no estudo de dados reais, o que nos confere um estudo aprofundado da fase experimental.

**Palavras-Chave:** Modelagem Matemática; Monte Carlo; Biogás.



## **ABSTRACT**

Mathematical modeling aims to present new perspectives on how to solve problems, considering risks and seeking to predict scenarios in order to resolve future problems. Based on this assertion, the perspective of what would be the concept of Monte Carlo Model is narrowed, based on a mathematical approach with the ability to calculate and generate simulations taking into account the input data as historical in the generation of the scenario preview. , in order to analyze predictive data on the generation of biogas from food waste through Monte Carlo simulations. This work presents a study about simulations in Excel using experimental data from Larissa Barreto Barbosa's dissertation in order to generate predictive data about the parameters NTK, Ammoniacal Nitrogen, total COD, reactor outlet COD and biogas generation for selection data at 24°C and Total Solids at 30.6 g/L. This proposal proved to be satisfactory, with an acceptable fit, predicting the generation of Biogas, as well as filling data gaps, and this methodology is an excellent form of application for easy use through Excel, presenting satisfactory results with adequate curve adjustment, despite the presentation of outliers in the study of real data, which gives us an in-depth study of the experimental phase.

**Keywords:** Mathematical Modeling; Monte Carlo; Biogas.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Modelo biodigestor anaeróbio em batelada. ....	20
<b>Figura 2</b> – Etapas básicas da digestão anaeróbia.....	21
<b>Figura 3</b> – Sistema de nove reatores.....	33

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Pontos importantes para a escolha do sistema de biodigestão .....	18
<b>Tabela 2:</b> Comparação de Rendimentos de Biogás na Codigestão Anaeróbia de Vários Substratos. ....	27
<b>Tabela 3:</b> Planejamento experimental .....	34
<b>Tabela 4 -</b> Disposição de dados com base na fase de operação do reator .....	35
<b>Tabela 5:</b> Tratamento estatístico dos parâmetros NTK e $N-NH_4^+$ .....	36
<b>Tabela 6 -</b> Configuração Padrão dos Cálculos da Planilha na Fase 1 .....	39
<b>Tabela 7:</b> Equações para cenário otimista e pessimista. ....	41
<b>Tabela 8:</b> Dados simulados NTK Nitrogênio Amoniacal .....	43
<b>Tabela 9:</b> Dados comparativos gerados para fase 4 para NTK. ....	45
<b>Tabela 10:</b> Comparativo dados reais e simulados para geração de Biogás .....	47

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Representação dos dados Parâmetro x Dias: (a) NTK (g/L) x Dias; (b) N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g/L) x Dias; (C) DQOs (g/L) x Dias; (d) DQOt (g/L) x Dias.....	37
<b>Gráfico 2:</b> Biogás x Dias (T1ST1).....	38
<b>Gráfico 3:</b> Gráfico das Simulações de Monte Carlo (a) NTK (g/L) (b) N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g/L) (c) DQOt (g/L) (d) DQOs (g/L). ....	42
<b>Gráfico 4:</b> Comportamento dos dados simulados relativo aos dados reais (a) NTK (b)NNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> .....	43
<b>Gráfico 5:</b> Dados de temperatura discriminados por temperatura x sólidos totais para NTK .....	44
<b>Gráfico 6:</b> Gráfico de Simulação de Nitrogênio Amoniacal .....	45
<b>Gráfico 7:</b> Ajuste dos dados simulados relativo aos dados reais para NTK .....	46
<b>Gráfico 8:</b> Simulações no Modelo de Monte Carlo para Geração de Biogás .....	47
<b>Gráfico 9:</b> Ajuste dos dados simulados relativo aos dados reais para Biogás .....	48
<b>Gráfico 10:</b> Dados simulados e experimentais para geração de Biogás .....	48
<b>Gráfico 11:</b> Dados reais de Geração de Biogás.....	49

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Objetivos .....	14
1.1.1. <i>Objetivo Geral</i> .....	14
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
2.1. Biogás .....	15
2.2. Biomassa.....	16
2.3. Biodigestores.....	17
2.3.1. <i>Biodigestores Anaeróbios</i> .....	19
2.4. Decomposição Anaeróbia .....	21
2.5. Aproveitamento dos Resíduos.....	23
2.6. Fatores Influenciadores da Digestão Anaeróbia.....	25
2.6.1. <i>Temperatura</i> .....	25
2.6.2. <i>Sólidos Totais</i> .....	25
2.7. CODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	26
3. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	29
3.1. Modelagem Matemática Aplicada à Biodigestor.....	29
3.2. Simulação do modelo Monte Carlo.....	30
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	33
4.1. Equipamento .....	33
4.2. Modelagem Matemática .....	34
4.2.1. <i>Coleta e Tratamento dos Dados</i> .....	34
4.2.2. <i>Simulação pelo Método Monte Carlo</i> .....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
REFERÊNCIAS.....	51

## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem matemática surge como uma estratégia para previsão, gestão de riscos e o entendimento de como administrá-los. A análise de dados, nos conduz a uma visão crítica com base numa aproximação matemática, subsidiando uma série de conhecimentos através da geração de cenários. A inserção da modelagem matemática nos estudos laboratoriais ou até mesmo em projetos de grandes escalas, tem se tornado um ponto importante na evolução da ciência, sendo então, por meio desta metodologia, ampliada a capacidade de avaliar e resolver problemas, sem interferir no ambiente físico em estudo.

Com base nessa premissa, a identificação de qual tipo de modelo aplicar ao cenário deve ser conexo ao que se deseja desenvolver e as problemáticas a serem analisadas. Cada metodologia possui uma série de complexidades e singularidades que as definem como sendo eficientes ou não para a aplicabilidade desejada.

Baseado nessa asserção, estreita-se a perspectiva do que seria a modelagem e imerso no conceito está o Modelo de Monte Carlo, criado por John von Neumann e Stanislaw Ulam durante o período da Segunda Guerra Mundial como forma de auxiliar nas tomadas de decisão durante a Guerra, contribuindo para o desenvolvimento das análises de risco dos eventos da época. Sob outra perspectiva, a justificativa do nome é dada por causa das roletas dos Cassinos de Mônaco, a qual representa a aleatoriedade e as diversas probabilidades de um dado número sair (IBM, 2020).

A simulação do Monte Carlo utiliza-se de uma série de dados reais na geração de uma série aleatória como forma de previsão de um possível futuro cenário baseando-se em uma aproximação matemática, podendo-se dizer que a maior vantagem associada a tal método é a capacidade de cálculo e gerar simulações levando em consideração os dados de entrada como histórico na geração da antevisão do cenário.

Utilizando-se deste artifício viabilizado pelo modelo de Monte Carlo, buscou-se inferir a partir de uma série histórica de dados de Biogás, a possível previsão dos parâmetros NTK, Nitrogênio Amoniacal, DQO total, DQO de saído do reator e Geração de Metano. Sabe-se que a geração de biogás se tornou um dos principais meios para aprimorar e mitigar as formas de disposição de resíduos, principalmente os orgânicos, como as verduras e frutas.

Sob essa perspectiva, a geração de Biogás apresenta-se como uma alternativa para reaproveitar os materiais orgânicos supracitados. O processo de geração, por ser inteiramente natural, pode ocorrer dentro de meses, apresentando os primeiros resultados efetivos na média de seis meses.

Considerando este cenário prolongado, a inserção de um modelo pode utilizar dos dados já gerados durante um dado período a fim de prever em quanto tempo será o cenário otimista em geração de Biogás e de melhor desempenho do reator, diminuindo tempo de bancada e utilização de reagentes e energia por parte do sistema, otimizando o trabalho experimental, com a geração dos dados preditivos.

Mediante o fato exposto, a utilização do Modelo de Monte Carlo vale-se dos dados já gerados em laboratório, para fornecer respostas matemáticas de futuros cenários na geração do Biogás do sistema trabalhado pela pesquisadora Larissa Barreto Batista em sua dissertação defendida em 2016, pelo Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental – Universidade Estadual da Paraíba, sob o título “influência da concentração de sólidos totais e da temperatura no processo de co-digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos”, orientada por Valderi Duarte Leite.

O trabalho, então, proposto possui importância, considerando a busca contínua da economia e otimização de processos em projetos de pesquisa, os quais podem atingir estudos gradualmente mais avançados buscando o aprimoramento, não só do sistema real, mas também, do modelo utilizado.

## **1.1. Objetivos**

### ***1.1.1. Objetivo Geral***

Analisar dados preditivos na geração de biogás a partir de resíduo alimentício por meio de simulações de Monte Carlo.

### ***1.1.2. Objetivos Específicos***

- Simular matematicamente e verificar o potencial de geração de biogás a partir de resíduo alimentício aplicando-se o modelo de Monte Carlo.
- Realizar tratamento estatístico com base em um banco de dados para verificar o comportamento das variáveis a serem simuladas.
- Avaliar a influência de variáveis como temperatura e concentração de sólidos totais na degradação anaeróbia do resíduo alimentício.



## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Biogás

O biogás é uma mistura gasosa combustível composta, principalmente, de 60% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e 35% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), amônia ( $\text{NH}_4$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e aminas voláteis, derivada da atividade biológica durante a decomposição de resíduos orgânicos em meio anaeróbio (sem a presença de oxigênio) (GARCILASSO et al., 2018).

O Biogás é um dos principais biocombustíveis, no Brasil a oferta de Biogás cresceu de 0,01% em 2010 para 0,05% em 2015 (EPE, 2017), mesmo sendo um crescimento pequeno, é um biocombustível que galga para assumir um protagonismo no Brasil.

O metano é um importante biocombustível obtido a partir de fontes orgânicas biodegradáveis, permitindo produção de energia renováveis. Os resíduos podem ser agrícolas, vegetais ou animais e urbanos ou industriais. O biogás tem se tornado uma alternativa entre as energias renováveis. Dessa forma, cada vez mais, países vêm criando leis que incentivem e regularizem a utilização de biodigestores anaeróbios em propriedades agrícolas (GUIMARÃES; GALVÃO, 2015).

O biogás pode ser usado como uma fonte de energia limpa e renovável, ganhando ênfase na sua baixa emissão de gases poluentes, podendo substituir os combustíveis derivados do petróleo. Pode ser utilizado para geração de energia elétrica, produção de fertilizantes, gás de cozinha, entre outros. Quando uma indústria investe nesse meio de tratamento de resíduos, além de ter uma forma correta de destinação, terá benefícios voltados para seu próprio funcionamento, chamado de cogeração, diminuindo seus gastos com outras demandas (AQUINO et al., 2015).

O biogás é produzido a partir da ação de diferentes tipos de microrganismos sobre uma biomassa, que é um material de fácil decomposição em algumas condições específicas, como temperatura, pH, presença ou não de oxigênio, nível de umidade e quantidade de bactérias. A biomassa é considerada a principal matéria-prima para produção de biogás, podendo ser obtida de resíduos sólidos (ARAÚJO, 2017).

O processo de geração do biogás pode ser dividido em cinco fases, a partir de Chernicharo (2007):

- Fase aeróbia: apresenta-se como uma fase de curta duração, existindo apenas enquanto houver oxigênio disponível no meio. Nessa fase, os elementos orgânicos biodegradáveis sofrem decomposição pela ação dos microrganismos.
- Fase anóxica: de transição, ocorre um decaimento no nível de oxigênio molecular, começando a se estabelecer condições anaeróbias.
- Fase ácida: ocorre uma aceleração da atividade microbiana, o que eleva a produção de ácidos orgânicos em meio a diminuição do pH.
- Fase de metanogênica: microrganismos metanogênicos convertem o ácido acético e gás hidrogênio em Metano (CH<sub>4</sub>) e Gás Carbônico (CO<sub>2</sub>). Esta conversão ocorre em meio estritamente anaeróbio e com o pH elevado.
- Fase de maturação final: ocorre a diminuição da velocidade de produção de gás, pois uma grande parte dos nutrientes disponíveis já foi degradada ou carregada pelos lixiviados, estando presentes apenas substratos de difícil degradação.

O biogás proveniente da decomposição do material orgânico pode ser utilizado como fonte de energia elétrica, fato que evidencia a importância econômica, social e ambiental desta atividade.

## **2.2. Biomassa**

A biomassa é considerada a principal matéria-prima para produção de biogás podendo ser obtida de resíduos sólidos urbanos (animais, vegetais, industriais e florestais). Algumas indústrias que geram resíduos agroindustriais têm como principal destino a nutrição de animais ou utilização do resíduo como adubo em plantações. Com a geração dos resíduos surgem muitos estudos de como tratar esse problema, tendo uma grande variedade de métodos físicos, químicos e biológicos, como destaque a produção do biogás (FRANCO; NASCIMENTO FILHO, 2014).

Por biomassa denominam-se quaisquer materiais passíveis de decomposição pela ação de diferentes tipos de microrganismos. A biomassa decomposta sob a

ação de bactérias metanogênicas produz biogás sob condições específicas que incluem: temperatura, pH, relação Carbono/Nitrogênio, presença ou não de oxigênio, nível de umidade e quantidade de bactérias por volume de biomassa. É possível utilizar resíduos de indústrias cervejeiras, conhecido como bagaço do malte, que oferece grande capacidade bioenergética, como fonte de produção de biogás, através da digestão anaeróbia, tendo como principal composição uma grande quantidade de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (ARAÚJO, 2017).

### **2.3. Biodigestores**

Um biodigestor, digestor ou biorreator pode ser definido como uma câmara de fermentação fechada, onde a biomassa sofre a digestão por meio das bactérias anaeróbicas produzindo biogás. Em outras palavras, trata-se de um recipiente completamente fechado e vedado, impedindo qualquer entrada de ar; construído de alvenaria, concreto ou outros materiais, onde é colocado o material a ser degradado para posterior fermentação (LUSTOSA; MEDEIROS, 2014).

Existem vários tipos de biodigestores, porém os mais difundidos são chineses, indianos e canadenses. Cada um possui sua particularidade, porém com objetivos semelhantes de criar condição anaeróbia, ou seja, total ausência de oxigênio para que a biomassa seja completamente degradada. O biodigestor tem como principal vantagem o seu baixo custo operacional e fácil implantação, com simples operação, manutenção e controle, mostrando ter uma alta eficiência (GONÇALVES, 2012).

De acordo com esse mesmo autor, outros pontos que os fazem ser visto como uma nova alternativa para o aproveitamento e tratamento de resíduos é a possibilidade de ser usado em pequena escala, sem depender diretamente de grandes interceptores, tem elevada vida útil e um retorno positivo, permitindo a redução do potencial poluidor e dos riscos sanitários dos dejetos ao mínimo, promove a geração do biogás e do biofertilizante.

Para escolha do biodigestor é importante estudar a biomassa que será utilizada e entender o processo de operação do equipamento. Parâmetros básicos que se deve ter atenção é o Tempo de Retenção de Microrganismos (TRM), Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) e o Tempo de Retenção de Sólidos (TRS). Para o biodigestor do tipo batelada é analisado apenas o TRH, pois será o tempo que o

afluente precisa ficar retido para ter o processo de biodigestor completo (FRIGO et al., 2016).

De acordo com Kunz et al. (2019), vários pontos importantes devem ser considerados para escolha do sistema de biodigestão. Esses pontos podem ser visualizados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Pontos importantes para a escolha do sistema de biodigestão

<b>Tecnologia</b>	<b>Pontos-chave</b>	<b>Opções</b>
<b>Sistema de alimentação</b>	Tipo de biodigestor e de matéria-prima para alimentação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentação descontínua para biodigestores de batelada.</li> <li>• Alimentação contínua ou semicontínua para fluxo em pistão/digestores.</li> <li>• Sistema de alimentação sólido ou líquido, dependendo do conteúdo da matéria seca do substrato.</li> </ul>
<b>Temperatura do reator</b>	Risco para patógenos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura mesofílica quando não há risco de patógenos.</li> <li>• Temperaturas termofílicas quando houver risco de patógenos (ex.: lixo orgânico doméstico).</li> </ul>
<b>Número de fases</b>	Composição de substratos, risco de acidificação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de uma fase quando não há risco de acidificação.</li> <li>• Sistema de duas fases para substratos com um elevado teor de açúcar, amido, proteínas ou de difícil degradação.</li> </ul>
<b>Sistema de agitação</b>	Matéria-prima seca para alimentação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agitadores mecânicos para alta concentração de sólidos no biodigestor.</li> <li>• Sistemas de agitação mecânica, hidráulica ou pneumática para baixa concentração de sólidos no biodigestor.</li> </ul>

Fonte: KUNZ et al., 2019.

### 2.3.1. *Biodigestores Anaeróbios*

No início dos anos 2000, o biogás voltou a ter notoriedade mundial, pelas possibilidades de obter retorno econômico, pela possível redução de emissões de gases do efeito estufa e a perspectiva de realização de rendas com o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, proposto pelo Protocolo de Kyoto, na qual os países desenvolvidos ajudariam aqueles em desenvolvimento a saltarem algumas etapas no processo de desenvolvimento limpo, por meio de financiamentos e transferência de tecnologias, para que eles seguissem um caminho mais curto em direção a uma economia menos intensiva em relação a emissões de GEEs (MOREIRA & GIOMETTI, 2008)

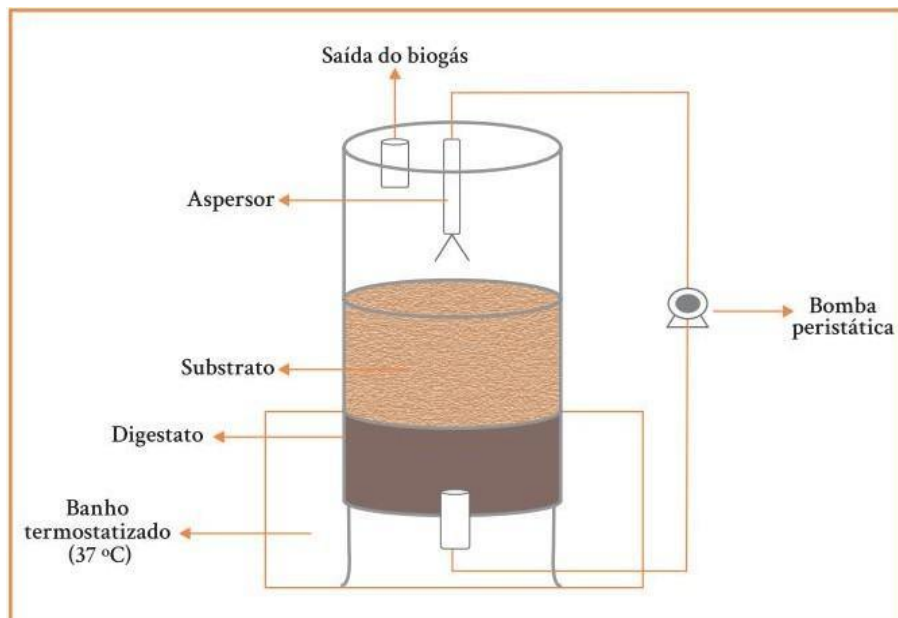
A captação do biogás resultante da decomposição dos resíduos orgânicos compactados em aterros é viável do ponto de vista econômico, energético e ambiental, traz redução de custos para as prefeituras e um destino nobre para o resíduo (SOUZA FILHO et al., 2018). Cada etapa é realizada por diferentes grupos de microrganismos, em simbiose e podem requerer diferentes condições ambientais (KUNZ et al, 2019). Tais reações visam à transformação de substratos em produtos de maior valor agregado.

O processo de biodigestão é interferido por diversos fatores, como temperatura e pH do sistema, alterando a velocidade de reação e o metabolismo microbiano. Os microrganismos produtores de metano são sensíveis à variação de temperatura, sendo recomendado assegurar-se a sua estabilidade, seja através do aquecimento interno ou pelo melhor isolamento térmico da câmara de digestão durante os meses de inverno (BARICHELLO, 2012).

Biodigestores anaeróbios, também conhecidos como “em batelada” é um procedimento feito em cargas, onde será alimentado novamente só após o final do processo. A biomassa será colocada de uma só vez no recipiente do biodigestor e, em seguida, será completamente fechado e vedado, para não permitir a entrada de oxigênio, possibilitando o processo de digestão anaeróbia. Ao final, será possível identificar a atividade microbiana por meio do gráfico de geração de metano, quando há queda da geração de  $\text{CH}_4$ , obtém-se a representação de queda da atividade microbiana e posterior recarga do sistema para nova batelada (NETO et al., 2010).

Na Figura 1 apresenta-se um modelo esquemático de um reator anaeróbio em batelada.

**Figura 1** - Modelo biodigestor anaeróbio em batelada.



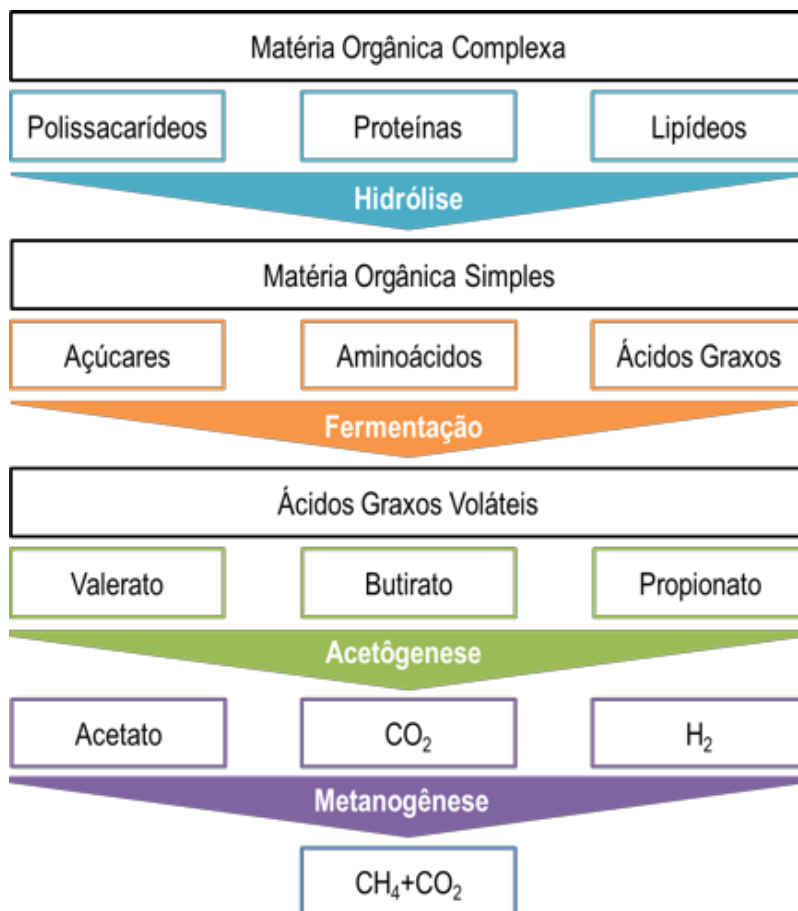
**Fonte:** Marchioro et al. (2018, com adaptações).

A biodigestão anaeróbia é dividida em cinco etapas principais, de acordo com Chernicharo (2007):

- **Hidrólise:** realizada por bactérias fermentativas hidrolíticas, consiste na hidrólise de materiais complexos (polímeros) em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores).
- **Fermentação:** Os produtos solúveis são metabolizados no interior das bactérias fermentativas em ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, além de outras células bacterianas.
- **Acetogênese:** Oxidação dos produtos em substrato para as bactérias metanogênicas (hidrogênio, CO<sub>2</sub> e acetato).
- **Metanogênese:** Fase final do processo global de degradação anaeróbia de compostos em metano e CO<sub>2</sub> efetuada pela bactérias metanogênicas. A depender da afinidade de substrato as bactérias podem ser: Acetoclásticas, ou seja, utilizadoras de Acetato como substrato, ou podem ser Hidrogenotróficas, sendo utilizadoras de Hidrogênio.
- **Sulfetogênese:** ocorre somente na presença do sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) e é realizada por bactérias redutoras de sulfato. Vai depender do substrato ofertado ao

sistema. Dentro da sulfetogênese temos as bactérias sulforedutoras que podem oxidar completamente ou incompletamente, gerando gás carbônico e acetato, respectivamente (Figura 2).

**Figura 2** – Etapas básicas da digestão anaeróbia.



**Fonte:** Chernicharo (2007, com adaptações).

Entender como essas etapas ocorrem e de que forma podem ser afetadas pelas diferentes condições de operação é fundamental para o melhor aproveitamento energético do substrato, especialmente pelo fato de os microrganismos envolvidos na hidrólise e na metanogênese diferem muito em termos de fisiologia, necessidade nutricional, cinética de crescimento e sensibilidade às condições ambientais (D'AQUINO, 2018).

## 2.4. Decomposição Anaeróbia

Segundo Leite et al. (2014), a digestão anaeróbia é considerada como uma alternativa importante para o tratamento de diferentes tipos de materiais, haja vista

propiciar fonte alternativa de energia, que poderá ser usada em substituição aos combustíveis fósseis.

Backes (2011) descreve o processo de decomposição ou digestão anaeróbia como a atividade biológica de transformação de matéria orgânica em biogás, em condições anaeróbias, ou seja, na ausência de oxigênio através da atividade de microrganismos. Esse processo pode ser subdividido em diferentes fases. Em cada fase prevalece o trabalho de determinado tipo de bactéria, no entanto essa prevalência não é absoluta, o que torna as inter-relações complexas.

Nesse processo, diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão de matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, gás sulfídrico, água e amônia, além de novas células bacterianas (MELO, 2011).

Diversas vantagens são apontadas como decorrentes da utilização deste tipo de tecnologia, sobretudo por ser um processo que gera subprodutos que podem ser utilizados como uma fonte alternativa de energia e como biofertilizantes, ricos em nutrientes. Dentre estas vantagens, destacam-se: a produção de biogás, a dispensa de uso de equipamentos sofisticados, visto que o processo se realiza a pressão atmosférica e temperatura ambiente nos climas tropicais, a redução da carga poluidora da matéria orgânica e a dispensa insumos energéticos (PALHARES, 2007).

Para melhorar o processo da decomposição anaeróbia no biodigestor, os resíduos vegetais podem passar por um pré-tratamento, com a finalidade de reduzir as barreiras químicas e físicas, desta forma melhorando a ação dos microrganismos e enzimas na decomposição da biomassa. É dividido em físico, biológico e químico, sendo que cada processo pode aumentar significativamente o rendimento da produção de biogás (CREMONEZ et al. 2018).

O pré-tratamento físico consiste basicamente na redução do tamanho do resíduo, aumentando sua área de contato, modificando sua estrutura e dessa forma, melhorando as atividades das bactérias e enzimas. É um método de pré-tratamento mecânico, podendo ser feito por moinhos ou até trituradores comuns de cozinha. É importante levar em consideração alguns fatores, como o tipo de biomassa, o teor de umidade, o tamanho final que se deseja para a partícula e a quantidade de energia consumida no processo (BASTOS, 2020).



O pré-tratamento biológico ou orgânico, são usados microrganismos para a retirada da ação de barreira dos materiais vegetais, solubilizando-os, favorecendo as atividades enzimáticas. Os fatores que precisam de atenção nessa técnica são a temperatura do meio, para ter um ótimo desenvolvimento do microrganismo, a concentração do substrato, controle do pH e o teor de umidade, mas a dificuldade de manuseio para esse procedimento é um ponto negativo, assim como o seu alto custo (TORRECILHAS et al., 2019).

Por fim, no pré-tratamento químico utilizam ácidos, bases ou solventes orgânicos para auxiliar na hidrólise da hemicelulose em açúcares simples. O uso de uma solução ácida irá possibilitar a hidrólise completa da hemicelulose; os ácidos mais utilizados são o ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido nítrico, ácido fosfórico e ácido acético. O uso de bases vai aumentar a porosidade da celulose, reduzir o grau de polimerização e cristalização e assim remover a lignina, as mais aplicadas nesse processo são hidróxido de sódio, hidróxido de cálcio, amônia e ureia. O solvente orgânico vai quebrar a lignocelulósica em celulose, hemicelulose e lignina (ASSUMPÇÃO, 2015).

## **2.5. Aproveitamento dos Resíduos**

Um dos maiores desafios com que se defronta a sociedade moderna é o equacionamento da geração excessiva e da disposição final ambientalmente segura destes resíduos. A preocupação mundial em relação aos resíduos tem aumentado ante o crescimento da produção, do gerenciamento inadequado e da falta de áreas de disposição final (JACOBI; BESEN, 2011).

Segundo o último relatório do World Bank pelo What a Waste 2.0 em 2018, aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos são geradas anualmente pelo mundo, e espera-se que em 2050 esse número chegue a 3,40 bilhões de toneladas, um aumento de quase 70% (KAZA et al, 2018)

No Brasil mesmo com a Lei 12.305/2010, que prevê a gestão integrada dos resíduos sólidos, a maior parte dos resíduos são destinados para aterros sem especificação e uma parcela significativa ainda é destinada para lixões (WORLD BANK, 2018). Para minimizar esse impacto, alguns países buscam usar tecnologia e inovação, tendo o tratamento como prioridade na gestão.

O uso crescente de materiais renováveis é uma realidade e envolve inovação tecnológica no uso alternativo de recursos naturais, sobretudo nas fibras naturais e dos restos de frutas tropicais do Brasil que tem abundância de matéria-prima. Sendo o Brasil um dos países que mais produz resíduos agroindustriais, como os resíduos de frutas pelas indústrias de polpas, o que tem contribuído para o aumento da produção do lixo orgânico, percebe-se, como consequência, graves problemas ambientais (MARTINS, 2011).

O aproveitamento de resíduos no processamento de novos alimentos tem representado um seguimento importante para as indústrias, principalmente no tocante à demanda por produtos para dietas especiais.

Além do desperdício e combate à desnutrição, há a crescente preocupação com o descarte destes resíduos, que podem levar a problemas ambientais pela presença de substâncias de alto valor orgânico, potenciais fontes de nutrientes para microrganismos, como também a perdas de biomassa e energia, exigindo investimentos significativos em tratamentos para controlar a poluição. Inúmeros estudos utilizando resíduos industriais do processamento de alimentos têm sido realizados visando à redução do impacto ambiental e o desenvolvimento de tecnologias que agreguem valor aos produtos obtidos (PELIZER *et al.*, 2007).

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2018), cada família desperdiça uma quantidade aproximada de 128,8Kg de alimento por ano, o que coloca o país em um dos primeiros lugares no *ranking* dos que mais desperdiçam alimentos no mundo. Importante ressaltar que segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), 8% das emissões de gases do efeito estufa são provenientes da disposição inadequada dos resíduos orgânicos em aterros sanitários (FAO, 2018).

Em conformidade com a pesquisa da Embrapa supracitada, um estudo realizado por Alan Bojanic (2021), a maior perda de alimentos na América Latina é dada pelo grupo alimentício frutas e legumes, ultrapassando 50% de desperdício, em segundo lugar têm-se os tubérculos e raízes, compreendendo a 40%.

Sendo assim, a busca por alternativas que utilizem os alimentos que seriam desperdiçados e dêem um novo destino, seja na forma de composteiras ou até mesmo na geração de metano, por meio de biodigestores.

## **2.6. Fatores Influenciadores da Digestão Anaeróbia**

Segundo Soares (2017), a digestão anaeróbia pode ser influenciada por diversos fatores, variando entre substrato, características do biodigestor, assim como as condições de operação. As interferências no sistema, podem acarretar em um decaimento na produtividade na geração do biogás no reator.

### **2.6.1. Temperatura**

Segundo Mendonça (2009), a temperatura é um dos fatores que influencia na biodigestão anaeróbia, podendo comprometer diretamente na termodinâmica da reação, alterando a velocidade específica de utilização. Segundo Raposo et al. (2011), a digestão anaeróbia pode ocorrer por meio psicrófilo, ou seja, abaixo de 20°C, mesófilas, entre 20°C e 40°C e termófilas, entre 45°C a 60°C. Apesar dos microrganismos anaeróbios poderem se aclimatar às temperaturas de operação fora da faixa ideal, a atividade da biomassa e o desempenho do digestor podem ser adversamente afetados (NETO, 2015).

Para tanto, entra o conceito de temperatura ótima no processo de desenvolvimento de microrganismos e geração de Biogás. A temperatura ótima será a faixa a qual os microrganismos manterão uma atividade metabólica aceitável, gerando portanto quantidade de Biogás de forma notável.

Cada faixa de temperatura apresenta pontos de importância para os estudos da geração de Biogás, embora os reatores sejam de forma majoritária operados em níveis mesófilos. Em meios termófilos o sistema oferece um aumento da taxa de reação, aumento na eficiência e separação de sólido-líquido, além da eliminação de microrganismos patogênicos, porém o consumo de hidrogênio por microrganismos metanogênicos torna-se menos favorável (BARBOSA, 2016).

### **2.6.2. Sólidos Totais**

Sólidos totais podem ser definidos como o somatório de substâncias orgânicas e inorgânicas. Segundo Tchobanoglous et al. (1993), a concentração de sólidos define duas alternativas de tratamento:

- Tratamento anaeróbio com baixa concentração de sólidos: em que massa orgânica putrescível é fermentada com concentração de sólidos totais variando de 4 a 8% e esta alternativa se destina à geração de gás metano, a partir de dejetos humanos, resíduos animais e agrícolas. As maiores dificuldades operacionais desse processo estão relacionadas à adição de água para diluição do substrato e à consequente dificuldade de reutilização do material bioestabilizado.
- Tratamento anaeróbio, com alta concentração de sólidos: este tratamento é caracterizado pela fermentação da massa putrescível com concentração de sólidos totais em torno de 22%; aplicada com o objetivo de recuperação de energia de biomassa apresentando, como principais vantagens, baixo requerimento de umidade e alta taxa de produção de gás.

Consoante com dada afirmativa, Franqueto (2021) revela que o teor de Sólidos Totais (ST) é um parâmetro muito utilizado para medir a biodegradabilidade de um resíduo a ser testado. Para Gueri et al., (2018), a produção diária de biogás depende da quantidade de Sólidos Voláteis (SV) na carga de alimentação do biodigestor, já que os sólidos voláteis representam parte dos sólidos totais suscetíveis a serem biodegradados e convertidos em biogás, comprovando o fator de biodegradabilidade de um resíduo.

## **2.7. CODIGESTÃO ANAERÓBIA**

A codigestão anaeróbia consiste na mistura de dois ou mais substratos no mesmo processo de biodigestão, com a finalidade de melhorar a degradação e aumentar a produção de biogás. O uso de apenas um substrato pode ser insuficiente para se obter um bom resultado, pois muitas vezes não oferece todos os nutrientes necessários para os microrganismos, desta forma, a codigestão anaeróbia é uma alternativa interessante para otimizar esse processo (SILVA, 2020).

Muitas pesquisas têm estudado a codigestão com a combinação de diversos cosubstratos, obtendo resultados positivos, sendo atribuído ao balanço de nutrientes dos substratos e a produção de enzimas que irão aumentar a digestão dos resíduos. Além de melhorar a produção de metano, pode diminuir os custos de investimento e operação, tendo uma aplicação mais eficiente dos equipamentos (OLIVEIRA, 2018).

De acordo com Medeiros (2020), a produção de metano a partir da codigestão de Resíduos Sólidos Orgânicos (RSOs) com Macrófitas Aquáticas, constatou que a adição de no mínimo 10% de *Landoltia punctata* aos RSOs pode melhorar a produção de biogás, potencializando em até 17% e mantendo constante. Ao final do experimento, após 19 dias, obteve-se uma produção acumulada de metano de 308,30– +11,41 NmlCH<sub>4</sub>/gSV, para a proporção de 50LP/50RSO. Na tabela 2, é possível verificar os rendimentos de biogás para cada tipo de resíduo.

**Tabela 2:** Comparação de Rendimentos de Biogás na Codigestão Anaeróbia de Vários Substratos.

<b>Substratos</b>	<b>Rendimento de Biogás (L/kgSV)</b>	<b>Referências Bibliográficas</b>
<b>Estrume de porco e resíduos de óleos vegetais</b>	650	<i>Hidalgo et al. (2015)</i>
<b>Estrume de aves e lamas de ETAR</b>	376	<i>Borowski; Weatherley (2013)</i>
<b>Estrume de porco e lamas de ETAR</b>	400	<i>Borowski; Domanski; Weatherley (2013)</i>
<b>Estrume de porco e glicerol</b>	780	<i>Astals; Nolla-Ardèvol; Mata-Alvarez (2012)</i>

**Fonte:** Domingues (2020).

Domingues (2020) analisou a digestão anaeróbia do lixiviado de suíno (ChS) utilizando o hidrolisado de suíno (HdS) como cosubstrato, obtendo resultados positivos. Sem precisar de um pré-tratamento, a proporção dos substratos de 90,9 % ChS : 9,1 % HdS (v/v) apresentou considerada produção de biogás, atingindo 85 ml de biogás em 31 dias, finalizando após 61 dias, o maior resultado comparado com a literatura.

Lourenço et al. (2019) pesquisaram a produção de biogás a partir da digestão de cascas de banana e laranja, fornecidos pelo Restaurante Universitário da Universidade Federal de Pelotas, passando por um pré-tratamento físico, para reduzir a área superficial e usando como cosubstrato efluente e lodo da parboilização de arroz, obtendo resultados satisfatórios. O melhor desempenho foi

na mistura de 40% de efluente, 20% de solução de casca de laranja ou banana e 20% de lodo, com a casa de laranja a produção de biogás foi de 11.730 dm<sup>3</sup> durante as 168 horas de digestão, com a casa de banana obteve um resultado menor, de apenas 8.490 dm<sup>3</sup>.

### 3. MODELAGEM MATEMÁTICA

A falta de evidências acerca do surgimento da modelagem matemática, não torna mensurável e preciso o tempo a qual esta ciência está presente e ativa. Segundo Silveira et al. (2013), a criação da modelagem matemática pode ser associada a própria criação da matemática, a maior prova é dada pela utilização de artifícios matemáticos, como a geometria plana, pelos egípcios no Século V a.C. para eventos de enchente do Rio Nilo.

A modelagem matemática veio com o princípio de traduzir problemas e “matematizá-los” tornando-os mensuráveis e previsíveis. O conceito moderno, relativo a esta técnica segue algumas controvérsias de seu advento, alguns autores defendem uma estreia do conceito na época renascentista, por meio dos modelos de Galileu. Outros autores, por sua vez, defendem que o conceito surgiu pelo menos na década de 1940, sendo amplamente usado por engenheiros, físicos, estatísticos e economistas (LIMA FILHO, 2008).

#### 3.1. Modelagem Matemática Aplicada à Biodigestor

Sabe-se que a modelagem é a tradução de um fenômeno ou problema de uma situação real em um conjunto de símbolos e relações matemáticas (ORO et al., 2017). Tomando-se como princípio o objetivo do uso da Modelagem matemática pode-se definir o uso desta ciência aplicada ao Biodigestor, como forma de otimizar tempo de operação da máquina e, com a predisposição dos dados de entrada, prever a quantidade de biogás gerado, para a quantidade de substrato ofertado para os microrganismos anaeróbios.

Uma das principais representações matemáticas para o sistema é dada pelo modelo apresentado por Bassanezzi e Ferreira (1988), a qual correlaciona a taxa de crescimento das bactérias anaeróbias em função do alimento que entra, gerando os dados de saída, definidos com o volume de Biogás gerado (Equação 1).

Modelo Geral para condição de Geração de Biogás (Bassanezzi et al., 1988)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = F(x) - \rho xy, \\ \frac{dy}{dt} = kx - h(y, t). \end{array} \right. \quad (1)$$

Na equação (1),

$x(t)$  é a quantidade de bactérias anaeróbicas;

$y(t)$  é a quantidade de biogás;

$t$  é o tempo;

$\rho$  e  $k$  são constantes positivas;

$F(x)$  é o termo responsável pelo fator de inibição, fornece a variação das bactérias, independentemente da presença de biogás;

$h(t,y)$  é a função responsável pelo tipo de retirada de biogás que é efetuada.

A coleta do gás produzido por um biodigestor pode ser efetuada de vários modos, o que é traduzido pela função  $h(t,y)$  do sistema apresentado na equação (1). Neste ponto é considerado o caso em que a retirada de biogás é proporcional a sua quantidade no interior do biodigestor, isto é, onde  $\beta$  é a taxa de coleta (ORO et al., 2017).

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha x - \rho xy, \\ \frac{dy}{dt} = kx - \beta y. \end{cases} \quad (2)$$

Consideremos  $\alpha, \beta, \rho$  e  $k$  como constantes positivas.

Os pontos de equilíbrio da equação, são  $(0,0)$  e  $(\frac{\alpha\beta}{k\rho}, \frac{\alpha}{\rho})$ , logo linearizando a equação do sistema anterior.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha x, \\ \frac{dy}{dt} = kx - \beta y. \end{cases} \quad (3)$$

A partir disso, obtém-se o polinômio

$$P(\lambda) = \lambda^2 + (\beta - \alpha)\lambda - \alpha\beta \quad (4)$$

Para tanto, resultará nas seguintes raízes:  $\lambda_1 = \alpha$ ;  $\lambda_2 = -\beta$ .

O ponto  $(0,0)$ , anteriormente já demonstrado como ponto de equilíbrio, é um ponto de sela. Por apresentar-se instável, o ponto  $(0,0)$  é descartado, visto que a busca é por um ponto de estabilidade do polinômio anteriormente descrito.

O ponto que resta é  $(\frac{\alpha\beta}{k\rho}, \frac{\alpha}{\rho})$ . Logo, será admitido  $x = u + \frac{\alpha\beta}{k\rho}$ ;  $y = v + \frac{\alpha}{\rho}$ .

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -\frac{\alpha\beta}{k}v - \rho uv, \\ \frac{dv}{dt} = ku - \beta v. \end{cases} \quad (5)$$

As raízes da equação característica correspondente ao sistema linearizado são dadas por  $\lambda_{1,2} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\beta}}{2}$ .

Se  $\beta^2 - 4\alpha\beta > 0$ , têm-se um nó e se  $\beta^2 - 4\alpha\beta < 0$ , obtêm-se um espiral. Portanto,  $(\frac{\alpha\beta}{k\rho}, \frac{\alpha}{\rho})$  será considerado o ponto mais estável do polinômio.

### 3.2. Simulação do modelo Monte Carlo



Campos (2021) define que o raciocínio estatístico envolve ideias de variabilidade, distribuição, chance, incerteza, aleatoriedade, probabilidade, amostragem e testes de hipóteses, o que nos leva a interpretações e inferências acerca dos resultados.

De acordo com Andrade (1989, apud GARCIA et al.; 2010), as fases para realização de uma simulação compreendem:

- Formulação do Problema.
- Coleta de Dados.
- Identificação das Variáveis aleatórias que serão simuladas e suas respectivas distribuições de probabilidades.
- Formulação do Modelo, com a modelagem das relações entre as variáveis do problema.
- Avaliação do Modelo.
- Realização dos Experimentos de Simulação.

A simulação de Monte Carlo pode ser definida como um método a qual estima possíveis resultados de um evento futuro, a qual pode se apresentar como incerto. Segundo a International Business Machines (2020), o modelo foi criado por John von Neumann e Stanislaw Ulam durante o período da Segunda Guerra Mundial como forma de auxiliar nas tomadas de decisão durante a Guerra, contribuindo para o desenvolvimento das análises de risco dos eventos da época. Sob outra perspectiva, a justificativa do nome é dada por causa das roletas dos Cassinos de Mônaco, a qual representa a aleatoriedade e as diversas probabilidades de um dado número sair.

Pode-se dizer que a maior vantagem associada a tal método é a capacidade de cálculo e gerar simulações levando em consideração os dados de entrada, tornando-se um modelo preditivo com maior chance de aproximação matemática da realidade (IBM, 2020)

As simulações matemáticas são formadas a partir da geração de valores aleatórios dados pela base real dos dados de entrada do sistema, quanto mais simulações geradas, maior é a aproximação dos dados produzidos com a linha de tendência dos dados reais, por meio da Regressão Linear e do Modelo de Monte Carlo, a qual é conduzida pela equação geral (6), definida por:

$$SM = Y + (-2 \times DP + 4 \times DP \times \text{função aleatório}()), \quad (6)$$

Sendo,

Y= valor no ponto onde a linha de tendência passa;

DP= Desvio Padrão;

Função aleatória= função a qual gera dados aleatórios no sistema.

Neste modelo são realizadas séries de tentativas a qual possuem o objetivo de aproximar o dado simulado ao dado real, considerando o desvio padrão da base amostral. A metodologia é utilizada em sistemas físicos e até mesmo financeiros.

Na prática, pode-se afirmar que a aplicação da simulação de Monte Carlo é dada por meio de alguns passos:

- Simular o problema definido em funções de densidade de distribuição de probabilidade para representar o comportamento de cada uma das suas incertezas.
- Gerar valores pseudoaleatórios aderentes à função de densidade de distribuição de probabilidade de cada incerteza do problema.
- Calcular o resultado determinístico substituindo as incertezas pelos valores gerados obtendo, assim, uma observação do problema.

Quando aplicado às problemáticas reais, a simulação pode se apresentar como um requerente de base de dados robustas, com a finalidade de aproximar cada vez mais os dados simulados dos reais, incrementando cenários de incertezas e fazendo com que o erro de aproximação seja cada vez menor.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste foi utilizada como base de dados os resultados obtidos em Barbosa (2016). Os experimentos ocorreram em reatores biodigestores de bancada na Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários (EXTRABES), utilizando resíduo orgânico constituído de frutas, verduras e legumes provenientes da Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas (EMPASA), servindo de substrato para a reação de Biodigestão.

### 4.1. Equipamento

Para a realização dos experimentos de Barbosa (2016) foram utilizados nove reatores, sendo cada reator produtor de resultados em triplicata referente à quantidade de gás gerada. A partir da quantidade avaliada, foi realizada uma média ponderada entre os resultados, fornecendo assim o valor final de volume de biogás.

O monitoramento do sistema foi realizado do dia 21 de Abril de 2015 e finalizado no dia 21 de Outubro de 2015, totalizando um período de 180 dias. Sendo efetuada quatro análises do substrato do reator, a qual foi coletado por meio de uma mangueira inserida na parte superior do sistema, conforme demonstrado na Figura 3. Foram utilizados a mesma codificação em todos os experimentos.

**Figura 3** – Sistema de nove reatores



**Fonte:** Barbosa (2016).

Os reatores utilizados nos experimentos foram projetados utilizando o vidro de durham, como matriz principal, da marca Laborgas/Brasil-Boro 3.3, possuindo capacidade volumétrica aproximada de 2 litros. Do sistema utilizado, 1,8 litros foram utilizados para o substrato e 0,2 litros utilizados como *headspace*, nome dado ao espaço no reator a qual é destinado ao armazenamento do biogás gerado.

Com o sistema efetivado, o planejamento experimental utilizado compreende três níveis de temperatura e de concentração de sólidos totais, sendo nove experimentos realizados em triplicata. Na Tabela 3 é apresentado o planejamento experimental do sistema.

**Tabela 3:** Planejamento experimental

TRATAMENTO	TEMPERATURA	SÓLIDOS TOTAIS (g.L <sup>-1</sup> )
T1ST1	24°C (Ambiente)	30,6
T2ST1	35°C	30,6
T3ST1	40°C	30,6
T1ST2	24°C (Ambiente)	39,5
T2ST2	35°C	39,5
T3ST2	40°C	39,5
T1ST3	24°C (Ambiente)	48,2
T2ST3	35°C	48,2
T3ST3	40°C	48,2

T1 (temperatura ambiente), T2 (35°C), T3 (40°C). ST1 (30,6 g.L<sup>-1</sup>), ST2 (39,5 g.L<sup>-1</sup>), ST3 (48,2 g.L<sup>-1</sup>).

**Fonte:** Barbosa (2016, adaptações).

## 4.2. Modelagem Matemática

### 4.2.1. Coleta e Tratamento dos Dados

Em posse dos dados (BARBOSA, 2016), as informações foram organizadas com base no tempo total de análise, variando de Maio a Outubro de 2015, a qual Maio e Junho de 2015 representam a Fase 1 do sistema; Julho de 2015 está associado à Fase 2; Agosto de 2015 à Fase 3; Setembro de 2015 à Fase 4 e

Outubro de 2015 à Fase 5, fase esta que por problemas alheios à laboratorista, foram faltosos, sendo cada um dos meses preenchidos pelos seus respectivos dados de Carbono Orgânico Total (COT), nitrogênio Kjeldahl (NTK),  $N-NH_4^+(g.L^{-1})$ , DQO (total), DQO (saída) e Proteína ( $mg.L^{-1}$ ). Sendo importante mencionar que cada fase representa a operação do reator em seu respectivo mês, apresentando a coleta das amostras.

Na seleção e tratamento de dados, foram escolhidos como informações de entrada para a geração das simulações, as variáveis NTK,  $N-NH_4^+$  DQO(total), sob a justificativa de ser uma base amostral íntegra, ademais de serem parâmetros importantes e representativos das reações do sistema que resultam na geração do Biogás, o que nos garante maior precisão na geração das simulações de Monte Carlo, resultando em cenários cada vez mais próximos da base de dados real (Tabela 4).

Além de tal, foram utilizadas as bases reais dos dados referentes a DQO (saída) e Quantidade de Biogás gerada, para representação da geração dos cenários simulados, sendo capaz de apresentar a acurácia da simulação com base nos dados reais, atingindo o objetivo de previsão dos dados das análises do reator.

**Tabela 4 - Disposição de dados com base na fase de operação do reator**

Tempo X sólidos totais	Fase 1			Fase 2			Fase 3			Fase 4		
	NTK (g.L <sup>-1</sup> )	NNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g.L <sup>-1</sup> )	DQOt (g.L <sup>-1</sup> )	NTK (g.L <sup>-1</sup> )	NNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g.L <sup>-1</sup> )	DQOt (g.L <sup>-1</sup> )	NTK (g.L <sup>-1</sup> )	NNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g.L <sup>-1</sup> )	DQOt (g.L <sup>-1</sup> )	NTK (g.L <sup>-1</sup> )	NNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g.L <sup>-1</sup> )	DQOt (g.L <sup>-1</sup> )
T1ST1	1,06	0,28	25,28	1,02	0,30	-	0,90	0,33	23,77	0,61	0,47	22,48
T1ST2	1,20	0,30	29,96	1,03	0,33	-	0,98	0,30	27,78	0,72	0,42	25,63
T1ST3	1,10	0,64	37,07	1,00	0,36	-	0,92	0,36	34,21	0,73	0,39	33,76
T2ST1	1,17	0,71	24,34	0,98	0,70	-	0,60	0,77	21,42	0,56	0,30	19,29
T2ST2	1,00	0,64	25,44	0,92	0,67	-	0,80	0,55	23,72	0,58	0,36	20,01
T2ST3	1,04	0,39	37,15	1,10	0,28	-	1,06	0,26	35,25	0,95	0,25	28,05
T3ST1	1,17	0,29	25,89	1,10	0,30	-	1,03	0,32	24,01	0,61	0,44	23,74
T3ST2	1,07	0,70	24,82	0,98	0,68	-	0,87	0,64	26,16	0,44	0,36	25,08
T3ST3	1,20	0,25	37,87	1,23	0,20	-	0,99	0,20	36,70	0,75	0,38	34,07

Fonte: Barbosa (2016, adaptação).

Todos os parâmetros apresentaram ausência de dados referentes à fase 5, configurado como o mês de outubro de 2015, além disso, a ausência de dados da Fase 2, referente ao mês de julho de 2015, do parâmetro DQO (total) e DQO (saída), tornou-se um contratempo, na análise e estudos estatísticos. Logo, a utilização de regressão linear associada à simulação de Monte Carlo foi a solução

criada para obter uma aproximação matemática, com base nos dados reais para as duas problemáticas supracitadas.

De acordo com tal deliberação, foram realizados estudos estatísticos dos dados, NTK e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, com análise de média, mediana, moda, desvio padrão, máximo e mínimo, como representado na Tabela 5.

**Tabela 5:** Tratamento estatístico dos parâmetros NTK e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

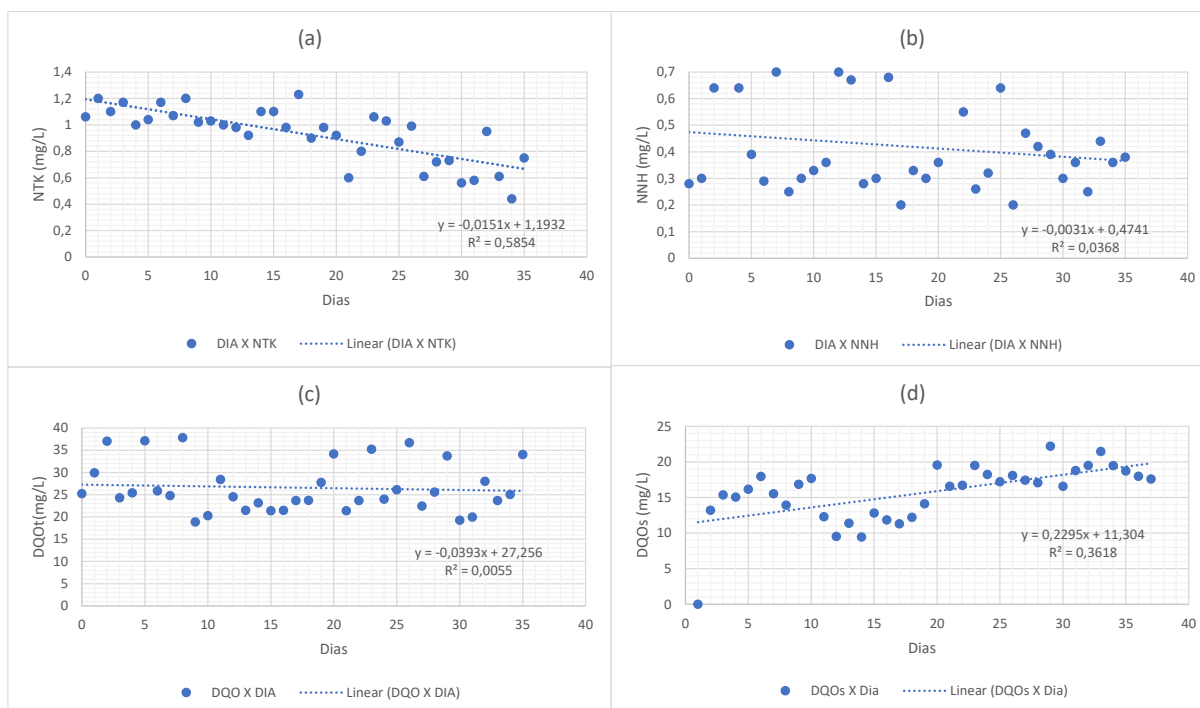
<b>Parâmetro</b>	<b>Média</b>	<b>Moda</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
<b>NTK</b>	0,93	0,98	0,99	0,20	1,23	0,44
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	1,25	0,30	0,36	4,86	30,00	0,20

Fonte: Autoria Própria (2022)

#### **4.2.2. Simulação pelo Método Monte Carlo**

Com conhecimento do comportamento dos parâmetros escolhidos, sendo eles NTK, N-NH<sub>4</sub>, DQO total e DQO de saída, cada um desses foi disposto em planilhas distintas, em que o conjunto de dados foi associado à base temporal da quantidade de análises realizadas entre os meses de maio a outubro de 2015, resultando em uma análise Parâmetro X dias, avaliando a distribuição dos dados referente a linha de tendência de cada cenário (Gráfico 1), sendo todos os procedimentos metodológicos realizados no software *Excel*.

**Gráfico 1** - Representação dos dados Parâmetro x Dias: (a) NTK (g/L) x Dias; (b) N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(g/L) x Dias; (C) DQOs (g/L) x Dias; (d) DQOt (g/L) x Dias.

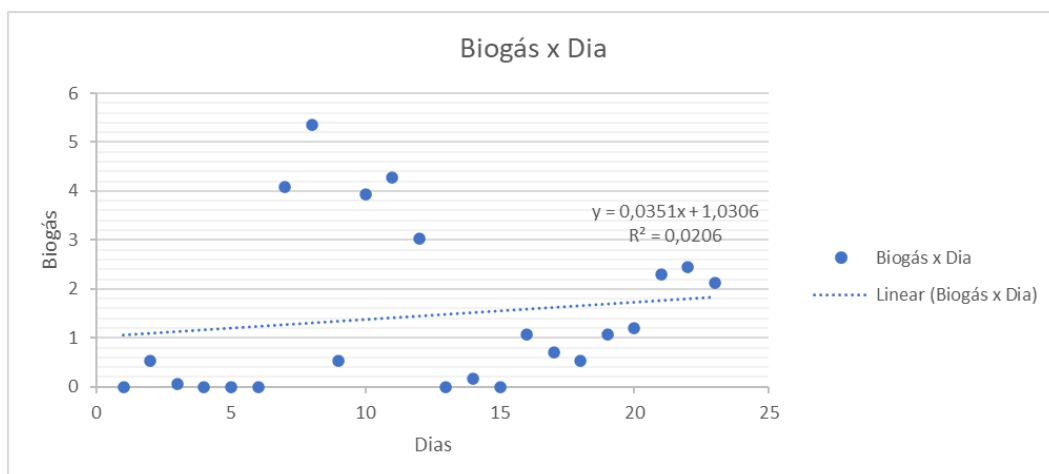


**Fonte:** Autoria própria (2022)

Pode-se verificar que o gráfico apresenta o parâmetro versus dias, proporcionando a análise da dispersão dos dados relativo à linha de tendência e a análise do  $R^2$  e a equação da reta referente a cada gráfico.

A partir do  $R^2$ , foi possível avaliar qual linha de tendência melhor se ajustava à distribuição dos dados, logo com base nesta análise foi possível gerar a equação linear, que dispõe de importância no procedimento seguinte, relativo à regressão linear e geração das simulações.

De forma análoga fora gerado o Gráfico 2 de análise Biogás versus dias, para análise de comportamento dos dados reais perante a quantidade de análise e coletas do sistema.

**Gráfico 2:** Biogás x Dias (T1ST1)

**Fonte:** Autoria própria (2022)

De forma análoga ao gráfico 1, foi possível identificar a equação adequada para a geração das simulações. A geração do gráfico apenas relativo aos valores de T1ST1, se dá sob a justificativa de que já era possível avaliar o comportamento dos dados e cumprir com o objetivo de fazer a previsão do Biogás apenas para uma das combinações de temperatura e Sólidos Totais sugeridas pela pesquisadora Larissa Barreto Batista.

Considerando a configuração geral da equação da reta, tem-se:

$$Y = ax \pm b, \quad (7)$$

Sendo,

$a$  = variável dependente;

$x$  = variável referente a quantidade de dias;

$b$  = variável independente.

Sob esse prisma, foram utilizados os dados referentes aos dias das análises, com a finalidade de obter os pontos “Y” de toda linha de tendência. Com os dados reais e os dados da reta foi realizada a subtração entre as duas naturezas de dados, obtendo-se um valor delta ( $\Delta$ ), o qual será importante na determinação do desvio padrão (DP) do conjunto de dados, determinando o grau de dispersão do conjunto de dados, como representado na Tabela 6.



**Tabela 6** - Configuração Padrão dos Cálculos da Planilha na Fase 1

Temperatura e ST	Fase 1	dia	reta	DELTA	DESVIO PADRÃO
T1ST1	13,20	0	17,512	4,312	6,842
T1ST2	15,36	1	17,707	2,347	
T1ST3	15,07	2	17,901	2,831	
T2ST1	16,16	3	18,096	1,936	
T2ST2	17,96	4	18,290	0,330	
T2ST3	15,53	5	18,485	2,955	
T3ST1	13,94	6	18,679	4,739	
T3ST2	16,85	7	18,874	2,024	
T3ST3	17,69	8	19,068	1,378	

Fonte: Autoria Própria (2022)

Em seguida, foi iniciada a geração das simulações de dados por meio da Regressão Linear e Modelo de Monte Carlo, a qual foi conduzida pela equação geral (8), definida por:

$$SM = Y + (-2 \times DP + 4 \times DP \times \text{função aleatório}()), \quad (8)$$

Com base nesta equação, foram geradas quinze simulações do Modelo de Monte Carlo para cada parâmetro escolhido, as quais criam uma série de possíveis dados, com base nas informações reais fornecidas, gerando um conjunto de dados os quais está representado na Tabela 7 um trecho dessas simulações.

**Tabela 7:** Trecho de planilha com conjunto de dados simulados

temperatura e ST	Fase 1	dia	reta	DELTA	DESVIO PADRÃO	SM1
T1ST1	13,20	0	17,512	4,312	6,842	20,438
T1ST2	15,36	1	17,707	2,3465		22,829
T1ST3	15,07	2	17,901	2,831		17,379
T2ST1	16,16	3	18,096	1,9355		20,633
T2ST2	17,96	4	18,290	0,33		26,622
T2ST3	15,53	5	18,485	2,9545		9,909
T3ST1	13,94	6	18,679	4,739		16,222
T3ST2	16,85	7	18,874	2,0235		19,733
T3ST3	17,69	8	19,068	1,378		18,516

**Fonte:** Autoria Própria (2022)

Com base na série de dados gerados, deve-se ter em mente que cada linha de informação gerada, corresponde a um valor com aproximação matemática, referente ao seu respectivo dado real, como representado na Tabela 8.

**Tabela 8:** Trecho de planilha com simulações do Modelo de Monte Carlo

<b>SM<sub>1</sub>*</b>	<b>SM<sub>2</sub>*</b>	<b>SM<sub>3</sub>*</b>	<b>SM<sub>4</sub>*</b>	<b>SM<sub>5</sub>*</b>	<b>SM<sub>6</sub>*</b>
20,438	16,677	8,383	29,086	25,696	19,976
22,829	16,697	5,057	12,360	17,818	19,581
17,379	7,0354	24,705	21,291	19,214	11,416
20,633	4,456	23,953	6,786	31,228	25,240
26,622	19,466	5,298	20,874	26,056	24,969
9,909	31,958	18,430	9,459	9,293	15,134
16,222	6,196	10,014	31,107	11,954	30,725
19,733	17,567	18,379	16,091	7,406	7,866

\*SM<sub>n</sub> refere-se à quantidade de simulações

**Fonte:** Autoria Própria (2022)

Com base nisso, cada linha de conjunto de dados gerará um cenário otimista e pessimista que se aproxima do valor real fornecido ao banco de dados. A determinação de tais cenários, é dada pela sequência de cálculos, os quais são definidos pela equação (9):

$$Ma = \frac{\sum x}{n}, \quad (9)$$

Sendo,

$\sum x$  = somatório de todos os dados do conjunto;

$n$  = quantidade de dados somados.

Com posse dos dados da média de cada linha é possível fazer os cálculos de desvio padrão com uso das respectivas médias. Logo, tem-se pela Equação (10):

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x-Ma)}{n}}, \quad (10)$$

Sendo,

$n$ = valor na posição  $i$  no conjunto dos dados;

$Ma$ = média aritmética do conjunto de dados;

$n$ = quantidade de dados.

E por fim, para o cálculo dos cenários otimistas e pessimistas, são apontadas pelas equações apresentados na Tabela 9.:

**Tabela 7:** Equações para cenário otimista e pessimista.

<b>Cenário Otimista</b>	$CO = Ma + \frac{2 \times DP}{\alpha^*}$
<b>Cenário Pessimista</b>	$CO = Ma - \frac{2 \times DP}{\alpha^*}$

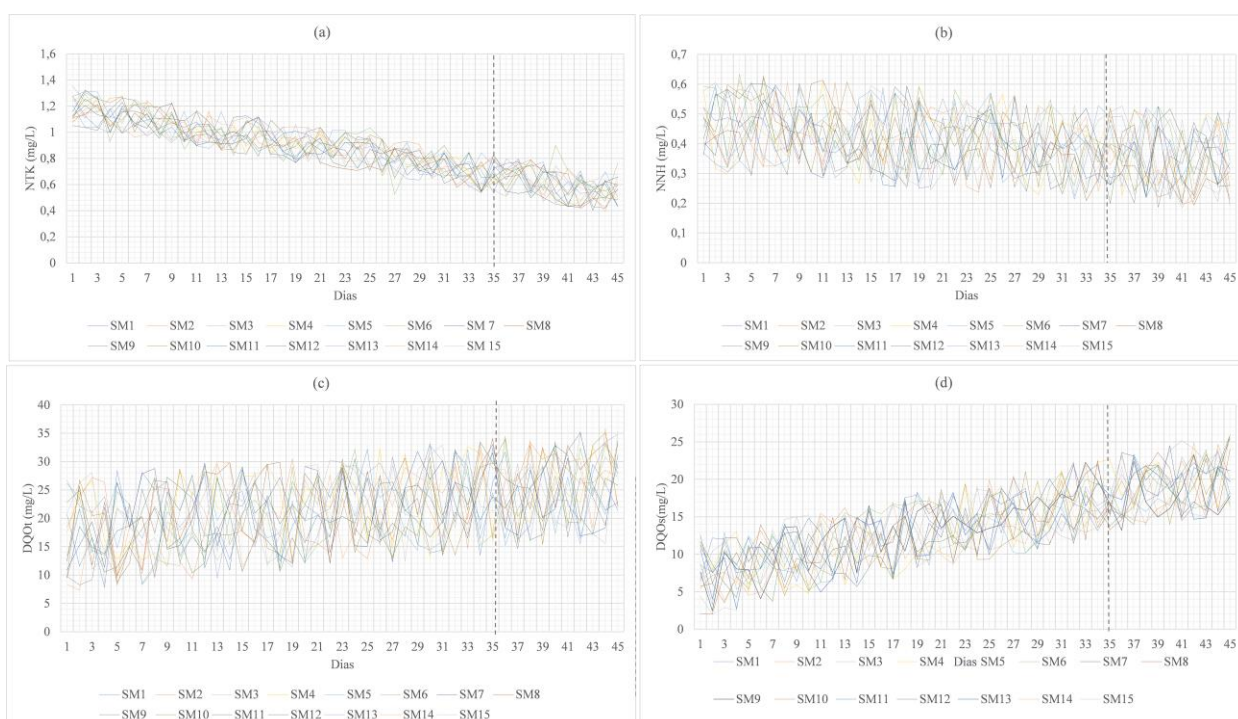
$\alpha^*$  é referente a quantidade de simulações geradas.

**Fonte:** Autoria Própria (2022)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentando então os resultados gerados pelo estudo, na construção do modelo para a geração dos dados referentes à Fase 5 do banco de dados para os parâmetros escolhidos, foram realizadas 15 simulações, gerando então para cada parâmetro representados na compilação do Gráfico 3.

**Gráfico 3:** Gráfico das Simulações de Monte Carlo (a) NTK (g/L) (b) N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (g/L) (c) DQOt (g/L) (d) DQOs (g/L).



**Fonte:** Autoria própria (2022)

O processo de simulação ocorreu a partir do dia 35 de análise, delimitado pelo traçado pontilhado perpendicular ao eixo x em cada gráfico. A partir o gráfico acima, é possível notar o comportamento dos dados simulados, os quais seguem a linha de tendência e a distribuição destes tornam-se uniformes. Logo como resultados das simulações referentes inicialmente para os parâmetros NTK (mg/L) e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg/L), de forma geral, os dados desses parâmetros apresentaram comportamento similar à linha de tendência do banco de dados trabalhada, a qual varia da fase 1 à fase 4, sendo estes dados apresentados, na Tabela 10.

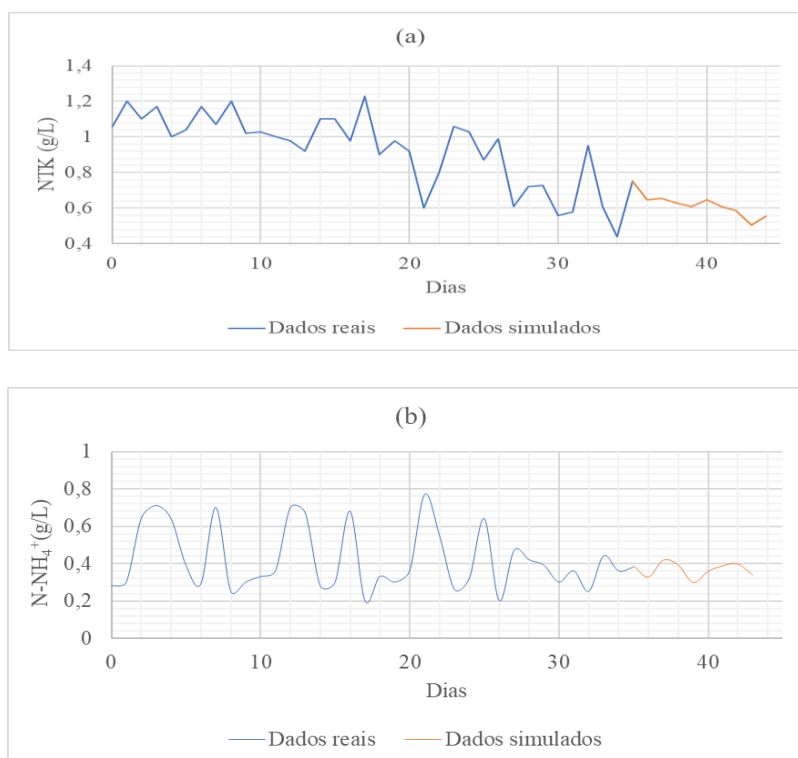
**Tabela 8:** Dados simulados NTK Nitrogênio Amoniacal

NTK (g/L)				N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g/L)			
Temperatura e ST		Dados simulados	Dias	Temperatura e ST		Dados simulados	Dias
Fase 5	T1ST1	0,65	36	Fase 5	T1ST1	0,39	36
	T1ST2	0,64	37		T1ST2	0,33	37
	T1ST3	0,67	38		T1ST3	0,42	38
	T2ST1	0,65	39		T2ST1	0,40	39
	T2ST2	0,59	40		T2ST2	0,30	40
	T2ST3	0,60	41		T2ST3	0,36	41
	T3ST1	0,56	42		T3ST1	0,39	42
	T3ST2	0,59	43		T3ST2	0,40	43
	T3ST3	0,59	44		T3ST3	0,34	44

Fonte: Autoria própria (2022)

Os dados simulados produziram dois gráficos, compilados no Grafico 4, com os dados complementares que faltavam nos dados experimentais, os quais acompanham o comportamento dos dados reais, a partir de 35 dias de análises ao longo dos 5 meses de operação do reator.

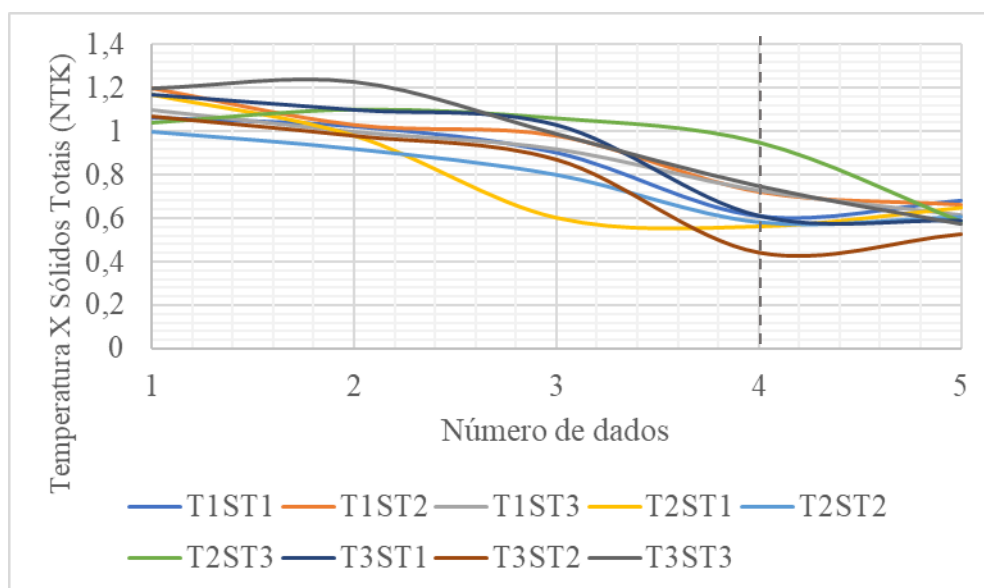
**Gráfico 4:** Comportamento dos dados simulados relativo aos dados reais (a) NTK (b) N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>



**Fonte:** Autoria própria (2022)

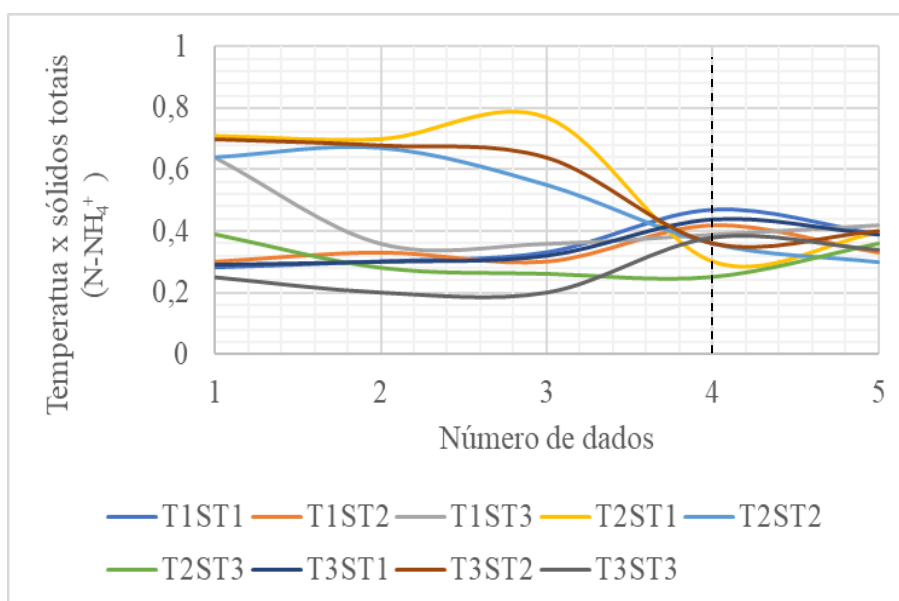
Pode-se verificar que os dados simulares são condizentes com os dados experimentais. A avaliação dos dados seguindo a premissa e conclusões já apresentadas por Barbosa (2016), coincidem com os dados gerados ao longo de todo período de análise e operação do sistema, com a diminuição considerável dos valores de NTK, correlacionando então a diminuição desta variável ao aumento gradual da concentração de nitrogênio amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ). Sendo possível comprovar esta afirmativa em uma perspectiva geral com o conjunto de dados (Gráfico 5), sendo discriminado por Temperatura e Sólidos Totais.

**Gráfico 5:** Dados de temperatura discriminados por temperatura x sólidos totais para NTK



**Fonte:** Autoria própria (2022)

Da mesma forma, foi realizado o processo de análise comparativa entre o comportamento dos dados reais fornecidos por Barbosa (2016) e o traçado do gráfico com os dados gerados por meio da simulação para nitrogênio amoniacal, como representado na Gráfico 6.

**Gráfico 6:** Gráfico de Simulação de Nitrogênio Amoniacal

**Fonte:** Autoria própria (2022)

Mais uma vez, os gráficos mostraram-se condizentes com o perfil real dos dados conferindo no último trecho das informações utilizadas, entre 4 e 5, uma estabilização na geração de Nitrogênio amoniacal, o qual representa o consumo de Nitrogênio Total em que uma parcela será convertida em  $N-NH_4^+$ .

Como forma de avaliar a acurácia das simulações, ou seja, analisar a proximidade entre o valor obtido experimentalmente e o valor real considerado, foi realizada a simulação entre os dados de NTK para a fase 4 da operação do reator, sendo representados pela Tabela 11.

**Tabela 9:** Dados comparativos gerados para fase 4 para NTK.

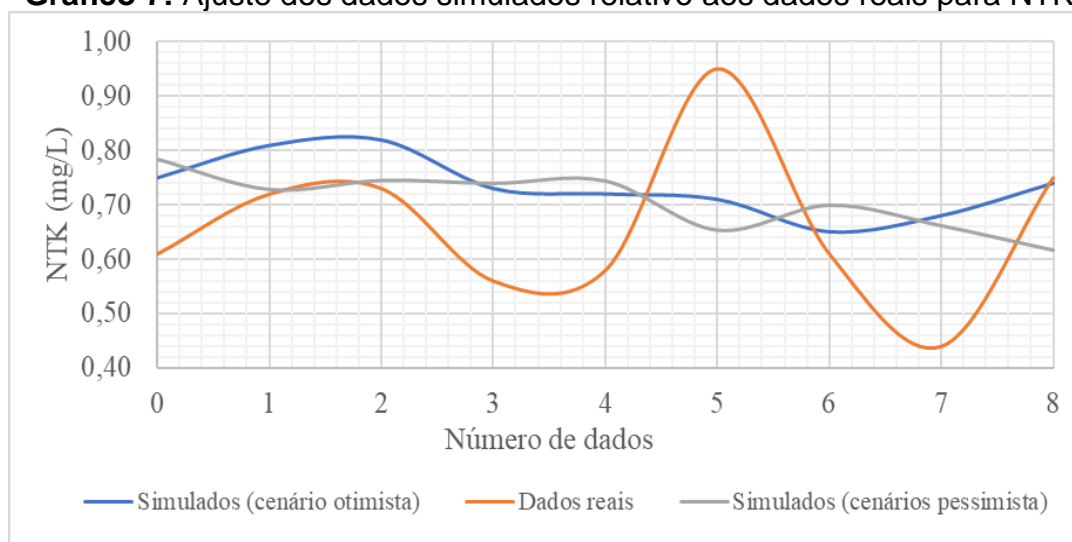
Reator	Temp X ST	Dados reais	dia	Reator	Temp X ST	Cenário otimista (SM)	dia
<b>Fase 4</b>	T1ST1	0,61	27	<b>Fase 4</b>	T1ST1	0,75	27
	T1ST2	0,72	28		T1ST2	0,81	28
	T1ST3	0,73	29		T1ST3	0,82	29
	T2ST1	0,56	30		T2ST1	0,73	30
	T2ST2	0,58	31		T2ST2	0,72	31
	T2ST3	0,95	32		T2ST3	0,71	32
	T3ST1	0,61	33		T3ST1	0,65	33
	T3ST2	0,44	34		T3ST2	0,68	34
	T3ST3	0,75	35		T3ST3	0,74	35

**Fonte:** Autoria própria (2022)

Os dados referentes a Tabela 11, gerou o Gráfico 7, com o comparativo entre o cenário otimista e pessimista, relativo aos dados reais, a qual é possível notar que o erro padrão médio está acentuado, sendo justificado pela ausência de mais dados para calibrar o modelo, porém apresentando comportamento de ajuste similar.

Além de tal, os picos do dado real apresentados no gráfico, em comparação ao ajuste de regressão podem ser interpretados como *outliers*, ou seja, um valor que foge da normalidade e que se torna atípico em comparação ao conjunto de dados total. Como não foi possível acompanhar a fase experimental, não é possível assumir quais fatores levaram a esses *outliers*, os quais podem influenciar na distribuição do modelo.

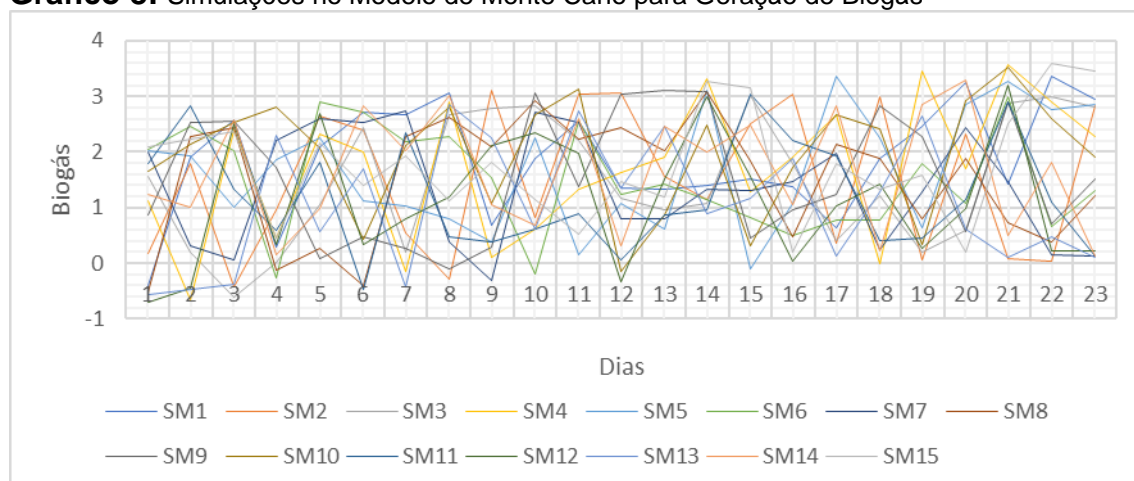
**Gráfico 7:** Ajuste dos dados simulados relativo aos dados reais para NTK



**Fonte:** Autoria própria (2022)

Da mesma forma, foram realizadas as simulações para a geração de Biogás referente aos dados de Temperatura 1 (Ambiente 24°C) e Concentração de Sólidos Totais 1 (30,6 g/L), sendo gerados de forma análoga aos outros gráficos referentes às simulações (Gráfico 8) e gráfico de ajuste entre dado real e os cenários simulados (Gráfico 9), seja ele otimista ou pessimista.



**Gráfico 8:** Simulações no Modelo de Monte Carlo para Geração de Biogás

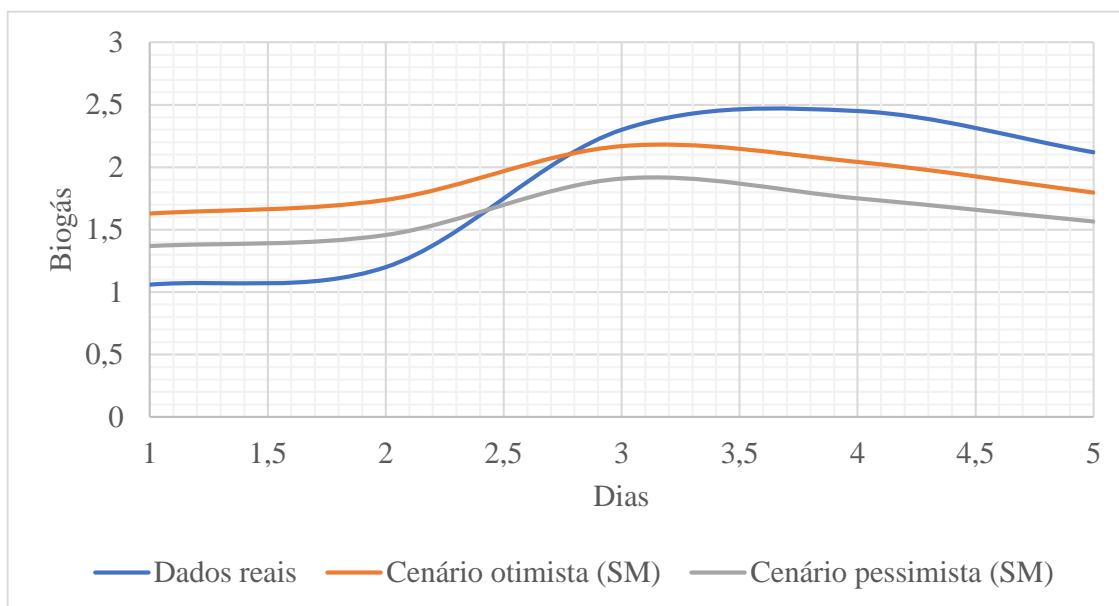
**Fonte:** Autoria própria (2022)

Para o ajuste dos dados simulados, é possível identificar uma uniformidade na distribuição, tomando como referência a linha de tendência apresentada pelo conjunto de dados, logo adotando como base o comportamento dos dados, foi possível gerar os dados preditivos para o Parâmetro de Biogás. Para este parâmetro, foram gerados dados partindo do mês de outubro de 2015, tomando como referência os dados já apresentados por Barbosa (2016), gerando a Tabela 12 de resultados comparativos.

**Tabela 10:** Comparativo dados reais e simulados para geração de Biogás

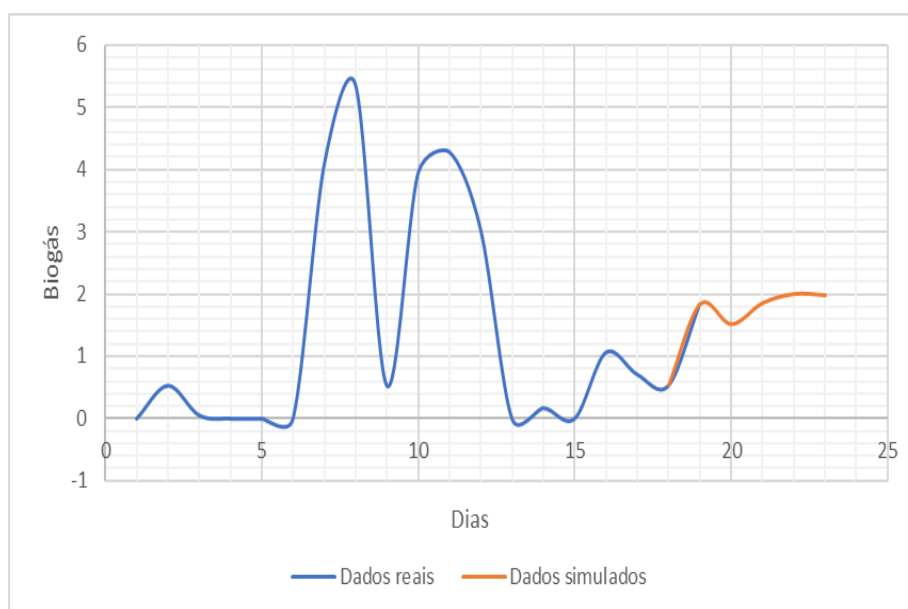
<b>Geração de Biogás</b>						
	<b>média</b>	<b>desvio padrão</b>	<b>cenário otimista</b>	<b>cenário pessimista</b>	<b>Acurácia</b>	<b>Dados reais</b>
<b>01/10 (26°C)</b>	1,50	0,98	1,63	1,37	0,57	1,06
<b>08/10 (25°C)</b>	1,60	1,05	1,74	1,46	0,54	1,20
<b>15/10 (23°C)</b>	2,04	0,97	2,17	1,91	0,13	2,30
<b>22/10 (28°C)</b>	1,90	1,09	2,04	1,75	0,41	2,45
<b>29/10 (26°C)</b>	1,68	0,87	1,80	1,57	0,32	2,12

**Fonte:** Autoria própria (2022)

**Gráfico 9:** Ajuste dos dados simulados relativo aos dados reais para Biogás

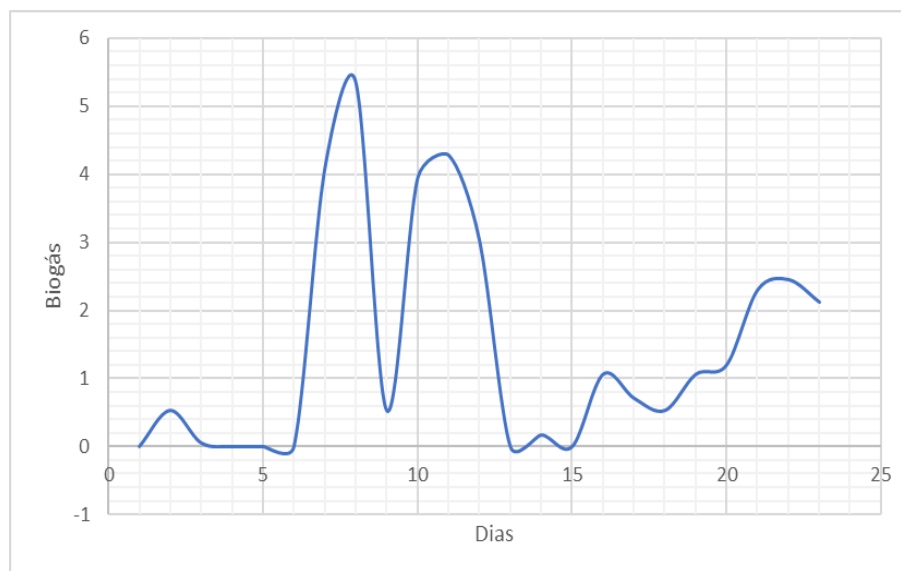
**Fonte:** Autoria própria (2022)

É notório a partir do Gráfico 9 um comportamento similar entre os dados simulados, sejam otimistas e pessimistas e o conjunto amostral real. Como já abordado anteriormente, para o ajuste de dados do parâmetro de NTK, o pico de dados no intervalo entre 3 e 4,5 dias, pode indicar um fator interferente durante o processo, causando assim um valor atípico, se comparado ao ajuste da regressão. A partir de tal, foi possível gerar o Gráfico 10, somando o conjunto de dados reais e os simulados, para cenário otimista, e comparando com o Gráfico 11 gerado apenas com os dados experimentais.

**Gráfico 10:** Dados simulados e experimentais para geração de Biogás

Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 11:** Dados reais de Geração de Biogás



Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se então classificar, a partir do comparativo entre os gráficos acima, como satisfatório o ajuste do modelo para predição de dados na geração de dados de Biogás e para dirimir possíveis lacunas de dados.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados, é possível a partir de simulações por meio do Modelo de Monte Carlo, prever a geração de Biogás, assim como suprir lacunas de dados, sendo esta metodologia uma excelente forma de aplicação por fácil utilização por meio do *Excel*, apresentando resultados satisfatórios com ajuste da curva adequado, tomando como base a quantidade de dados disponíveis para treinamento do modelo.

O acompanhamento do processo experimental pode dirimir dúvidas referentes aos *outliers* identificados, tornando o ajuste da curva experimental gradualmente mais próximo da curva gerada por meio de simulação.

A partir da análise dos dados, foi possível avaliar as alterações no reator perante a mudança de temperatura e Sólidos totais, identificando a partir dos dados preditivos qual o tipo de reação pode estar ocorrendo no sistema, a exemplo da diminuição de NTK e aumento de Nitrogênio Amoniacal.

É recomendado para projetos futuros, o acompanhamento da fase experimental e a busca por uma expansão da base de dados, tornando o ajuste do modelo cada vez mais preciso.

## REFERÊNCIAS

- AQUINO, A. R. de; PALETTA, F. C.; CAMELLO, T. C. F.; MARTINS, T. P.; ALMEIDA, J. R. de. Sustentabilidade ambiental, 1. ed. - Rio de Janeiro: Rede Sirius; OUERJ, 2015.
- ANDRADE, E. L. Introdução à pesquisa operacional - métodos e modelos para a análise de decisão: Itc - livros técnicos e científicos ed., rio de janeiro, 1989
- ARAÚJO, A. P. C. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- ASSUMPÇÃO, S. M. N. Pré-tratamento químico combinado do bagaço da cana visando a produção de etanol de segunda geração. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.
- ASTALS, A.; Nolla-Ardèvol, V.; Mata-Alvarez, J. (2012). Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate. *Bioresource Technology*, Elsevier, 4. doi:10.1016/j.biortech.2012.01.080.
- BACKES, G.M. - Avaliação do processo de digestão anaeróbia na geração de energia a partir de dejetos suínos e bovinos de leite com suplementação de glicerina residual bruta oriunda da produção de biodiesel, Lajeado- RS – 2011
- BARBOSA, L.B. INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS E DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS. Dissertação. Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.
- Barichello, R. FILHO, N. C. DEIMLING, M. COSTA, V. D. Geração de energia elétrica e biofertilizante proveniente do tratamento de dejetos suíno: um estudo de caso em uma propriedade de médio porte sob a perspectiva financeira. II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2012.
- BASSANEZI, R. C.; FERREIRA, W. C. Jr. Equações diferenciais com aplicações. São Paulo: Harbra Ltda., 1988.
- BASTOS, J. A. Produção de biogás em resposta ao pré-tratamento químico e reuso do licor negro aplicado aos resíduos de aparas de grama. Dissertação (título de Mestre em Tecnologias Ambientais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Medianeira, 2020.
- BOROWSKI, S.; Kubacki, P. (2015). Co-digestion of pig slaughterhouse waste with sewage sludge. *Waste Management*, Elsevier, 119-125. Obtido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.021>
- BOROWSKI, S.; Weatherley, L. (2013). Co-digestion of solid poultry manure with municipal sewage sludge. *Bioresource Technology*, Elsevier, 345. Obtido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.047>
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010.
- CÂMARA, J. R. L. Obtenção e caracterização de compósito a base de poliuretano de mamona e rejeito de telha visando aplicação como isolante térmico. Dissertação

(Mestrado) – Curso de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

CAMPOS, C. R.; WODEWOTZKI, M. L. L.; JACOBINI, O. R.; Educação Estatística : teoria e prática em ambientes de modelagem matemática. 3 ed. Belo Horizonte: Autêntica, 2021.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Reatores Anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2º ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 3 80 p. Vol. 5, 2007.

CREMONEZ, P. A.; FEIDEN, A.; ZENATTI, D. C.; CAMARGO, M. P. de.; NADALETI, D'AQUINO, Camila Agner. Geração de energia por biogás a partir de resíduos do potencial de geração de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da vinhaça e bagaço de cana. BIOFIX Scientific Journal, v. 3, n. 1, p. 26-33, 2018.

DOMINGUES, P.M. S. P. Produção de biogás por codigestão anaeróbia e sua valorização. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) - Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, 2020.

FRANCO, C. R.; B. NASCIMENTO FILHO, W. B. de. Avaliação do Potencial dos Resíduos Produzidos Através do Processamento Agroindustrial no Brasil. Revista Virtual de Química, v.7, n.6, p. 1968-1987, 2015.

FRANQUETO, Rafaela. Digestão anaeróbia de resíduos orgânicos provenientes de compostagem caseira com uso de reatores Biochemical Methane Potential. UNINTER. Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade, 2021.

FRIGO, K. D. A.; FEIDEN, A.; GALANT, N. B.; SANTOS, R. F.; MARI, A. G. FRIGO, GARCIA, S. LUSTOSA, P. R. B. BARROS, N. R. Aplicabilidade do método de simulação de monte carlo na previsão dos custos de produção de companhias industriais: o caso da companhia vale do rio doce. Revista de Contabilidade e Organizações, 2010.

GARCILASSO, Vanessa; FERRAZ, Antônio; DOS SANTOS, Marilin; JOPPERT, Caio. Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano. São Paulo: Synergia Editora, 2018.

GE J., HAO-YU ZHAO, HONG-WU ZHU, JIN HUANG, LU-AN SHI, AND SHU-HONG YU. Advanced Sorbents for Oil-Spill Cleanup: Recent Advances and Future Perspectives. Adv. Mater. 2016.

GONÇALVES, G. L. F. Biodigestores: uma alternativa para reduzir a contaminação das águas pelo esgoto. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Atenção Básica em Saúde da Família, Universidade Federal de Minas Gerais, Araçuaí, 2012.

GUERI, M.V. D. et al. DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ALIMENTARES UTILIZANDO ENSAIOS BMP. Biofix Scientific Journal, 2018.

GUIMARÃES, C. M. M.; GALVÃO, V., Análise da rede de colaboração científica sobre biogás, Perspectivas em Ciência da Informação, v.20, n.2, p.130-133, abr./jun. 2015. HOLUS, Vol. 8, 2015.

HIDALGO, D., Gómez, M., Martín-Marroquín, J., Aguado, A., & Sastre, E. (2015). Two- phase anaerobic co-digestion of used vegetable oils' wastes and pig manure.

International Journal of Environmental Science and Technology. Industrial. Edgard Blucher Ltda. Vol. 2. 593 p.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. Estudos avançados, São Paulo. V. 25, n. 71. Issn 0103-4014, 2011.

Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development;. Washington, DC: World Bank, 2018.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Sbera: Embrapa Suínos e Aves, Concórdia, 2019.

LEITE, V. D. LOPES, W. S. HENRIQUE, I. N. BARROS, A, J, M. Bioestabilização anaeróbica de resíduos sólidos orgânicos: aspectos quantitativos. Tecno-Lógica, v. 18, n. 2, p. 90-96, 2014.

LIMA FILHO, E. C. (2008) Modelos matemáticos nas ciências não exatas. In: Nogueira, E.D., Martins, L. E. B., Brenzikofer, R (orgs). Modelos matemáticos nas ciências não exatas: um volume em homenagem a Euclides Custódio de Lima Filho. São Paulo: Blucher.

LOURENÇO, V. A.; NADALETI, W. C.; VIEIRA, B. M.; LEANDRO, D.; SILVA, M. A.; SANTOS, R. F.; SANTOS, G. B.; VALENTINI, M. H. K.; SCHOELER, G. P.; KOSCHIER, I. F. DUARTE, V. H. CORRÊA, A. G. Produção de biogás via codigestão anaeróbia de efluente da parboilização de arroz e resíduos orgânicos. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, 2019

LUSTOSA, Gleidson Neres; MEDEIROS, Ícaro Hendrix Borges de. Proposta de um biodigestor anaeróbio modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos orgânicos. 2014. 64 f., il. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

MOREIRA, M. H; GIOMETTI, A. B de R. Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa. Scielo Brazil, 2008.

MARCHIORO, V.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C.; GASPARETO, T. C.; MARTINS, C. R.; JESUS, L. A de. Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacionanl: panorama. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011. ISSN 1678-1953.

MARTINS, C. R.; JESUS, L. A de. Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacionanl: panorama. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011.

MEDEIROS, A. F. Estudo da Produção de Metano a partir da Co-digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos com Macrófitas Aquáticas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

MELO, M. C. Influência da Matéria Orgânica nos Recalques de Resíduos Sólidos Urbanos Aterrados. 148p. Tese (Tese de doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MENDONÇA L. M. Utilização de resíduo úmido de cervejaria na alimentação de cabras anglo nubiana em final de lactação (Master's Thesis). Retrieved from Repositório Institucional UFS, 2012.

MENDONÇA, Elisabete Ferro. Tratamento anaeróbico dos efluentes oriundos da bovinocultura de leite em biodigestor tubular. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2009.

Método de Monte Carlo, 2012. Disponível em: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/19632/19632\\_4.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/19632/19632_4.PDF). Acesso em: 25 de junho de 2022.

NETO, Alaor Borges Pinheiro. Determinação experimental de parâmetros de projeto para digestores anaeróbios no tratamento de resíduos sólidos orgânicos Dissertação (mestrado) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia ambiental. Ribeirão Preto, 2015.

NETO, E. D. D.; ALVARENGA, L. H.; COSTA, L. M.; NASCIMENTO, P. H.; SILVEIRA, R. Z. S.; LEITE, L. H. M. Implementação e avaliação de um biodigestor de produção descontínua. UniBH, Belo Horizonte - MG, vol. 3, nº 2, 2010.

O DESPERDÍCIO DE ALIMENTOS E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS, 2020. Disponível em: <https://www.fsp.usp.br/sustentarea/2020/06/12/o-desperdicio-de-alimentos-e-a-geracao-de-residuos/>. Acesso em: 20 de junho de 2022.

OLIVEIRA, L. G. Comparação de alternativas de produção de biogás a partir da combinação de substratos da suinocultura com resíduos de batata da região dos campos gerais: oportunidades e discussões. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

orgânicos: estudo de caso da Cidade Universitária da USP. / Camila Agner D'Aquino; orientador: Ildo Luís Sauer. – São Paulo, 2018.

ORO, N.T.; SAUSEN, A. T. Z. R.; SAUSEN, P. S.; Modelagem e simulação do processo de produção de biogás num biodigestor urbano. Revista de Ciências Exatas Aplicadas e Tecnológicas da Universidade de Passo Fundo- Rio Grande do Sul, 2017.

PALHARES, J. C. P. Uso da cama de frango na produção do biogás. Circular técnica. Embrapa Suínos e Aves, 2004.

PELIZER, L. H.; PONTIRRI, M. H.; MORAES, I. O. Utilização de resíduos agro-industriais em processos biotecnológicos como perspectiva de redução do impacto ambiental. Journal of Technology Management & Innovation, Chile, v. 2, n. 1, p.118-127, 2007.

POHLAND, F. G. Anaerobic treatment: fundamental concepts, applications and new horizons. Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal waste. Flórida, USA. CRC Press, 1992.

Porpino, G.; Lourenço, C. E.; Araújo, C.M.; Bastos, A. Intercâmbio Brasil – União Europeia sobre desperdício de alimentos. Relatório final de pesquisa. 2018. Brasília: Diálogos Setoriais União Europeia – Brasil. Embrapa. Disponível em: [http://www.sectordialogues.org/documentos/noticias/adjuntos/a39a4c\\_Relatorio\\_SemDesperdicio\\_Baixa.pdf](http://www.sectordialogues.org/documentos/noticias/adjuntos/a39a4c_Relatorio_SemDesperdicio_Baixa.pdf). Acesso em: 20 de junho de 2022.

Raposo, F., Rubia, M.A. De, Borja, R., 2011. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode : An overview relating to methane yields and experimental



procedures. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 861–877.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008>

SANTOS, E. G.; SOUSA R. C.; VALVERDE C. C.. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS PARA REMOÇÃO DE ÓLEO DE AMBIENTES AQUÁTICOS. 12º Encontro Brasileiro sobre Adsorção. Gramado, RS. 2018.

SILVA, A. S. C. Avaliação da codigestão de resíduos orgânicos visando a produção de metano. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

SILVEIRA, A.; FERREIRA, G.P.; SILVA, L. A.; a evolução da modelagem matemática ao longo da história, o surgimento da modelagem no brasil e suas contribuições enquanto estratégia de ensino de matemática. Congresso iberoamericano de educação matemática- montevideo, 2013. Simulação de monte carlo. Ibm cloud education, 2020. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/cloud/learn/monte-carlo-simulation>. Acesso em: 25 de junho de 2022.

SOARES, C. M. T. FEIDEN, A. TAVARES, S. G. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. *Pesquisas Agrárias e Ambientais. Nativa, Sinop*, v.5, esp., p.509-514, dez. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/2318-7670.v05nespa10>

SOUZA FILHO, J.D.V.; LIMA, A.C.A.; STEFANUTTI, R.; SILVA, W.M.B.; BASTOS-NETO, M.; VILARRASA-GARCIA, E.; LOIOLA, A.R.; MOTA, F.S.B. Zeólita 4A para purificação do gás de aterro sanitário. *Química nova*, 2018.

TCHOBANOGLIOUS, G.T.; THEISEN, H.; VIGIL, S.A. *Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues*. New York: McGraw-Hill, 1993. 978p.

TORRECILHAS, A. R.; SELLA, M. R.; CARRARO, F. A.; FRIAS, J. A.; VIOTTI, A. C. Análise dos pré-tratamentos de resíduos vegetais na produção de metano em reatores de biodigestão anaeróbia. Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), Santos - SP, 2019.

W. C.; ROSSI, E. de.; ANTONELLI, J. Biodigestão anaeróbia no tratamento de resíduos lignocelulósicos. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 2, p. 21-35, 2013

