



**TATIANE CAMARGO**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE  
TEMPERATURA DE UM BIODIGESTOR PARA RESÍDUOS ORGÂNICOS**

Horizontina - RS

2019

**Tatiane Camargo**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE  
TEMPERATURA DE UM BIODIGESTOR PARA RESÍDUOS ORGÂNICOS**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Me. Ruben Eduardo Panta Romero e coorientador Me. Cristiano Osinski.

Horizontina - RS

2019

FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA  
**CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso**

**“IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE  
TEMPERATURA DE UM BIODIGESTOR PARA RESÍDUOS ORGÂNICOS”**

**Elaborada por:  
Tatiane Camargo**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Controle e Automação

Aprovado em: 27/06/2018  
Pela Comissão Examinadora

---

Me. Ruben Eduardo Panta Romero  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

---

Me. Adalberto Lovato  
FAHOR – Faculdade Horizontalina

---

Me. Cristiano Rosa dos Santos  
FAHOR – Faculdade Horizontalina

**Horizontalina - RS  
2019**

À minha família, por sua capacidade de acreditar e de investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação deram-me a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinha nessa caminhada.

## AGRADECIMENTO

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo monitorar e controlar a temperatura do biodigestor durante o processo de digestão anaeróbia. Para isso um hardware controlador foi implementado. Este controlador possui os ganhos atualizados em tempo real. Este trabalho justifica-se pela necessidade de buscar alternativas sustentáveis para a geração de energia e gerenciamento de resíduos orgânicos, a fim de preservar o meio ambiente da maneira mais eficiente possível. Através de uma busca detalhada na literatura, percebeu-se que a falta de controle das variáveis durante o processo de digestão anaeróbia não poderia gerar a maior eficiência e rendimento na geração de biogás do biodigestor. Em vista disso, este trabalho enfoca o controle de temperatura do processo de biodigestão.

**Palavras-chave:** Biodigestor, controlador, digestão anaeróbica.

## ABSTRACT

This work has the objective of monitoring and controlling the temperature of a biodigester during the anaerobic digestion process. For this, a hardware controller is implemented. This controller has the updated real-time gains from a system. This work is justified by the need to search for sustainable alternatives for energy generation and management of organic waste in order to preserve the environment in the most efficient way possible. Through a detailed search in the literature, it was noticed that the lack of control of the variables during the anaerobic digestion process may not generate the highest efficiency and yield in the biogas generation of a biodigester. In view of this, this work focuses on the temperature control of a biodigestion process.

**Keywords:** Biodigester, controller, Anaerobic Digestion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de RSU no Brasil .....	13
Figura 2 – Modelo de biodigestor canadense.....	18
Figura 3 – Modelo de biodigestor indiano .....	19
Figura 4 – Modelo de biodigestor chinês.....	19
Figura 5 – Bioquímica da produção de gás metano .....	20
Figura 6 – Formação de monômeros .....	21
Figura 7 – Degradação de piruvato .....	23
Figura 8 – Degradação do ácido acético pela via do ácido butírico .....	23
Figura 9 – Transferência de Hidrogênio Interespecífica”, como por exemplo em uma cultura de Methanobacterium omelanskii .....	24
Figura 10 – Formação de metano a partir de acetato 8 (esquerda) e de dióxido de carbono (direita) (CoA = Coenzima A, CoM = Coenzima M).....	25
Figura 11 – Diagrama de blocos de um controlador PID.....	28
Figura 12 – Esquema de processo do biodigestor .....	32
Figura 13 – Esquema elétrico do sistema .....	35
Figura 14 – (a) Sistema subamortecido e (b) Sistema superamortecido.....	36
Figura 15 – Sistema de malha fechada do biodigestor .....	37
Figura 16 – Esquema de processo do biodigestor .....	39
Figura 17 – Temperatura e vazão de gás .....	40
Figura 18 – Controlador Lógico Programável WEG Clic 02 .....	41
Figura 19 – CLP com sensores de temperatura ligados .....	42

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1 TEMA .....	10
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	10
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA .....	10
1.4 HIPÓTESES .....	11
1.5 JUSTIFICATIVA .....	11
1.6 OBJETIVOS .....	14
<b>1.6.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
<b>1.6.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
2.1 BIODIGESTÃO .....	15
2.2 MODELOS DE BIODIGESTORES .....	17
<b>2.2.1 Biodigestor modelo canadense</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.2 Biodigestor modelo indiano</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.3 Biodigestor modelo chinês</b> .....	<b>19</b>
2.3 BIOREAÇÕES .....	20
<b>2.3.1 Hidrólise</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3.2 Acidogênese</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.3 Acetogênese</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3.4 Metanogênese</b> .....	<b>25</b>
2.4 CONTROLADORES .....	26
<b>2.4.1 Controle liga/desliga</b> .....	<b>27</b>
<b>2.4.2 Controlador proporcional integral derivativo</b> .....	<b>27</b>
<b>2.4.3 Domínio da frequência</b> .....	<b>29</b>
<b>2.4.4 Controle discreto</b> .....	<b>29</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>31</b>
3.1 PROCESSO DO FUNCIONAMENTO DO BIODIGESTOR .....	31
3.1.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	33
3.2 MONITORAMENTO DA TEMPERATURA .....	34
3.3 ETAPAS DE CONTROLE DA TEMPERATURA .....	35
3.4 AÇÕES DE CONTROLE .....	37
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>39</b>
4.1 PROCESSO DO FUNCIONAMENTO DO BIODIGESTOR .....	39
4.2 MONITORAMENTO E CONTROLE DE TEMPERATURA .....	39
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>44</b>
<b>APÊNDICE A – MODELO DE UM SISTEMA DE SOFTWARE DE CONTROLE DE TEMPERATURA PARA UM BIODIGESTOR</b> .....	<b>46</b>
<b>ANEXO A – TI-44E PLUS - TERMÔMETRO</b> .....	<b>47</b>
<b>ANEXO B – CONV 32 – CONVERSOR</b> .....	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Biodigestores são equipamentos que têm a capacidade de converter resíduos orgânicos, através da Digestão Anaeróbica (DA), em biogás e biofertilizante. A simplicidade conceitual do equipamento oculta grande complexidade dos processos químicos e físicos da DA. (SHUBEITA, 2016).

Segundo Shubeita (2016), essa complexidade se revela na quantidade de variáveis do meio que devem ser monitoradas para garantir melhor eficiência do processo. As principais variáveis, que afetam o processo de digestão anaeróbica, são temperatura, pressão, mensuração de gases resultantes, ácidos resultantes, potencial hidrogeniônico (ph) e composição da matéria orgânica.

A digestão anaeróbica é definida como um processo microbiológico durante o qual o carbono orgânico presente em biopolímeros e outros compostos degradáveis é convertido em sua forma mais reduzida (gás metano –  $\text{CH}_4$ ) e sua forma mais oxidada (dióxido de carbono –  $\text{CO}_2$ ) na ausência de oxigênio. Ela também é conhecida como biogaseificação ou produção de biogás e pode servir a muitos propósitos como saneamento urbano e rural de forma ecológica, bem como produção de energia e biofertilizantes.

O que torna o processo de digestão anaeróbica atraente para os pesquisadores são o  $\text{CH}_4$  e o biofertilizante resultantes, pois podem ser aproveitados como alternativa de bioenergia e nutrição de plantas, respectivamente. Adicionalmente, o emprego de digestão anaeróbica traz ganhos diretos para o meio ambiente e conseqüentemente para a saúde e bem-estar da população, uma vez que permite processar dejetos de diversas naturezas (e.g., origem animal), evitando, por exemplo, que os agentes patológicos neles contidos sejam direcionados para as bacias aquíferas.

Conforme Shubeita (2016), os biodigestores podem ser utilizados em áreas urbanas e rurais, dependendo do tipo de resíduo orgânico. Em ambos os locais pode haver dificuldade em monitorar e controlar os biodigestores e conseqüentemente comprometer a sua eficiência, pois historicamente é apontado como um elemento de fracasso nos projetos que tentaram implantar estes equipamentos em grande escala.

De forma interdisciplinar e com foco na eficiência dos biodigestores será desenvolvido um sistema de controle através de amostras coletadas que ajudarão identificar qual os melhores parâmetros, ou seja, qual temperatura setada no biodigestor o torna mais eficiente. Os resultados das amostras e simulações

possibilitarão compreender e avaliar o comportamento de um sistema de digestão anaeróbica, em especial no controle de temperatura, destacando quanto o monitoramento e controle são essenciais à produção de biogás e biofertilizantes.

Segundo Shubeita (2016), os resultados e análises obtidos podem ser utilizados como entrada de um sistema que realimenta atuadores de modo a melhorar a operação do sistema de digestão anaeróbica e conseqüentemente gerar novos dados de monitoramento.

Neste contexto, o projeto tem o objetivo de implementar um sistema de monitoramento e controle de um biodigestor de resíduos orgânicos no interior da Faculdade Horizontina – FAHOR, na região Noroeste do Rio Grande do Sul.

### 1.1 TEMA

Monitoramento e controle da temperatura do sistema de um biodigestor durante o processo de digestão anaeróbica através de implementação de PID, usando o software Sitrad.

### 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho delimita-se na coleta de dados, geração de informações e implementação do sistema de controle e monitoramento de temperatura para um biodigestor de resíduos orgânicos situado na Faculdade Horizontina, para outras situações devem ser feitas outras análises.

### 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema encontrado foi a dificuldade em monitorar e controlar as variáveis (pressão, temperatura e vazão) envolvidas na digestão anaeróbica dos biodigestores. Por não possuírem um sistema de controle preciso das mesmas e por conseqüência podendo comprometer a sua eficiência e rendimento. É conhecido que as bactérias envolvidas no processo de digestão anaeróbica têm sua morte ou sua reprodução acentuada de acordo algumas temperaturas, que afetam a geração de biogás. Assim, verifica-se então a importância de termos o controle das variáveis que envolvem o sistema para garantir sua melhor performance.

Com base no exposto no problema de pesquisa, pode-se realizar com a seguinte pergunta: a implementação de um sistema de monitoramento e controle de

temperatura e processo de um biodigestor possibilitará a obtenção de um maior rendimento e eficiência?

#### 1.4 HIPÓTESES

- a) Biodigestor sem controle e monitoramento de variáveis;
- b) Controle e monitoramento do sistema gera maior eficiência do biodigestor.

#### 1.5 JUSTIFICATIVA

Os resíduos orgânicos (tanto do meio urbano quanto do meio rural) nos levam para grandes problemas ambientais e sociais. Esses resíduos, quando destinados para lixões, e entram no processo de decomposição, além de poluir o meio ambiente, liberam gás metano para a atmosfera, que é mais prejudicial que o gás carbônico para a camada de ozônio. Já com o uso de biodigestores esses gases seriam utilizados de maneira correta. (1kg resíduo orgânico por pessoa resulta em 100 ton por semana para uma cidade de 100000 habitantes)

No caso do RS, todo esse material é destinado aos lixões, que poluem o solo, as águas e o ar.

Portanto, do ponto de vista social, a melhor forma de destinar esses resíduos, seriam em aparatos como biodigestores. Que além de reduzir o impacto ambiental, preservariam a saúde dos seres vivos, do âmbito econômico gerariam biofertilizantes e energia que poderiam ser aproveitados.

No âmbito de geração de energia, 100 ton de lixo orgânico poderiam gerar 6000 metros cúbicos de biogás ou aproximadamente 3600 litros de óleo combustível.

No tocante a fertilizantes, geraríamos (40kg/tonX100) equivalente a 4000 kg de fertilizante mineral, composto de nitrogênio, fósforo e potássio.

O projeto de digestão é realizado por bactérias e por arqueas, micro-organismos delicados que agem em conjunto num ambiente bem controlado de temperatura e acidez. Esses dois parâmetros devem ser controlados e mantidos uniformes dentro do reator.

O último panorama realizado pela ABRELPRE (2017) constatou que, a produção de resíduo no Brasil é de um total anual de 78,4 milhões de toneladas no país, o que demonstra uma retomada no aumento em cerca de 1% em relação a 2016. O montante coletado em 2017 foi de 71,6 milhões de toneladas, registrando um índice de cobertura de coleta de 91,2% para o país,

o que evidencia que 6,9 milhões de toneladas de resíduos não foram objeto de coleta e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio.

Deste montante, aproximadamente 59,1% foram encaminhados a lixões e aterros controlados que não contam com nenhuma medida de proteção do meio ambiente e à saúde pública ou, simplesmente, não foram coletados. Mesmo os 59% dos resíduos restantes não possuem um destino final nobre. Os números referentes à geração de RSU revelam um total anual de 78,4 milhões de toneladas no país, o que demonstra uma retomada no aumento em cerca de 1% em relação a 2016.

O montante coletado em 2017 foi de 71,6 milhões de toneladas, registrando um índice de cobertura de coleta de 91,2% para o país, o que evidencia que 6,9 milhões de toneladas de resíduos não foram objeto de coleta e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio.

No tocante à disposição final dos RSU coletados, o Panorama não registrou avanços em relação ao cenário do ano anterior, mantendo praticamente a mesma proporção entre o que segue para locais adequados e inadequados, com cerca de 42,3 milhões de toneladas de RSU, ou 59,1% do coletado, dispostos em aterros sanitários.

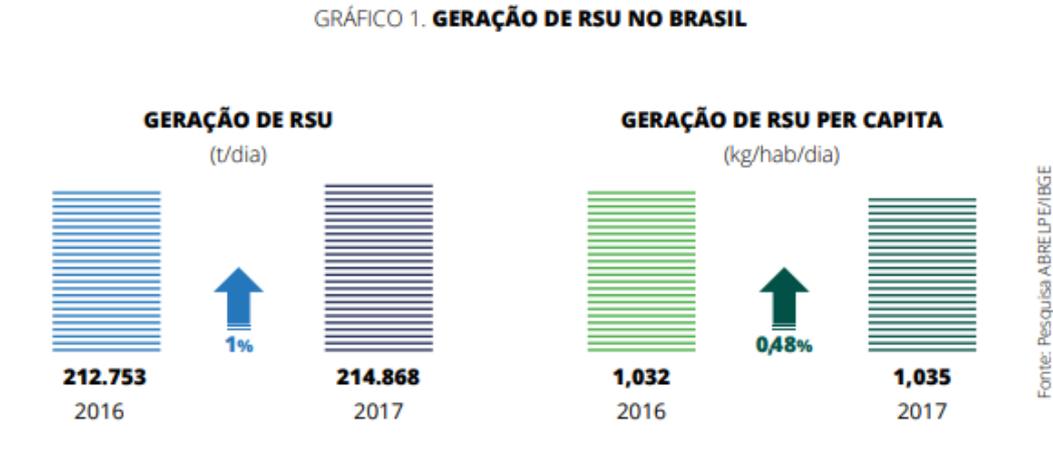
O restante, que corresponde a 40,9% dos resíduos coletados, foi despejado em locais inadequados por 3.352 municípios brasileiros, totalizando mais 29 milhões de toneladas de resíduos em lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações, com danos diretos à saúde de milhões de pessoas.

Os recursos aplicados pelos municípios em 2017 para fazer frente a todos os serviços de limpeza urbana no Brasil foram, em média, de R\$10,37 por habitante por mês.

A geração de empregos diretos no setor de limpeza pública manteve-se estável, com ligeira variação de 0,3% em relação ao ano anterior e atingiu cerca de 337 mil postos de trabalho formal no setor.

O mercado de limpeza urbana movimentou recursos correspondentes a R\$28,5 bilhões no país, com variação positiva em todas as regiões. (CORDEIRO, 2018)

Figura 1 – Geração de RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE, 2017, p. 15

As características do lixo urbano variam com os costumes de cada região ou até de cada cidade, portanto, e a operação dos biodigestores deve ter uma temperatura uniforme independentemente das variações climáticas da região (Figura 1). Até o momento não existe nenhum estudo de controle de temperatura de biodigestores no município de Horizontina.

A maneira como os resíduos orgânicos são disponibilizados e a forma de alimentação de um biodigestor pode impactar no seu funcionamento. A variação de temperatura, a acidez, entre outros parâmetros podem interferir no desenvolvimento das bactérias para o início da produção de biogás.

A temperatura pode acabar afetando o bom desempenho dos microrganismos o que interfere diretamente na biodigestão das bactérias. Quando a temperatura não está adequada para o tipo de bactéria, não se produz gás, pois a biodigestão é diretamente afetada, e conseqüentemente não teremos geração de biogás, que gera energia e biofertilizantes. Sabe-se bem dos grandes avanços que os biodigestores alcançaram nos últimos tempos, porém, quando se fala em sistemas de controle e monitoramento de temperatura em biodigestores no Brasil, pouco se apresenta e, tão pouco, como deve ser projetado e qual a eficiência desses sistemas.

Sabendo do retorno que o biogás e o biofertilizante podem oferecer à população, o melhor rendimento do biodigestor, relacionado aqui, ao controle e monitoramento da temperatura no biodigestor, esta otimiza o processo de decomposição dos resíduos e aumenta a produção de gás, conseqüentemente teremos mais energia e biofertilizantes em menos tempo.

Com esse trabalho procura-se demonstrar que as bactérias e arqueas requerem um ambiente propício para o seu desenvolvimento, e controlando os parâmetros, neste caso a temperatura dentro do tanque, durante a biodigestão das bactérias para que possam produzir biogás e biofertilizante de maneira ainda mais satisfatória.

## 1.6 OBJETIVOS

### 1.6.1 Objetivo Geral

O trabalho em questão tem como objetivo implementar um sistema de monitoramento e controle de temperatura de um biodigestor para resíduos orgânicos, que gere maior rendimento e eficiência do sistema através do aumento de geração de biogás com o apoio de um software que irá auxiliar na tomada de decisão de acordo com as entradas e saídas.

### 1.6.2 Objetivos Específicos

- a) Definir os requisitos necessários à elaboração do projeto detalhado;
- b) Realizar os testes físicos necessários à homologação dos parâmetros de maior rendimento e eficiência do biodigestor (temperatura, pressão e vazão). Nestes testes físicos serão feitas medições em dias diferentes para validarmos os parâmetros de maior eficiência do biodigestor;
- c) Elaborar a documentação de lista de materiais necessária à manufatura do sistema de controle;
- d) Fabricar o protótipo do sistema de controle.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Os biodigestores anaeróbios têm se mostrado uma tecnologia de baixo custo econômico e energético, com baixa produção de sólidos, tolerantes a elevadas cargas orgânicas e com possibilidade de operação com elevados tempos de detenção de sólidos (AQUINO et al.,2005). O processo de obtenção do biogás pelo biodigestor não é simples, e por isso deve ser monitorado (FAZOLLO, 2011). Um dos meios de monitoramento é o desenvolvimento de biodigestores com controle automático para o acompanhamento do processo.

O trabalho está estruturado como se segue: na seção 2.1 serão relatados os principais conceitos sobre o processo de biodigestão; na seção 2.2, os principais conceitos relacionados modelos de biodigestores; na seção 2.3 trataremos sobre o ciclo de trabalho realizado no biodigestor e sobre as quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, de acordo com o processo de decomposição e na seção 2.4 serão estudados os conceitos sobre diferentes tipos de sistemas de controle.

### 2.1 BIODIGESTÃO

A biodigestão é uma forma eficiente de degradação de dejetos orgânicos, transformando-os em produtos de potencial econômico (BALMANT, 2009).

Diante das atuais tendências de crescimento populacional, aquecimento global, efeito estufa e poluição ao meio ambiente, tanto a sociedade quanto o mercado têm buscado adotar cada vez mais as práticas sustentáveis. Nesse contexto, surgiu o conceito de economia circular, que visa a utilização total de um material, produto ou componente, tirando o máximo de proveito do mesmo, reduzindo assim as agressões ao meio ambiente.

Outra forma de minimizar os impactos ambientais é fazer o uso de energias renováveis, pois o aproveitamento do lixo para a geração de energia é uma fonte de energia renovável, visto que além de contribuir como uma fonte energética também modifica o modo de descarte, diminuindo os impactos causados pela eliminação dos gases. Grande parte dos resíduos sólidos descartados pode ser reutilizada como os metais, no entanto, outros podem ser queimados como papéis e plásticos e a outra parte pode ser utilizada para gerar biogás.

Com base nos registros existentes, as primeiras referências de biogás são de meados do século XVII, quando identificaram uma substância química até então desconhecida proveniente da decomposição de matéria orgânica, mas somente após alguns anos passaram a produzir e a utilizar o biogás, sendo destinado a um hospital localizado na Índia (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008). Depois de algumas iniciativas, o biogás passou a ser relegado, recorrendo então a outras fontes de energia como o carvão e o petróleo, que eram apresentadas como infinitas naquela época. Já no Brasil o interesse pelos biodigestores foi alavancado pela crise do petróleo, sendo assim um recurso novo e de baixo incentivo no país.

A primeira menção sobre o uso de biogás se encontra no decreto 87.079 de 2 de abril de 1982 que estabeleceu o programa de mobilização energética, que inclui entre as fontes substitutivas do petróleo o “uso de resíduos para produção de biogás”. Ele era considerado uma segunda prioridade (BRASIL, 1982).

Os estudos sobre fontes renováveis de energia estão tendo cada vez mais ênfase nos últimos anos. Os países que mais desenvolveram e aprimoraram sua fonte energética, a partir do biodigestor, nos últimos tempos estão com projetos que permitem até desativar fontes não renováveis utilizadas hoje, portanto, trazer reconhecimento às pesquisas mais avançadas faz com que outros países se interessem nessa nova solução para sanar os mesmos problemas enfrentados como, por exemplo, os Estados Unidos e o Brasil estão com pesquisas voltadas a essa tecnologia.

Pelo Brasil ser grande em extensão territorial, há uma ampla variação de temperatura entre as regiões. Essa variação de certo modo impede o bom funcionamento do biodigestor, pois as bactérias responsáveis pela decomposição da matéria orgânica trabalham a temperaturas de até 20°C (psicrofílicas) e outras, a temperaturas entre 35 e 37°C (mesofílicas). Com um controle de temperatura no biodigestor, essas bactérias terão sempre um ambiente favorável para a produção do biogás.

Como na Região Sul do Brasil facilmente são encontradas temperaturas que podem ser adequar aos organismos psicrofílicos não se sabe o real comportamento desses, pois a maioria das pesquisas são baseadas nas bactérias mesofílicas. Logo, este detalhe se trata de um assunto novo, sob o ponto de vista de pesquisa, pela região apresentar uma grande variação de temperatura.

As pesquisas que serão disponibilizadas no trabalho foram realizadas na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, onde há estações bem definidas com um verão intenso e um inverno rigoroso, logo essa variação de temperatura impossibilita o bom funcionamento do biodigestor. Em contrapartida, essa região, por ser voltada à criação de suínos e à produção leiteira, apresenta certa vantagem por ser abundante em substratos para produção de biogás e biofertilizante.

Segundo Balmant (2009), em um ambiente controlado os gases liberados por dejetos têm maior potencial combustível com o aumento da proporção de metano. Quando a biodigestão é feita de forma controlada seus produtos podem servir de combustível e aumentar a qualidade do biofertilizante produzido. Para que isso seja viável é necessário um biodigestor ou um biorreator.

No entanto, as escolhas malfeitas ou mal planejadas podem reduzir drasticamente a eficiência do biodigestor. Por se tratar de um processo executado por micro-organismos, este se torna muito susceptível a variações bruscas de temperatura, pH e concentração de nutrientes no processo (BORBA; SOUZA; SCHAEFFER, 2012).

## 2.2 MODELOS DE BIODIGESTORES

Segundo Santos (2017), vários modelos de biodigestor foram desenvolvidos para a geração de biogás. Não existe um modelo ideal, porém existem vários tipos como os de batelada, vertical, horizontal, contínuo e descontínuo, mas cada um com sua forma de aplicação e características específicas.

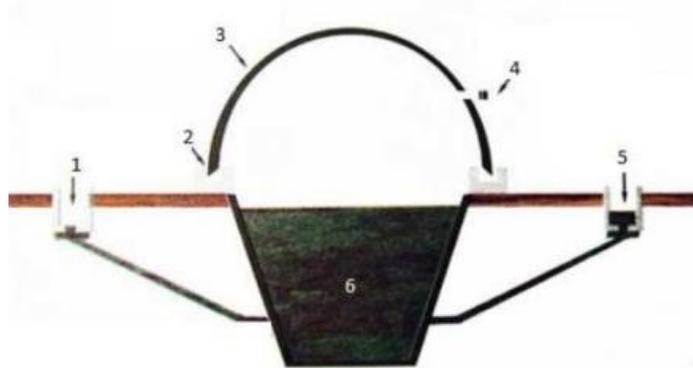
De acordo com Soares e Silva (2010), os biodigestores por serem de baixo custo, fácil manuseio e bom rendimento como o modelo chinês e o indiano são biodigestores de operação contínua e os mais utilizados no Brasil.

Para atender as exigências dos usuários, os biodigestores precisam ser de fácil manuseio e tecnologicamente avançados. Devem ser de baixo custo e o rendimento deve apresentar retorno rápido. Os equipamentos, para apresentarem um bom funcionamento, necessitam de um criterioso acompanhamento, garantindo o bom funcionamento.

### 2.2.1 Biodigestor modelo canadense

O modelo de biodigestor canadense, segundo Shubeita (2014), tem uma boa produção de biogás por ter uma lagoa para armazenagem da biomassa, onde sua largura é maior que a profundidade, possuindo assim uma grande área de exposição ao sol. Segundo o autor, esse equipamento é coberto por uma cúpula de lona com um sistema de vedação da lona com a lagoa para evitar a dispersão do gás e fazendo com que a lona vá inflamando conforme é produzido o biogás, uma entrada de biomassa, uma saída de gás e para controlar o excedente e uma saída de biofertilizante, conforme figura 2.

Figura 2 – Modelo de biodigestor canadense

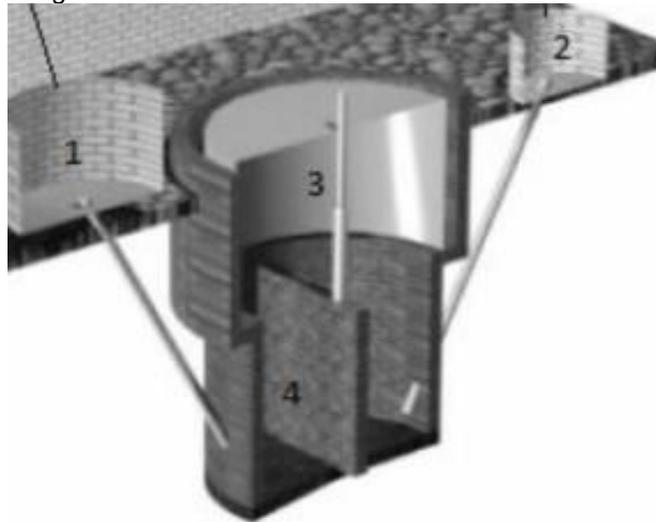


Fonte: Shubeita (2014)

### 2.2.2 Biodigestor modelo indiano

Segundo Costa (2011), o biodigestor indiano caracteriza-se por dividir o tanque de fermentação em duas câmaras (figura 2), separando o dejetos de entrada do que já foi fermentado. O dejetos utilizado para alimentar o modelo indiano deve ter uma pequena quantidade de resíduos sólidos inferior a 8%, facilitando a movimentação dentro da câmara e evitando o entupimento da entrada e saída pelos canos, conforme figura 3.

Figura 3 – Modelo de biodigestor indiano

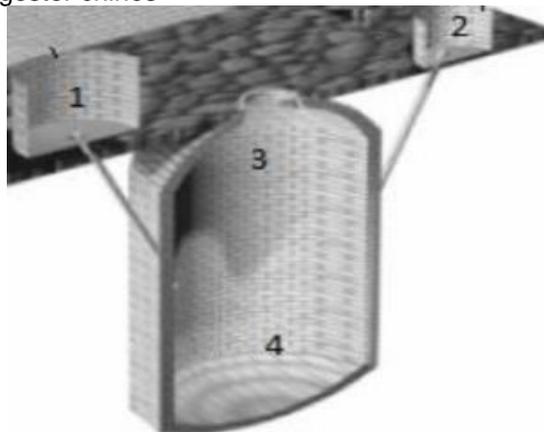


Fonte: Shubeita (2014)

### 2.2.3 Biodigestor modelo chinês

O modelo de biodigestor chinês, segundo Costa (2011), é construído basicamente em alvenaria e seu formato faz com que a própria pressão interna com o acúmulo de gás inicie o deslocamento do fluido da câmara. No biodigestor chinês (figura 4) parte do gás criado é liberado para a atmosfera, controlando dessa maneira a pressão interna.

Figura 4 – Modelo de biodigestor chinês



Fonte: Shubeita (2014)

De acordo com Shubeita (2014), esse modelo de biodigestor sofre com rachaduras e vazamentos por ser construído em alvenaria. Diferente do modelo indiano ele não possui divisão na câmara de fermentação e todo o dejetos depois de fermentado é retirado para o reservatório de biofertilizante.

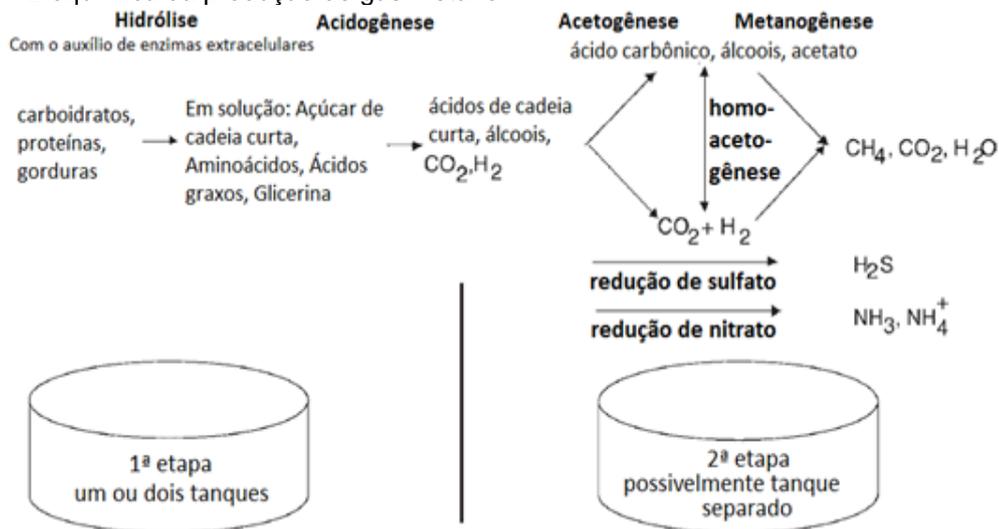
Soares e Silva (2010) enfatizam ainda que o modelo chinês, assim como o modelo indiano, também é enterrado no solo e se utiliza da baixa variação de temperatura para aumentar sua eficiência.

### 2.3 BIOREAÇÕES

Conforme Kochhann e Eisermann (2018), no que diz respeito à produção de biogás no biodigestor, as bactérias e arqueas são os microrganismos responsáveis pela digestão da matéria orgânica depositada dentro do equipamento.

Segundo Deublein e Steinhauser (2008), o ciclo de trabalho realizado no biodigestor, além de ser complexo, é dividido em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, de acordo com o processo de decomposição (Figura 5). Essas quatro etapas podem se subdividir em dois grandes grupos que possuem uma inter-relação profunda, onde o grupo 1, que é composto pelas fases da hidrólise e acidogênese realizam a digestão da matéria em partes menores. Já o grupo 2, que tem as fases acetogênese e metanogênese, digere e que resta da matéria, separando os produtos provenientes desse trabalho.

Figura 5 – Bioquímica da produção de gás metano



**Fonte:** Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)

As fases individuais são realizadas por diferentes grupos de microrganismos divididos por gêneros. Há três gêneros que produzem metano em diferentes faixas de temperatura: os microrganismos psicrófilos (15-30 °C), os mesófilos (30-50 °C) e os termófilos (>50 °C) (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

O tempo de residência desses microrganismos e conseqüentemente o tamanho do reator pode ser reduzido com o aumento da temperatura de fermentação (Quadro 1). Porém, a qualidade do gás (concentração de metano) diminui com o aumento da temperatura de fermentação.

Quadro 1 – Faixas de temperatura

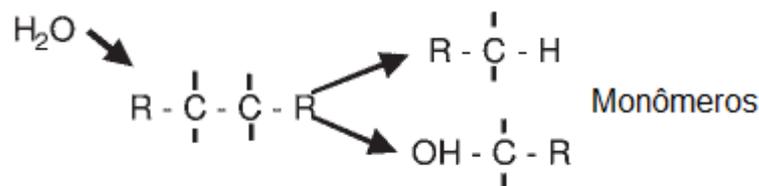
	Faixa de temperatura	Tempo de residência	Porcentagem de todas as plantas	Vantagens
<u>Psicrofílico</u> (fermentação a frio)	15-30 °C	aprox. 60 d	3%	-
<u>Mesofílico</u> (fermentação morna)	30-50 °C	17-22 d 22-28 d 28-38 d 35-45 d	92%	Processo estável Baixo consumo de calor Boa qualidade de biogás -
<u>Termofílico</u> (fermentação quente)	> 50 °C	aprox. 15 d	5%	Alta <u>degradabilidade</u> e velocidade de degradação Possibilidade de higienização

**Fonte:** Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)

### 2.3.1 Hidrólise

Na fase da hidrólise, segundo Deublein e Steinhauser (2008), a biodigestão das bactérias resulta na transformação da biomassa por bactérias facultativas e anaeróbias. As ligações covalentes são divididas em uma reação química com água (Figura 6), pois os microrganismos anaeróbios facultativos tomam o oxigênio dissolvido na água e causam o baixo potencial de troca de elétrons entre moléculas necessárias para microrganismos obrigatoriamente anaeróbios.

Figura 6 – Formação de monômeros



**Fonte:** Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)

Segundo Raja e Wazir (2017), a biomassa é composta, em sua maioria, por grandes polímeros orgânicos: amido, proteínas, gorduras e carboidratos, que pela hidrólise são divididos em moléculas menores, como aminoácidos, ácidos graxos e

açúcares simples. Além de ser o primeiro passo, ela é essencial na fermentação anaeróbica, já que as bactérias fermentativas hidrolisam a matéria orgânica complexa em moléculas solúveis. Alguns dos produtos de hidrólise, incluindo hidrogênio e acetato, podem ser usados mais tarde no processo.

### 2.3.2 Acidogênese

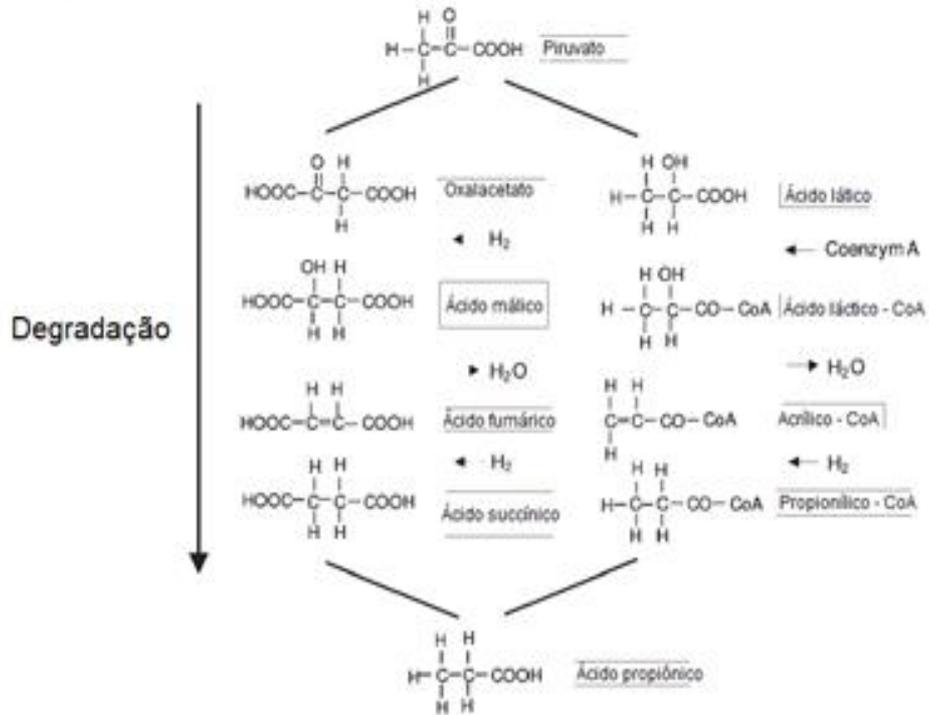
Segundo Raja e Wazir (2017), os microrganismos acidogênicos degradam ainda mais a biomassa e os produtos orgânicos após a hidrólise. Essas bactérias fermentativas produzem um ambiente ácido no tanque digestivo enquanto criam amônia, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido sulfídrico, ácidos graxos voláteis mais curtos, ácidos orgânicos, e também indícios de outros subprodutos. Os principais ácidos produzidos são o ácido acético, o ácido propiônico e o ácido butírico.

Os monômeros da fase hidrolítica são absorvidos por diferentes bactérias facultativas e anaeróbias e são degradados. Dessa forma, o material orgânico solúvel oriundo da fase anterior agora se torna ácido orgânico simples metabolizado pelas bactérias fermentativas. A concentração dos íons de hidrogênio intermediários formados afeta o tipo de produtos da fermentação. Quanto maior a pressão parcial do hidrogênio, menos compostos reduzidos são formados (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

Deublein e Steinhauser (2008) destacam abaixo os caminhos da degradação (figura 7):

- a) Carboidratos: Formação de ácido propiônico pela bactéria propioni via succinato e via acrílica;
- b) Ácidos graxos: Estes são degradados, por exemplo, pelas acetobacter por  $\beta$ -oxidação. Conseqüentemente, o ácido graxo é ligado à Coenzima A e depois oxida passo a passo, separam-se dois átomos de C, que são libertados como acetato.
- c) Aminoácidos: Estes são degradados pela reação de Stickland tomando dois aminoácidos ao mesmo tempo - um como doador de hidrogênio e o outro como receptor - no acoplamento ao acetato, amônia e CO<sub>2</sub>. Durante a divisão da cisteína o sulfato de hidrogênio é liberado.

Figura 7 – Degradação de piruvato

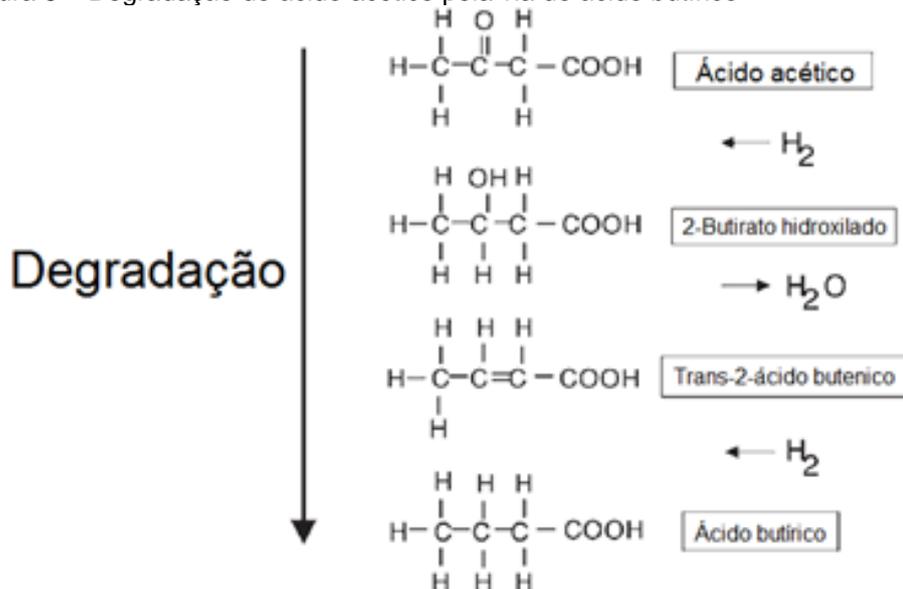


Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)

Formação de ácido butírico (via do ácido butírico) principalmente por clostridium.

Ácido acético → 2-hidroxibutirato → trans -2- ácido butênico → ácido butírico → butanol (Figura 8).

Figura 8 – Degradação do ácido acético pela via do ácido butírico



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)

### 2.3.3 Acetogênese

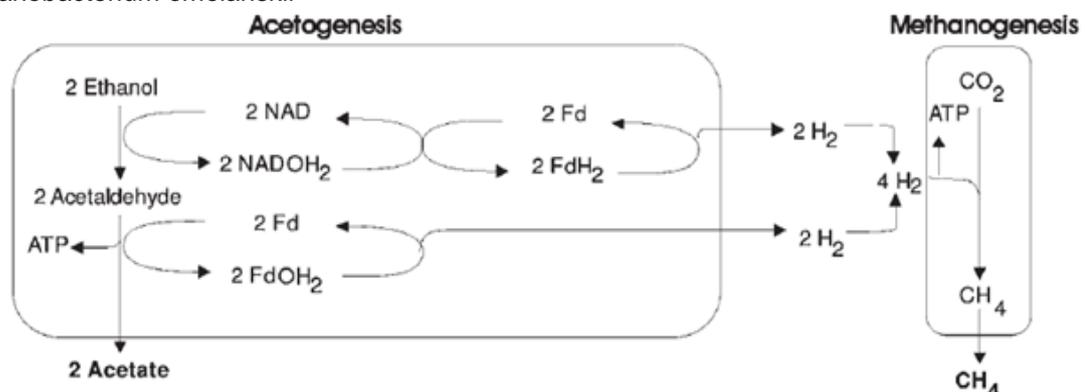
Conforme Raja e Wazir (2017), a acetogênese é a criação de acetato a partir de fontes de carbono e energia. Esses microrganismos reduzem/modificam muitos produtos criados na acidogênese em ácido acético,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ . Os acetogênicos quebram a biomassa para que a grande maioria possa ser utilizada pelos metanogênicos para criar metano.

De acordo com Deublein e Steinhauser (2008), as bactérias acetogênicas são produtoras obrigatórias de  $\text{H}_2$ . A formação de acetato por oxidação de ácidos graxos de cadeia longa ocorre por conta própria e é possível apenas com pressão de hidrogênio muito baixa. Essas bactérias obtêm a energia necessária para o seu crescimento e sobrevivência apenas em concentrações muito baixas de  $\text{H}_2$ . As bactérias acetogênicas vivem em simbiose com os microrganismos metanogênicos, pois estes sobrevivem com maior pressão parcial de hidrogênio, removendo constantemente os produtos do metabolismo das bactérias acetogênicas, controlando a pressão parcial de  $\text{H}_2$  adequado para a sobrevivência das acetogênicas.

Deublein e Steinhauser (2008) ainda reforçam que, com a pressão parcial de hidrogênio controlada, as bactérias acetogênicas formam principalmente  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e acetato. Caso contrário, com pressão parcial de hidrogênio maior, predominará a formação de ácidos butírico, caprônico, propiônico e valérico e etanol.

Da produção de metano no lodo anaeróbico, 30% é atribuída à redução de  $\text{CO}_2$  por  $\text{H}_2$ , e apenas 5 a 6% ao hidrogênio dissolvido, pois o hidrogênio pode mover-se diretamente dos microrganismos acetogênicos para os metanogênicos, sem se dissolver no substrato (figura 9).

Figura 9 – Transferência de Hidrogênio Interespecífica”, como por exemplo em uma cultura de *Methanobacterium omelanskii*

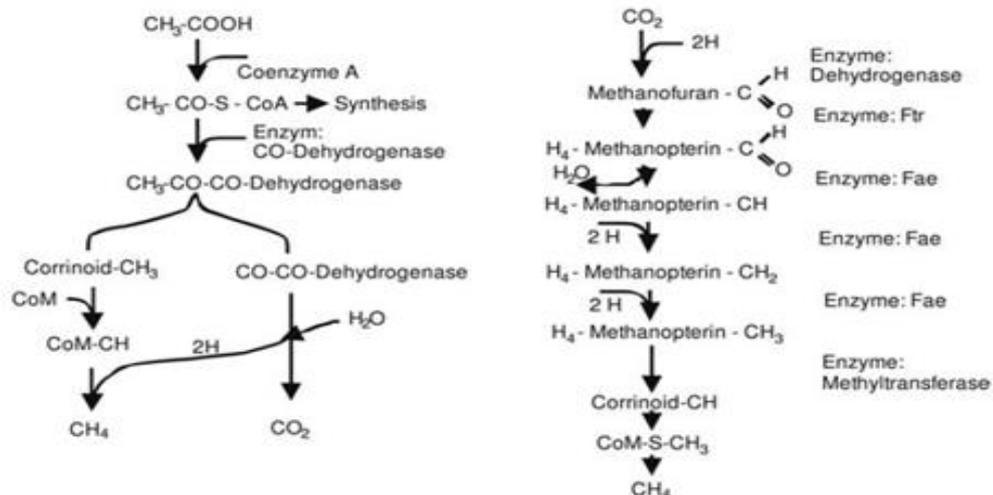


Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)

### 2.3.4 Metanogênese

Segundo Deublein e Steinhauser (2008), a formação do metano ocorre no quarto estágio sob condições estritamente anaeróbicas. Essa reação ocorre com a liberação de energia, mas todas as espécies metanogênicas não degradam todos os substratos. Os substratos aceitáveis para a metanogênese podem ser divididos em três grupos: o tipo de CO<sub>2</sub>, tipo de metil e acetato (figura 10).

Figura 10 – Formação de metano a partir de acetato 8 (esquerda) e de dióxido de carbono (direita) (CoA = Coenzima A, CoM = Coenzima M)



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)

A Figura 10 ilustra o caminho da formação de metano a partir de acetato e/ou CO<sub>2</sub> em microrganismos. Conforme Deublein e Steinhauser (2008), quando a formação de metano funciona, também ocorre o bom funcionamento da fase acetogênica. Sendo perturbada a formação de metano ocorre a super acidificação, dessa maneira, todas as reações de formação de metano têm diferentes rendimentos. Da formação do metano apenas 27 - 30% resulta de redução, enquanto 70% advém do acetato durante a metanação.

De acordo com Raja e Wazir (2017), pela metanogênese ser o estágio final da digestão anaeróbica, a criação de metano é construída a partir dos produtos finais da acetogênese e de alguns produtos das fases anteriores, hidrólise e acidogênese. Duas são as formas gerais de criar metano na metanogênese a partir do ácido acético e dióxido de carbono, que são os principais produtos das reações iniciais:





O caminho, que envolve o ácido acético na metanogênese, é a principal via para a geração de metano, pois gera metano e  $\text{CO}_2$ , que são os dois principais produtos da digestão anaeróbica, enquanto  $\text{CO}_2$  é convertido em metano e água pela reação (RAJA e WAZIR, 2017).

## 2.4 CONTROLADORES

Em função da região em que nos encontramos, os sistemas de controle de temperatura podem ser uma ferramenta útil para manter a estabilidade e a eficiência do processo de biodigestão. Porém, não é possível dimensionar sistemas de controle sem ter modelos matemáticos do processo (planta) em que deve ser feito o controle. Vale destacar que, quanto mais próximo for o comportamento do modelo em relação à situação real, melhor será a eficiência do controle. Ou seja, a modelagem do sistema é a descrição matemática do funcionamento do mesmo. No caso do biodigestor é utilizado o balanço de massa dos compostos e dos microrganismos presentes como estrutura matemática para o modelamento (BALMANT, 2009). O número de indivíduos da cultura de bactérias é descrito com o modelo de cinemática de Monod (BALMANT, 2009).

Conforme Pereira (2017), um sistema de controle tem uma retroalimentação, que faz com que ele tenha uma resposta ao estado atual e não somente a entrada. Dessa forma, é possível projetar sistemas que podem estabilizar em determinados valores e até aumentar a precisão de sistemas adjacentes. Geralmente, um sistema de controle apresenta 3 estruturas em seu diagrama: Planta ( $H(s)$ ), Controlador ( $G$ ) e Retroalimentação (Feedback).

Existem dois tipos de controles amplamente utilizados, que são o controle analógico e o controle digital. Por ser um sinal contínuo, o controle analógico é dimensionado com auxílio da transformada de Laplace (transfere o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência) com o objetivo de impor ao sistema a resposta mais rápida ao valor alvo desejado; já o controle digital, como trabalha com tempo por amostragem, utiliza como ferramenta matemática a transformada Z (análoga de Laplace para tempo discreto) para mesma finalidade (NISE, 2011).

### 2.4.1 Controle liga/desliga

Conforme Pereira (2017) este é o tipo de controle mais simples que existe no mercado, sendo amplamente utilizado tanto domesticamente quanto industrialmente. Ele consiste em uma chave que, ao receber a realimentação da planta e perceber que o nível do sinal do sistema está abaixo do desejado, alimenta o sistema com 100% da carga disponível e, caso ocorra o contrário, corta completamente a carga de alimentação do sistema. Geralmente, este tipo de controlador é utilizado com histerese para trabalhar em uma faixa de nível, reduzindo assim a frequência de acionamento da carga e aumentando a vida útil da chave que o aciona. O grande problema desse tipo de controlador é que ele nunca atinge a estabilidade, pois ele sempre oscila ao redor do valor final, logo processos que necessitam de precisão não podem usar esse tipo de controle, pois a incerteza do valor final é muito grande.

### 2.4.2 Controlador proporcional integral derivativo

De acordo com Ogata (2011), metade dos controladores industriais em uso nos dias atuais utiliza estratégias de controle PID ou PID modificadas. Sua utilidade reside na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle e parcialmente à sua simplicidade funcional, permitindo operá-los de maneira simples e direta.

A estrutura de controle PID mais utilizada na literatura e que representa a relação matemática entre o sinal de controle e o erro foi dada por Astrom (1995):

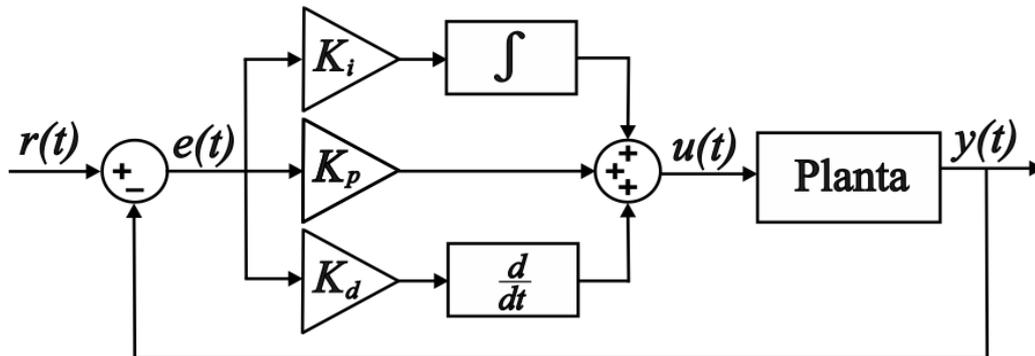
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad [1]$$

onde  $u(t)$  é o sinal de controle e  $e(t)$  é o sinal do erro ( $e(t) = r(t) - y(t)$ ),  $T_i$  é a integral do tempo,  $T_d$  é a derivada do tempo. Outra forma de representar o algoritmo PID é pela função de transferência:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad [2]$$

A configuração apropriada desses parâmetros melhorará a resposta dinâmica, reduzirá o *overshoot*, eliminará erros de estado estacionário e aumentará a estabilidade do sistema (Astrom, 1995). A estrutura de um controlador PID em diagrama de blocos pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama de blocos de um controlador PID



Fonte: Autora

O controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID) gera sua saída proporcionalmente ao erro proporcionalmente à integral do erro e proporcionalmente à derivada do erro. Se o modelo matemático da planta a ser controlada puder ser obtido, então é possível aplicar várias técnicas de projeto na determinação dos parâmetros do controlador que vão impor especificações do regime transitório e do regime permanente do sistema de malha fechada. Porém, se a planta não puder ter seu modelo matemático obtido facilmente, então uma aproximação analítica para o desígnio de um controlador PID não será possível. Então teremos que recorrer a aproximações experimentais para a afinação do controle PID.

O controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) permite que funções transferências, de até segunda ordem, sejam controladas relativamente ao tempo de assentamento, sobressinal e tempo de resposta do sistema (NISE, 2011). Este controlador, para fins de descrição matemática, é um controlador que tem 3 ganhos, sendo um deles ligado diretamente ao erro ( $k_p$ ), outro ligado a um derivador ( $k_d$ ) e o último ganho ligado a um integrador denominado  $k_i$  (NISE, 2011).

Existem vários métodos de calibração de um controlador PID para o sistema, sendo que alguns são práticos (utilizados quando o modelo matemático da planta é desconhecido) e outros, teóricos, como o método de Ziegler Nichols, para análise de estabilidade em malha fechada, o método Root-Locus e o método da resposta em frequência (OGATA, 1995).

Existem várias formas para calibração, sendo que as duas mais comuns são: pela resposta transitória e pelo ganho crítico. O controle pela resposta transitória, como o próprio nome já diz, é baseado na tangente da fase transitória da resposta do sistema, desta forma ajusta-se a resposta para que a tangente seja a da resposta o mais rápido possível sem o sobre sinal, ou seja, superamortecida. No controle pelo

ganho crítico, o qual é ajustado utilizando o método de Routh no limite da estabilidade do sistema, ou seja, zerando algum termo da tabela de Routh para que o sistema seja criticamente amortecido (NISE, 2011).

### **2.4.3 Domínio da frequência**

Em geral, os sistemas são descritos com equações diferenciais que, dependendo da ordem, podem ou não ser de difícil solução. Porém, existem métodos que podem ser utilizados para a solução destas equações diferenciais, simplificando o sistema e reduzindo muitas vezes a sua ordem (NISE, 2011). Para sistemas discretos (digitais ou de aquisição pontual), utilizam-se a transformada Z, que transfere o sinal do domínio do tempo discreto para o domínio da frequência, sendo assim possível resolver as equações com somas, adições, divisões, multiplicações e convoluções (OGATA, 1995).

Para sinais contínuos no tempo, utiliza-se a transformada de Laplace e a transformada de Fourier, onde ambas trabalham no domínio da frequência, tornando as equações, assim como na transformada Z, passíveis de resolução com operadores simples (NISE, 2011).

### **2.4.4 Controle discreto**

De acordo com Pereira (2017) o controle discreto, controlador que trabalha baseado no tempo discreto, não se diferencia do controle analógico em sua estrutura, pois a diferença está nas técnicas de análise de estabilidade e dimensionamento. Para os sinais discretos têm-se tempos de amostragem que influenciam na estabilidade e na velocidade do controlador. É um controle de dimensionamento mais difícil, porém de implementação mais fácil e barata.

Para que o dado amostrado possa ser processado digitalmente é necessário ser convertido em um dado digital. O componente responsável por essa conversão é chamado de conversor AD (Analógico/Digital). Este conversor adequa o sinal em um espaço limitado de níveis, sendo na maior parte dos casos binários.

A conversão da resposta digital acontece de forma semelhante, porém por um componente chamado de conversor DA (Digital/Analógico), o qual, na maior parte dos casos, utiliza a modulação por frequência (PWM) para a conversão. O sistema de

controle precisa lidar com essas conversões entre os sinais analógicos e digitais de forma que mantenha a estabilidade do sistema.

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção serão descritos os métodos utilizados para o monitoramento e controle da temperatura do sistema. A finalidade do controle de temperatura é ter amostras de gás e biofertilizantes, porém estes dois produtos não são parte do escopo do estudo.

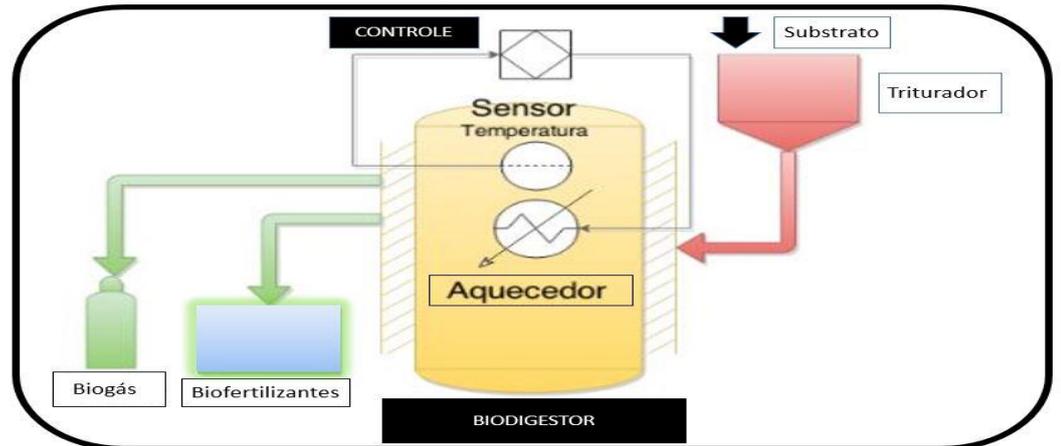
#### 3.1 PROCESSO DO FUNCIONAMENTO DO BIODIGESTOR

No presente trabalho de pesquisa se empregará de observação, coleta de dados, análise de dados e interpretação dos resultados examinados para avaliar o rendimento de biodigestor em diferentes faixas de temperatura para desenvolver um sistema de controle e monitoramento de temperatura, cuja finalidade será a produção de gás metano em níveis satisfatórios e geração de biofertilizante.

Inicialmente precisamos do acesso ao biodigestor que se será instalado junto às instalações do campus da Faculdade Horizontina (FAHOR). Será colocado no equipamento a matéria prima, sendo utilizados restos orgânicos, de pequeno porte e deixá-lo nas condições de funcionamento conforme o monitoramento da temperatura do biodigestor.

Inicialmente estes restos orgânicos foram coletados dos resíduos alimentares já separados dos estabelecimentos de alimentação da cidade de Horizontina no mês de outubro de 2018. O processo consistiu na colocação dos resíduos orgânicos num triturador, e estes foram homogeneizados para serem depois deslocados através do acionamento do motor bomba para o tanque principal. Para uma melhor percepção, a figura 12 mostra o diagrama do equipamento.

Figura 12 – Esquema de processo do biodigestor



Fonte: Autora

Tem-se em uma das propostas a temperatura ambiente que se considera de 15 a 20°C e a proposta de temperatura controlada que está na faixa de 35 a 37°C. Para realizar as medições de temperatura, utilizaremos de um termômetro digital instalado junto ao equipamento de digestão anaeróbica e depois instalaremos o controlador lógico programável junto ao sistema de monitoramento com software.

Segundo Gil (2002), o estudo experimental de campo procura selecionar e controlar alguma variável que interfira no resultado de um objeto de estudo determinado, definindo como essas variáveis podem ser mensuradas, a fim de que se possa fazer uma observação sobre o produto reagente da causa em estudo. Portanto, define-se como pesquisa experimental de campo o presente trabalho, pois a temperatura do biodigestor, que estará exposto ao ar livre, será controlada e onde serão produzidos biogás e biofertilizante. Também será de caráter quantitativo pelas medições acompanhadas serem todas elas registradas e os resultados serem apresentados em números e porcentagens, avaliando o rendimento nas duas propostas de temperatura e controladas através de um software.

Conforme Kochhann e Eisermann (2018), o equipamento possui facas que forçam o lixo a cruzar os rolos e, pela sua proximidade, auxiliam a esmagar o lixo. O triturador é movido, em um dos lados, por um par de engrenagens e, no outro lado, por um motor elétrico de 0,5 CV e um redutor de alto rendimento.

Após o material passar pelo triturador e ser direcionado até o biodigestor, e para não precisar ocorrer manualmente, a bomba modelo foi utilizada para fazer a movimentação desse material já preparado, que é canalizado por canos de inox até o reservatório principal para fazer a biodigestão.

### 3.1.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Na pesquisa experimental de campo deve haver um acompanhamento das atividades do problema em questão para calcular os resultados e controlar as variáveis. Para garantir a acuracidade dos resultados foram utilizados os seguintes recursos:

- Acesso ao biodigestor;
- Termômetro digital (para medir a temperatura do biodigestor) (Anexo A);
- Conversor (Anexo B);
- Controlador PID;
- Software SITRAD (Apêndice A);
- Medidor do tipo sanfona (para mensurar a produção de biogás);
- Analisador de metano (para saber o percentual de metano);
- Computador (para tomar nota de todos os resultados extraídos);
- Folha de papel e caneta (para eventuais anotações do processo);
- Dejetos orgânicos (material de consumo das reações).

### 3.1.2 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Inicialmente, como todo o material orgânico a ser utilizado não tem tamanho uniforme, utilizou-se de um triturador para poder homogeneizar o dimensional de todo o lixo orgânico selecionado para fazer a biodigestão no equipamento.

Uma vez homogeneizado o material orgânico, e colocado no tanque de inox foi dado o início ao processo de fermentação. Que terá uma duração de aproximadamente 30 dias, nas quais serão realizadas as medições de temperatura e analisadas os produtos resultados no final do processo (gás metano e biofertilizantes)

O tanque de digestão do material orgânico é todo construído em aço inox e possui capacidade de 1 m<sup>3</sup>. Em seu interior há um misturador movimentado com um motor redutor para realizar a homogeneização do material, impedindo que as bactérias formem colônias localizadas todas em um dos lados do tanque. O

equipamento tem em seu contorno algumas saídas, devidamente vedadas, para a instalação dos equipamentos de medição.

Após todo o processo ser realizado dentro do tanque de digestão, o gás é canalizado por mangueiras de plástico (tubulação de PVC marrom), e armazenado em um “balão” fabricado com membrana geotêxtil. O gás proveniente do biodigestor também pode ser encanado para a utilização, sendo que a abertura e fechamento ocorrem por válvulas de esfera de aço inoxidável e sede de teflon.

### 3.2 MONITORAMENTO DA TEMPERATURA

Para realizar o acompanhamento da temperatura de trabalho das bactérias dentro do biodigestor, utilizou-se de um termômetro digital modelo TI-44E plus com sensor de resistência, conversor analógico digital e interface serial RS-485. Para controle de temperatura foi usado o misturador ou aquecedor para atingir a faixa de valores entre 35 a 37 graus.

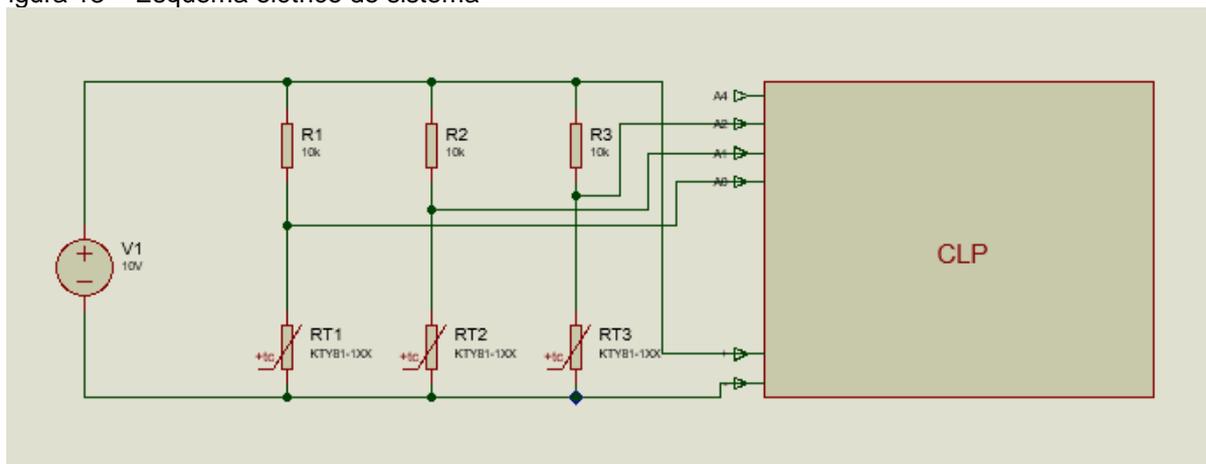
Conforme Kochhann e Eisermann (2018), a seguinte citação é relevante:

“A temperatura de operação é um fator importante para a estabilidade do processo, deve ser cuidadosamente regulada dentro de uma faixa de temperatura de operação. De acordo com Seadi (2008), o processo de digestão anaeróbica é dividido em três faixas de temperatura: psicrófilas (abaixo de 25 °C), mesofílicas (25 °C a 45 °C) e termofílicas (45 °C a 70 °C), havendo uma relação direta com o tempo mínimo de retenção. Escolher a temperatura ideal para o funcionamento envolve balancear características. A digestão termofílica permite maiores taxas de carregamento do biodigestor, além de uma maior destruição do patógeno e uma elevada degradação do substrato. Todavia, é mais sensível a toxinas e pequenas alterações no ambiente, sendo também menos atrativa do ponto de vista energético, pois é necessário mais calor para o processo, porém o tempo de retenção para estabelecer uma população é menor. Já na digestão mesofílica as bactérias são capazes de suportar as mudanças de temperatura, porém seu tempo de retenção é maior. Atualmente, nas modernas instalações, a temperatura é cuidadosamente controlada, podendo ser mantida através de bons isolamentos, banhos de água ou através de aquecimento solar passivo. Calor pode ser adicionado usando trocadores de calor na mistura reciclada, resistências ou injeção de vapor diretamente no biodigestor (OSTREM E THEMELIS, 2004). Quanto a injeção de vapor é preciso considerar que ela pode ser usada no tratamento prévio do substrato e não na injeção direta dentro do biodigestor. É fácil de entender que a alta temperatura vai destruir uma parte das colônias bacterianas.”

Para realizar o monitoramento de temperatura foram utilizados 3 sensores modelo SB41, da Full Gauge, conhecidos como termoresistores de valor de 10k, este valor indica a resistência da temperatura ambiente (25°C). O valor de saída destes sensores será o parâmetro físico de resistência conforme a temperatura varia. Para ler estes valores de resistência será inserido num divisor de tensão colocando os

sensores de temperatura em série com um resistor de 10k, sendo alimentado todo o circuito com uma tensão 10V. Na saída do divisor haverá uma variação de tensão conforme a temperatura varie, sendo este valor lido por um controlador lógico programável, configurado para leitura de dados analógicos de 0 a 10V. A figura 13 seguinte mostra o esquema elétrico da interligação do circuito do sensor junto ao controlador lógico programável.

Figura 13 – Esquema elétrico do sistema



**Fonte:** Autora

O CLP utilizado é da marca WEG, modelo clic 02, com 4 entradas analógicas, 8 entradas digitais. Com alimentação de 110/220V e saída de 24V. Apenas será utilizado para leitura de temperatura.

### 3.3 ETAPAS DE CONTROLE DA TEMPERATURA

No sistema do biodigestor a finalidade é produzir gás metano e biofertilizantes, como já dito anteriormente, para termos este resultado se precisa controlar a temperatura numa faixa de 35 a 37 graus. Fisicamente o conjunto é considerado um sistema de segunda ordem, estando relacionado com a seguinte função de transferência de ordem geral:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2} \quad [3]$$

Onde:

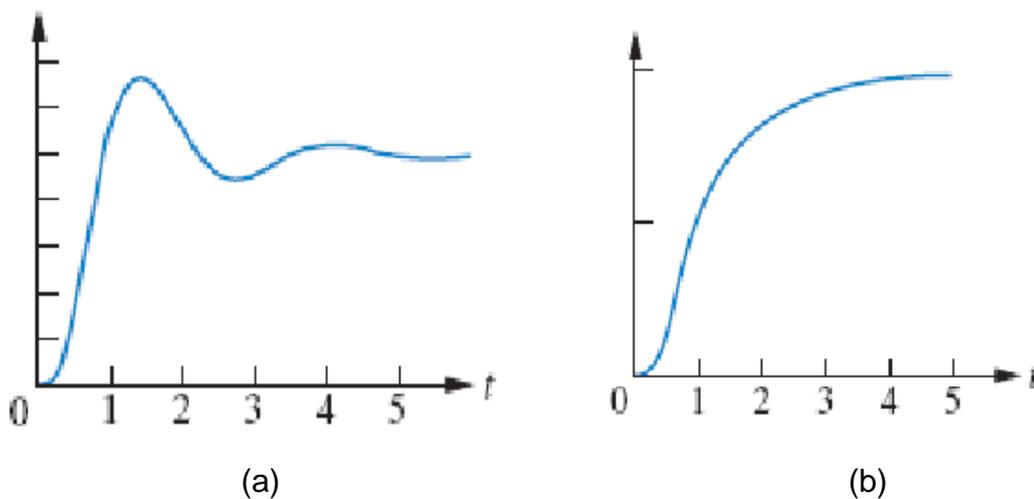
$\omega_n$  – Frequência Natural de Oscilação do Sistema Sem Amortecimento

$\zeta$  – Fator de Amortecimento do Sistema

Estes 2 parâmetros normalmente são analisados para verificar o tipo de amortecimento do sistema assim como saber o tipo de resposta que este poderá apresentar.

Conforme a teoria de controle e análise dos parâmetros  $\omega_n$  e  $\zeta$  e ainda ser um sistema não robusto, podemos considerar supostamente, que a variação de temperatura se comporte como um sistema superamortecido ou subamortecido, sendo representado pelas seguintes figuras a e b (14):

Figura 14 – (a) Sistema subamortecido e (b) Sistema superamortecido



Fonte: Autora

A representação do sistema de segunda ordem geral é constituída por dois momentos: a resposta em regime transitório e em regime permanente.

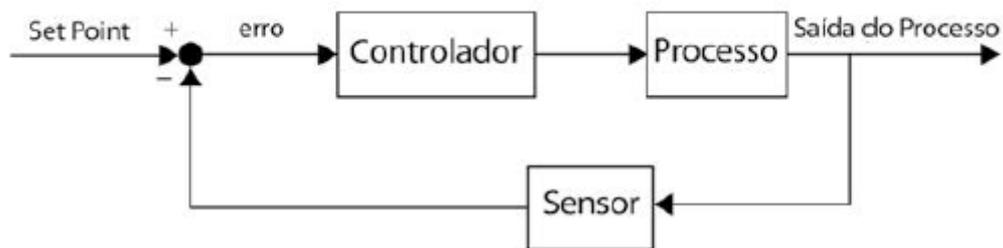
A resposta de um sistema estável a aplicação de uma dada entrada pode ser dividida em duas partes: a resposta transitória e a resposta em regime permanente. A resposta transitória é um período de tempo que decorre logo após a aplicação de uma nova entrada ao sistema em que se dão grandes variações na saída do processo. É o tempo que o sistema se "acomoda" ou "reage" a nova entrada. Por outro lado, a resposta em regime permanente caracteriza o comportamento da saída do sistema após um longo tempo após a aplicação de um dado sinal de entrada. (SILVA, 2000)

Tanto no sistema subamortecido, quanto no sistema superamortecido, não serão objeto de estudo o regime transitório, pois este não impactará significativamente na saída do sistema, ou seja, na produção final de gás metano e biofertilizante. Assim, o foco do estudo em questão será dado sobre o regime permanente.

### 3.4 AÇÕES DE CONTROLE

Sabe-se que para o sistema possuir controle, é necessário fazer uso da malha fechada, a qual consiste em comparar o valor da entrada com o valor da saída, e essa diferença conhecida como ERRO ou DESVIO, será o sinal a ser utilizado no controlador. A seguinte figura 15 mostra o diagrama de blocos de uma malha fechada:

Figura 15 – Sistema de malha fechada do biodigestor



Fonte: Blog Instrumentação e Controle, 2014

O controlador a ser utilizado será o CLP (Controlador Lógico Programável) responsável pelas ações de controle. A ação de controle a ser usada será sobre o uso do conhecido controlador Proporcional-Integral-Derivativo. Para este estudo de caso, será apenas utilizado o controle proporcional, pelo fato de trabalhar com uma variável apenas (a temperatura) e ainda analisar a mesma em regime permanente somente.

O máximo de erro permitido foi estipulado em 2 graus, sendo este valor o sinal de controle processado pelo controlador, para atuar no sistema. O controle proporcional a ser usado foi baseado pelo método Ziegler-Nichols, fundamentado nas seguintes relações:

Ganhos	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1,2}$	0
PID	$0,60K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Onde:

$K_p$ : valor do ganho proporcional

Ti: valor do ganho integral

Td: valor do ganho derivativo

A função de transferência do controlador PID foi demonstrada na equação (2), e uma outra maneira de representar esta equação a partir dos ganhos é dada por:

$$PID = Kp \left( 1 + \frac{K_i}{S} + K_d S \right) \quad [4]$$

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção será apresentado os resultados do embasamento teórico, visto nas seções 2 e 3. Ainda será mostrado nesta seção os valores de temperatura que foram realizados num período de 18 dias.

### 4.1 PROCESSO DO FUNCIONAMENTO DO BIODIGESTOR

Conforme a seção 3.1 se terá acesso ao sistema de pequeno porte de biodigestor localizado na FAHOR. Este sistema é mostrado pela figura 16.

Figura 16 – Esquema de processo do biodigestor



**Fonte:** Autora

Ainda o sistema está em fase de melhorias, pois futuramente se terá uma sala de controle para monitorar as variáveis que sejam necessárias.

### 4.2 MONITORAMENTO E CONTROLE DE TEMPERATURA

Anteriormente citado, o valor de temperatura das medições variou em torno de 25 a 30 graus. Esses valores, foram mensurados em torno de 18 dias, conforme mostrado na tabela 1.

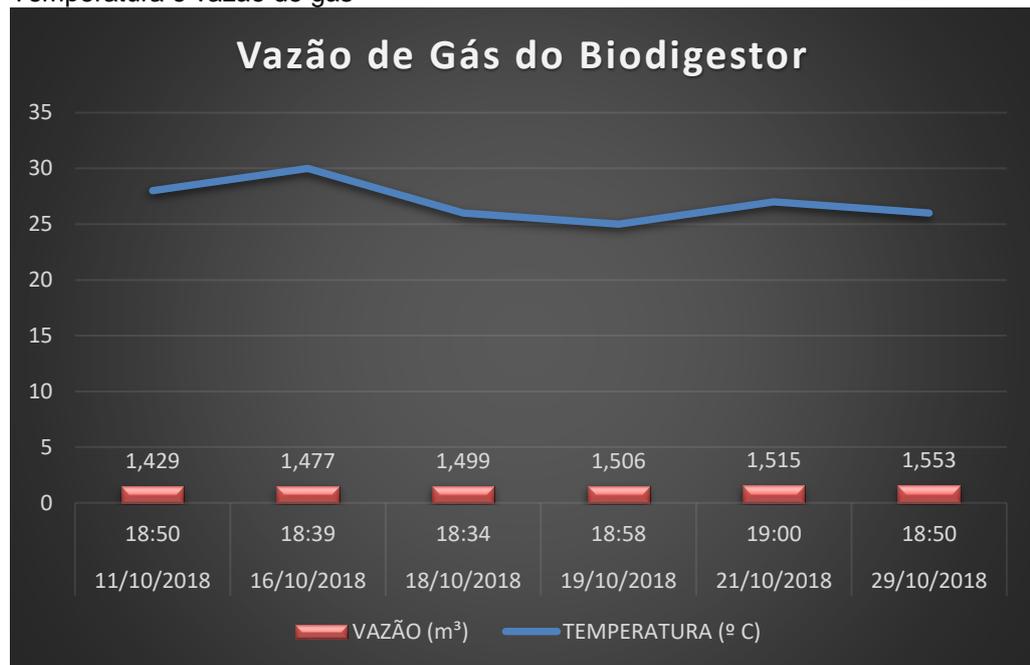
Tabela 1 –Tabela de leituras vazão do gás

Planilha Leituras Vazão do Gás do Biodigestor FAHOR			
DATA	HORÁRIO	TEMPERATURA (° C)	VAZÃO (m <sup>3</sup> )
11/10/2018	18:50	28	1,429
16/10/2018	18:39	30	1,477
18/10/2018	18:34	26	1,499
19/10/2018	18:58	25	1,506
21/10/2018	19:00	27	1,515
29/10/2018	18:50	26	1,553

Fonte: Autora

Graficamente, os valores mensurados de temperatura e de vazão de gás estão apresentados no seguinte gráfico, mostrado na figura 17.

Figura 17 – Temperatura e vazão de gás



Fonte: Autora

Para alcançarmos a temperatura desejável, precisaremos um aquecedor e um misturador localizado dentro do tambor do biodigestor. Conforme a figura 13 e a tabela 1 os valores não atingem os objetivos. Assim será ativado o aquecedor ou o misturador, para obter os valores de temperatura desejados. Essa ativação foi desenvolvida com uma ação de controle discreta, usando CLP.

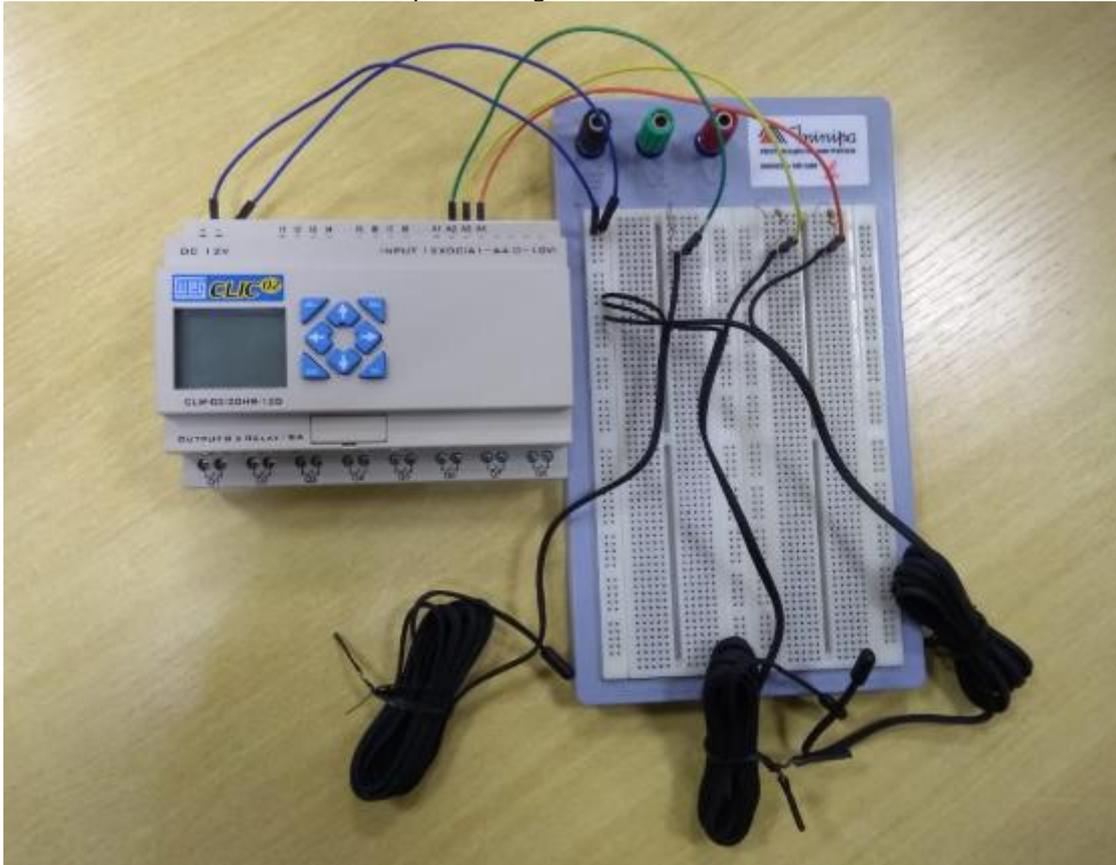
Como mencionado na seção 3.2, os sensores foram configurados colocando um resistor em série de 10 k e alimentados por uma fonte de tensão de 10 volts. A medida da temperatura será realizada no ponto do divisor de tensão, para ser lido, por uma entrada analógica do CLP. Este esquema elétrico é mostrado na figura 18.

Figura 18 – Controlador Lógico Programável WEG Clic 02



Fonte: Autora

Figura 19 – CLP com sensores de temperatura ligados



Fonte: Autora

O CLP será configurado conforme a temperatura necessária para produzir o gás metano e biofertilizantes, acionado por um controle, podendo ser do tipo liga/desliga, proporcional, proporcional integral, proporcional derivativo e / ou proporcional integral derivativo (Figura 19).

Inicialmente por ter poucas variáveis analisadas (neste caso a temperatura) se optou pela escolha do controle liga/desliga. Para melhorar este controle se fará uso ainda de um circuito com histerese. Este mesmo podendo ser implementado via programação.

O controle liga/desliga com histerese é usado para evitar o mau uso do misturador evitando assim encurtar a vida útil do mesmo.

Os resultados das seções 3.3 e 3.4 indicando a função de transferência do sistema e a função de transferência do controlador não foram abordadas neste trabalho pois ainda estão em estudo, pois precisa-se de mais dados coletados.

## CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi implementar um sistema de monitoramento e controle de temperatura de um biodigestor para resíduos orgânicos, que gere maior rendimento e eficiência do sistema através do aumento de geração de biogás com o apoio de um software que irá auxiliar na tomada de decisão de acordo com as entradas e saídas.

Considerando que a variação de temperatura dentro do biodigestor para materiais orgânicos apresente parâmetros que não sejam adequados para compor o substrato que será digerido dentro do biodigestor, suas características podem não favorecer o desenvolvimento das bactérias e arqueas e conseqüentemente inviabilizar a produção de biogás. Ter parâmetros do substrato balanceados para a digestão das bactérias, além de evitar um desequilíbrio dos microrganismos do reator com a acidificação do substrato, viabiliza a produção de biogás. Ter o pH do substrato neutralizado, por exemplo, influencia diretamente na partida do biodigestor anaeróbico, assim como a variação de temperatura está diretamente relacionada com a produção de biogás. Além do objetivo geral, também os objetivos específicos foram alcançados no decorrer do trabalho. O desenvolvimento de um sistema de controle e monitoramento de temperatura para o biodigestor de resíduo orgânico ainda está em estudo.

Alguns dos problemas encontrados foram: a dependência de um clima estável, para realizar novas medições, por termos o sistema de biodigestão ao ar livre e sem acesso a rede elétrica, assim como o atraso na chegada de equipamentos de medição.

Recomenda-se novas pesquisas com controle e estabilização das temperaturas, fazendo novas medições e análise da vazão do gás em diferentes temperaturas. Outra sugestão é que se pesquise sobre sistemas de controle e monitoramento de outras variáveis do sistema, como o pH do substrato, e que se interligue esta informação com a temperatura para cada tipo de colônia de bactérias. para que todo o processo possa ser realizado antecipadamente não comprometendo a produção do biodigestor.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2017. Disponível em: <[https://belasites.com.br/clientes/abrelpe/site/wp-content/uploads/2018/09/SITE\\_grappa\\_panoramaAbrelpe\\_ago\\_v4.pdf](https://belasites.com.br/clientes/abrelpe/site/wp-content/uploads/2018/09/SITE_grappa_panoramaAbrelpe_ago_v4.pdf)>. Acesso em: 25 set. 2018.
- AQUINO, S. F., CHERNICHARO, C. A. L. **Acúmulo de ácidos graxos voláteis em reatores anaeróbicos sob estresse, com causas e estratégias de controle**. Revista Engenharia sanitária e ambiental, Rio de Janeiro, vol. 10, no 2, abr. 2005.
- ASTROM, Karl J.; HAGGLUND, T. **PID controllers: theory, design, and tuning**. 2. ed. Instrument Society of America: 1995. Disponível em: <<https://aiecp.files.wordpress.com/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- BALMANT, W. **Concepção, construção e operação de um biodigestor e modelagem matemática da biodigestão anaeróbica**. 2009. 60 f. Dissertação (Mestrado em Processos Térmicos e Químicos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- BLOG INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE. **Instrumentação e controle**. 2014. Disponível em: <[https://www.ecodebate.com.br/2018/10/16/resenha-critica-aos-sistemas-de-gestao-e-gerenciamento-de-residuos-por-ariadne-cordeiro/](https://www.google.com/search?q=sistema+de+malha+fechada+controlador+senso+r&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwicxOmBzuviAhVDIbkGHbqyAs4Q_AUIESgC&biw=1366&bih=657#imgrc=1zAEkuqN4NXY-M:></a>>. Acesso em: 12 abr. 2019.</p>
<p>BORBA, A. P.; SOUZA, J.; SCHAEFFER, L. Ferramentas computacionais aplicadas em processos de fabricação de plantas de biodigestão. In: <b>INOVA MUNDI</b>, 2012, Novo Hamburgo. Anais... Novo Hamburgo: Feevale, 2012. p. 1-4.</p>
<p>BRASIL. Decreto-lei nº. 87.079, 1982. <b>Legislação Brasileira de resíduos sólidos e ambiental correlata</b>. Disponível em: Acesso em: 14 jan. 2019.</p>
<p>CORDEIRO, Ariadne. <b>Resenha Crítica aos Sistemas de Gestão e Gerenciamento de Resíduos</b>. EcoDebate, 2018. Disponível em: <<a href=)>. Acesso em: 16 mar. 2019.
- COSTA, R. **Produção Aplicação de Biogás**. Coimbra, Portugal: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2011.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**. Deggendorf: Federal Republic of Germany, ISBN 978-3-527-31841-4, 2008.
- FAZOLO, D. **Produção de Biogás a Partir da Fermentação de Excedente de Merenda Escolar para Substituição do Gás Liquefeito do Petróleo: uma Projeção**. 2011. 58 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Tecnologia de Combustíveis). Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Araçatuba, 2011.

FULL GAUGE. **TI-44E Plus**. 2019. Disponível em: <<https://www.fullgauge.com.br/produto-ti-44e-plus>>. Acesso em: 11 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. **CONV32**. 2019. Disponível em: <<https://www.fullgauge.com.br/produto-conv32>>. Acesso em: 11 jun. 2019.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

KOCHHANN, Gabriela Elisa; EISERMANN, Willian Andrei. **Condições de partida de um biodigestor anaeróbico**. Horizontina: FAHOR, 2018. Monografia de graduação.

NISE, N. S. **Control systems engineering**. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. Estados Unidos: Person, 2011

OGATA, Katsuhiko. **MATLAB for Control Engineers**. Estados Unidos: Person, 1995.

PEREIRA, Luís Alberto Schwind Pedroso Sutssi da Silva. **Estudo, modelagem e caracterização de processos de biodigestão com monitoramento e controle da temperatura**. Ilha Solteira: 2017.

RAJA, I.A.; WAZIR, S. **Biogas Production: The Fundamental Processes**. PakistanCattlekit, Mohlin Lal, Pakistan: COMSATS Institute of Information Technology, 2017.

SANTOS, E. **Avaliação de um Trocador de Calor de Tubos Concêntricos, Contracorrente para Aquecimento de Dejetos de Suínos**. Horizontina: FAHOR, 2017.

SEADI, T.A. et al. **Biogas handbook**. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg, ISBN 978-87-992962-0-0, 2008.

SHUBEITA, F. M. et al. **Um estudo sobre monitoramento de controle de biodigestores de pequena escala**. Porto Alegre: PUCRS, 2014.

SHUBEITA, Fauzi de Moraes. **Busca de eficiência de Operação**. 2016.

SILVA, João Manoel Gomes da. **Desempenho de Sistemas de Controle**. Porto Alegre: UFRGS, 2000. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node12.html>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

SOARES, R. C.; SILVA. R. C. M. **Evolução histórica do uso do biogás como combustível**. Cuiabá, MT: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, 2010.

## APÊNDICE A – MODELO DE UM SISTEMA DE SOFTWARE DE CONTROLE DE TEMPERATURA PARA UM BIODIGESTOR



## ANEXO A – TI-44E plus - TERMÔMETRO



### DESCRIÇÃO

Termômetro com entrada para até quatro\* sensores com comunicação serial para conexão ao Sitrad. Cada entrada de sensor pode ser configurada individualmente através do menu de funções avançadas, onde o usuário ativa ou desativa a utilização de cada sensor e ajusta o offset de calibração dos mesmos. O usuário também tem a sua disposição o cálculo da temperatura diferencial e média entre os sensores, além de um sistema inteligente de bloqueio de funções que impede que pessoas não autorizadas alterem os parâmetros de controle.

Possui comunicação serial para conexão com o Sitrad.

Os produtos da linha Evolution contam com frontal blindada IP-65, tecla Fletec para acesso facilitado, display com quatro dígitos e acessórios exclusivos\*\*, como a chave programadora EasyProg e a capa protetora Ecase.

\* um sensor incluído.

\*\* vendidos separadamente.

Dimensões: 71 x 28 x 71 mm

Exemplo de Aplicação: equipamentos frigoríficos, máquinas operatrizes, estufas, fornos, automotores, salas climatizadas, indústrias alimentícia, química e farmacêutica.

**Fonte:** Full Gauge, 2019.

## ANEXO B – CONV 32 – CONVERSOR

### DESCRIÇÃO

Dispositivo utilizado para a conexão ao Sitrad dos instrumentos que possuem saída para o computador. Sua função é realizar a comunicação entre os controladores e o computador, através da conversão do sinal padrão RS-485 dos controladores para o RS-232 ou USB do computador. A CONV32 se conecta ao computador por meio de um cabo USB.



**Fonte:** Full Gauge, 2019