

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**DESENVOLVIMENTO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO COM SISTEMA
ELETRÔNICO DE CONTROLE DE TEMPERATURA**

SIDNEY RODRIGUES DA CUNHA

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Pereira dos Santos

Recife

2018

**DESENVOLVIMENTO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO COM SISTEMA
ELETRÔNICO DE CONTROLE DE TEMPERATURA**

SIDNEY RODRIGUES DA CUNHA

Dissertação submetida ao programa de Pós - Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Pereira dos Santos

Recife, PE.
Fevereiro, 2018

C972d Cunha, Sidney Rodrigues da.

Desenvolvimento de biodigestor anaeróbico com sistema eletrônico de controle de temperatura. / Sidney Rodrigues da Cunha. - Recife: O Autor, 2018.

60 f. : il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Pereira dos Santos.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2018.

Inclui referências bibliográficas.

1. Fontes renováveis. 2. Biofertilizantes. 3. Biodigestor anaeróbico. 4. Biomassa. I. Santos, Luiz Antônio Pereira dos, orientador. II. Título.

CDD 621.48 (21. ed.)

UFPE

BDEN/2018-10

SIDNEY RODRIGUES DA CUNHA

**DESENVOLVIMENTO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO COM
SISTEMA ELETRÔNICO DE CONTROLE DE TEMPERATURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovada em: 07/02/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Luiz Antônio Pereira dos Santos (Orientador)
Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste

Prof^o. Dr Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr Emmanuel Damilano Dutra (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus, que esteve sempre presente em meu coração, me dando força para não desistir.

A minha esposa e amiga, que esteve sempre ao meu lado me fortalecendo com palavras de bom ânimo.

A minha família, que sempre esteve presente nos momentos mais felizes e tristes de minha vida.

Ao Prof. Luiz Antônio, sempre disponível a me orientar.

Ao Prof. Rômulo Menezes, que sempre esteve presente e disponível a ajudar nas horas em que precisei.

Aos membros que compõem a empresa Sciens®, pelo suporte técnico prestado sempre que necessário.

Aos amigos: Fernando Filho, Raphael Chaves, Cláudio Eduardo, Monaliza Mirela.

Ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco.

Ao CRCN/NE – Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste

RESUMO

O problema energético e de fontes renováveis é global. A preocupação com os estudos que apontam para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas fontes de energia vem aumentando gradativamente ao longo dos anos em todo o mundo. Muitos países desenvolvidos tem apresentado novas propostas de modelos práticos para a geração, e o reaproveitamento da energia produzida. Estes modelos possuem a capacidade de contribuir para minimizar a poluição ambiental e gerar outros recursos que podem ser reutilizados, como por exemplo, os biofertilizantes, utilizados na agricultura de forma geral. É dentro desse contexto que se enquadra este trabalho o qual visa desenvolver um biodigestor anaeróbico com controle de temperatura da biomassa ou substrato. Tal projeto produz resultados que contribuem de forma expressiva para o avanço tecnológico desses tipos de reatores haja visto que ainda há muito a fazer em todo o processo prático e dinâmico de aperfeiçoamento de tal tipo de biodigestor, que envolve desde a sua concepção até sua aplicação em ambiente real.

Palavra-chave: Fontes renováveis. Biofertilizantes. Biodigestor Anaeróbico. Biomassa.

ABSTRACT

The energy and renewable energy problem is global. The concern with studies that point to the development and improvement of new energy sources has been increasing gradually over the years all over the world. Many developed countries have presented new proposals for practical models for the generation and reuse of energy produced. These models have the capacity to contribute to minimize environmental pollution and generate other resources that can be reused, such as biofertilizers, used in agriculture in general. It is within this context that this work is framed, which aims to develop an anaerobic biodigester with biomass or substrate temperature control. This project produces results that contribute significantly to the technological advancement of these types of reactors since there is still much to be done in all the practical and dynamic process of perfecting such a type of biodigester, from its conception to its application in real environment.

Keyword: Renewable sources. Biofertilizers. Anaerobic Biodigester. Biomass.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do processo de funcionamento de um biodigestor anaeróbio para processamento de esterco de animais.....	14
Figura 2 - Biodigestor modelo indiano.....	15
Figura 3 - Biodigestor anaeróbio instalado no Shopping Camará em Pernambuco.....	17
Figura 4 - Fases da reação anaeróbica em um biodigestor.....	19
Figura 5 - Biodigestor anaeróbico.....	20
Figura 6 - Ilustração do processo bioquímico da biodigestão anaeróbica em fases.....	26
Figura 7 - Produção de Biogás em m ³ /dia em função da temperatura em °C num reator de 5m ³	27
Figura 8 - Circuito térmico eletrônico contendo um de controlador de temperatura para cálculo do circuito de controle.....	29
Figura 9 - Sinal de um sistema de controle ON-OFF comparado com um sinal analógico.....	30
Figura 10 - Sinais de um sistema de controle proporcional, mostrando o pico do sinal da temperatura para evitar o overshoot do sistema.....	32
Figura 11 - Reatores de biodigestão anaeróbica desenhados em C.A.D.....	36
Figura 12 – Placa de alumínio com estrias em alto relevo para aquecimento da câmara do reator.....	37
Figura 13 - Barras metálicas com perfil em L na parte inferior da base do reator.....	37
FIGURA 14 - Flange conectada à placa de alumínio, base da câmara do reator.....	37
Figura 15 - Fluxímetro digital instalado na tubulação de saída do reator.....	38
Figura 16 – Sistema de aquisição modelo – SMT1604.....	39
Figura 17 – Sensores ST1604 instalados nos reatores.....	40
Figura 18 – Sensor de temperatura instalado na placa de aquecimento.....	40
Figura 19 - Barra de conectores que conecta o sistema de controle.....	41
Figura 20 – Sistema de controle FAL1704-R conectado ao sistema de aquisição e controle SMT1604.....	41
Figura 21 - Manômetro analógico.....	42
Figura 22 - Resto de alimento para produção do substrato.....	42
Figura 23 - Tampa do reator com parede de fibra de vidro.....	44
Figura 24 - Reator montado sobre o suporte de aço.....	44
Figura 25 - Substrato homogeneizado.....	46

Figura 26 – Alimentação do reator 1	46
Figura 27 – Alimentação do reator 2	46
Figura 28 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato nos Reatores.	49
Figura 29 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores quando da ligação do sistema.	50
Figura 30 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores.	51
Figura 31 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores.	52
Figura 32 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores.	53
Figura 33 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores.	54
Figura 34 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas do Fluxímetro.....	38
Tabela 2 - Produção de Biogás dos Reatores	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos.....	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 Biodigestão Anaeróbica	13
2.2 Biodigestores.....	17
2.2.1 Conceito e Aplicação da Biodigestão	18
2.2.2 Biomassa.....	20
2.2.3 Microbiologia da Biodigestão Anaeróbica	21
<i>2.2.3.1 Hidrólise – Fase I.....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.3.2 Acidogênese – Fase II.....</i>	<i>23</i>
<i>2.2.3.3 Acetogênese – Fase III</i>	<i>24</i>
<i>2.2.3.4 Metanogênese – Fase IV.....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.3.5 Sulfetogênese – Fase V</i>	<i>25</i>
2.4 Fatores Pertinentes à Biodigestão	25
2.4.1 Temperatura	26
2.4.2 Potencial Hidrogenionte (pH)	28
2.5 Sistemas de Controle de Temperatura.....	28
2.5.1 Sistema de Controle On-Off	29
<i>2.5.1.1 Equações operacionais:</i>	<i>30</i>
2.5.2 Sistema de Controle Proporcional	31
2.5.2.1 Resolução da equação diferencial por transformada de Laplace e expansão em frações parciais.	32
3 MATERAIS E MÉTODOS	36
3.1 Reatores.....	36
3.1.2 Flange da Placa de Aquecimento	37
3.2 Equipamentos para Instrumentação.....	38
3.2.1 Fluxímetro Digital	38
3.2.2 Sistema de Aquisição.....	38
3.2.3 Sensor de Temperatura.....	39
3.2.4 Sistema eletrônico atuador para aquecimento	41
3.2.5 Manômetro Analógico	41
3.3 Substrato	42
3.4 Procedimentos Experimentais.....	43

3.4.1 Reatores.....	43
3.4.1.2 Pressão e volume dos Reatores.....	44
3.4.2 Substrato	45
3.4.3 Alimentação dos reatores.....	46
3.4.4 Medição de temperatura do substrato.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1 Estágio Inicial	48
4.2 Acompanhamento diário da produção de Biogás.....	48
5 CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, o interesse global na utilização das energias renováveis têm crescido significativamente devido aos sérios problemas associados ao uso de combustíveis fósseis. A utilização da energia produzida por estes tipos de combustíveis produz inúmeros efeitos indesejáveis como: efeitos no aquecimento global e os danos ambientais. Com a degradação dos recursos naturais, a produção de energia elétrica, feita no Brasil em sua maioria por hidrelétricas, vem ficando cada vez mais difícil. Usar combustíveis fósseis, como diesel ou mesmo gasolina, para gerar energia contribui para a poluição do meio ambiente. O mundo busca atualmente novas fontes de energia para substituir as fontes fósseis.

A biodigestão anaeróbia é um processo que pode tratar e estabilizar resíduos orgânicos, gerando gases combustíveis renováveis e biofertilizantes, o que pode portanto ajudar a resolver os problemas da gestão de resíduos orgânicos e contribuir para a produção de energia menos poluente. Para que a biodigestão aconteça, alguns fatores influenciadores devem ser observados. A literatura pertinente descreve que temperatura é um fator muito importante pois pode influenciar a atividade dos microrganismos no interior do reator. Esta reporta que a faixa de temperatura ideal está situada em uma região chamada de mesófila, em torno de 37°C.

Este estudo se dedica a desenvolver dois reatores de biodigestão anaeróbica, utilizando fibra de vidro, contendo uma placa de alumínio e um sistema de aquisição que monitore a temperatura de ambos os reatores e controle a temperatura do substrato contido na câmara de um dos reatores, a fim de realizar um comparativo na produção do volume de biogás em litros ao longo do tempo.

1.1 Objetivos

A) Desenvolvimento de um biodigestor com sistema eletrônico de controle de temperatura.

B) Implementação de sistemas eletrônicos para medição da temperatura em dois reatores semelhantes e controle da temperatura da biomassa em um deles.

C) Comparar os resultados dos dois reatores por meio da medição da quantidade de biogás produzida.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Biodigestão Anaeróbica

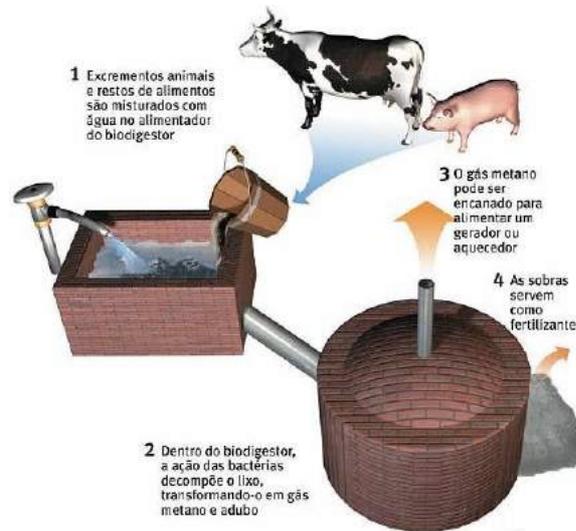
A biodigestão anaeróbica consiste na decomposição da biomassa utilizando um reator devidamente lacrado e livre da presença de oxigênio. Existem vários tipos de reatores para biodigestão anaeróbica. O modelo mais comum de reator anaeróbico utilizado na biodigestão consiste em um equipamento cilíndrico que é constituído de uma câmara fechada, instalada abaixo do nível do solo, para proteger das variações bruscas de temperatura. Dentre esses tipos e modelos podemos citar: O biodigestor Chinês, o modelo de biodigestor Indiano e um outro criado pela Marinha do Brasil. Um digestor anaeróbico é composto por um reator feito com uma câmara hermética, onde o efluente é inserido e no interior do qual ocorre a metabolização dos compostos orgânicos por bactérias anaeróbicas (GASPAR, 2003).

Os reatores anaeróbicos produzem duas saídas respectivamente: a primeira é a biomassa estabilizada e a segunda é sua produção de biogás. O biogás é uma mistura gasosa, composta por vários gases, mas com quantidades proporcionais significativas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e traços de gás sulfídrico (H_2S), hidrogênio (H_2) e nitrogênio (N_2). Alguns desses gases podem poluir a atmosfera do planeta. O metano (CH_4) se for lançado na atmosfera polui 21 vezes mais que o dióxido de carbono (CO_2) (FARIA, 2012). A biomassa que sai dos reatores é um tipo de biofertilizante, por se tratar de um composto de líquidos e sólidos estabilizados que já passou pelos estágios de decomposição bioquímica anaeróbica.

Os biofertilizantes são ricos em nitrogênio e utilizados como adubo. Já o biogás é composto por uma mistura básica de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e traços de outros gases, e possui uma infinidade de aplicações principalmente na área de geração de energia elétrica, mecânica e térmica.

Na figura 1 é mostrado o processo de biodigestão através do funcionamento de um biodigestor anaeróbico que utiliza processamento de esterco de animais.

Figura 1 - Esquema do processo de funcionamento de um biodigestor anaeróbio para processamento de esterco de animais



Fonte: <<http://biodigestao-engenharia-ambiental.blogspot.com.br>>. Acessado em 23.02.2018

O esperado de um sistema de biodigestão anaeróbica é que ele possa produzir mais gás metano (CH_4) que gás carbônico (CO_2), assim esse gás pode ser usado para diversas finalidades que vão desde a alimentação de um simples fogão ao funcionamento de um gerador de energia elétrica movido a gás. Para produzir biogás, com bom rendimento de metano, é necessário que a biodigestão anaeróbica aconteça em condições específicas condizentes com a reação química. Dentre os fatores que mais influenciam a eficiência destas reações químicas podemos destacar o pH e a temperatura. Assim, o pH e a temperatura dentro dos reatores de biodigestão, ou seja, na biomassa, devem ser controladas para que se atinja a produção desejada de biogás com a maior quantidade possível de gás metano (CH_4).

Todo esse processo bioquímico acontece graças a degradação da biomassa, que utiliza comunidades de bactérias em todo o processo anaeróbico. Estas bactérias responsáveis pela biodigestão, produção de gás metano e outros gases, são sensíveis a variações de temperatura. Variações de 3°C já são suficientes para provocar efeitos negativos ou até a morte da maioria das bactérias digestoras, por isso, em locais onde a amplitude térmica é elevada deve-se dispor de sistemas auxiliares de aquecimento ou resfriamento (BALMANT, 2009). Estes sistemas devem ser capazes de controlar a variação de temperatura de forma que mantenham a máxima estabilidade possível dentro dos níveis mais adequados a cada fase das reações químicas que acontecem em todo o processo de biodigestão anaeróbica.

Outro fator significativamente importante para a produção de biogás é o pH da biomassa ou substrato. Este deve ser monitorado para que a biomassa não atinja níveis críticos de acidez, comprometendo assim, a produção de metano.

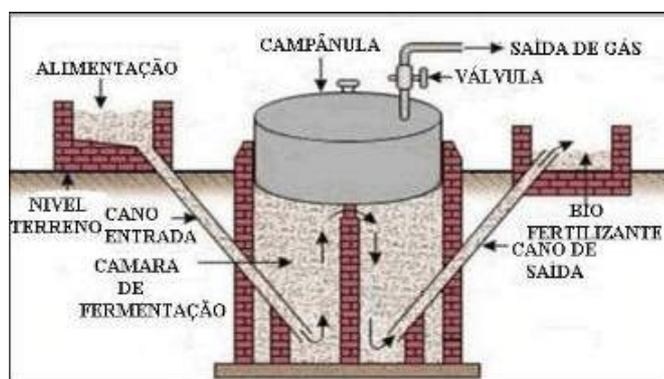
Para criar e tornar operável um sistema anaeróbico de biodigestão alguns requisitos são necessários: a) taxas contínuas de cargas de matéria orgânica; b) tempo de residência ou tempo de retenção hidráulico curto (para minimizar o volume do reator e aumentar a produtividade de biogás); c) geometria do digestor; d) aspectos práticos de mistura e perda de calor; e) imobilização da massa microbiana que pode envolver o uso de um material inerte ou degradável; f) Manutenção do pH na faixa ideal para a digestão anaeróbia entre 6,8–7,2 (WARD et al., 2008).

Chengliu Gou (2014) defende que a co-digestão anaeróbica de resíduos de lodo ativado e restos de alimento foi investigada semi-continuamente usando reatores de tanque continuamente agitados. Os resultados mostraram que o desempenho do sistema de co-digestão foi claramente influenciado pela temperatura e taxa de carga orgânica (OLR) em termos de taxa de produção de gás (GPR), rendimento de metano, eficiência de remoção de sólidos voláteis (VS) e estabilidade do sistema.

O sistema termofílico apresentou a melhor capacidade de carga em OLR extremamente alto de 7g VS L/d , enquanto o sistema mesofílico apresentou a melhor estabilidade do processo em OLRs baixos (< 5g VS L/d). A temperatura teve um efeito mais notável sobre a riqueza e diversidade das populações microbianas do que o OLR (ELSEVIER, 2014).

A figura 2 mostra um reator anaeróbico do tipo Indiano construído em alvenaria no subsolo e seus dois tanques: de alimentação (a esquerda da imagem) e biofertilizantes (a direita da imagem), respectivamente.

Figura 2 - Biodigestor modelo indiano



Fonte: <<http://biodigestao-engenharia-ambiental.blogspot.com.br>>. Acessado em 23.02.2018

O primeiro biodigestor possui registro datado de 1857 na Índia, em uma cidade chamada de Bombaim. Sua principal finalidade era produzir gás combustível para alimentar um circuito elétrico de um hospital (NOGUEIRA, 1992). Desde então, os biodigestores estão sendo instalados em granjas de bovinocultura, suinocultura e de avicultura, em frigoríficos, abatedouros, entre outros (OLIVEIRA, 1993). Os biodigestores se apresentam em destaque como uma ótima alternativa para solucionar o problema com o manejo dos dejetos produzidos pela agricultura no mundo, que provocam degradação e ou contaminação de recursos naturais e poluem o meio ambiente, além de poderem ser usados como fontes de alimentação para circuitos de geração de energia.

O cuidado com o tratamento destes dejetos vem sendo motivo de preocupação por parte do legislativo no Brasil e no mundo. No Paraná, desde 1982, toda atividade suinícola está apta a realizar o correto manejo de seus dejetos (BALMANT, 2009).

Graças a essa farta oferta de matérias orgânicas que podem ser utilizados no processo de biodigestão anaeróbica, o mundo vem investindo em pesquisas de projetos que possam aproveitar esses dejetos e produzir biofertilizantes e energia provinda do biogás. Em 2008 12% do consumo de energia final era provido por sistemas de biodigestão no mundo, segundo a IEA , Instituto de Economia Agrônoma. Utilizar dejetos urbanos e rurais para produzir energia limpa e renovável tem sido o grande desafio das tecnologias aplicadas às construções dos sistemas de biodigestão.

O Brasil ainda é um país que apesar de ter um dos maiores rebanhos de suínos, bovinos e aves do mundo, não possui mais do que alguns milhares de biodigestores, boa parte, está sendo desativado por falta de suporte técnico e implementação de tecnologias de eficiência comprovada (BALMANT, 2009).

A Figura 3 mostra dois reatores de biodigestão anaeróbica construídos com lonas vinílicas em cubículos enterrados parcialmente no solo instalados no Shopping Center de Camaragibe em Pernambuco.

Figura 3 - Biodigestor anaeróbio instalado no Shopping Camará em Pernambuco



Fonte: Shopping Camará – Camaragibe - PE

Reatores de biodigestão anaeróbicos tem sido instalados em centros comerciais para tratamento dos resíduos alimentares e para produção de biogás, a exemplo o Shopping Camará, localizado em Camaragibe – PE. Esta prática já está presente em várias partes do mundo. A china por exemplo possui atualmente mais de 7,1 milhões de biodigestores espalhados em pleno funcionamento. Outro fator influenciador no uso de biodigestores como fonte de energia limpa e renovável é a flutuação dos preços dos combustíveis a base de petróleo. Com o aumento dos preços do petróleo e seus derivados, os sistemas de biodigestão tem sido novamente utilizados por serem uma alternativa economicamente viável de produção de energia limpa e renovável (PHALHARES, 2008).

2.2 Biodigestores

Um biodigestor típico é um equipamento composto por um reator e é usado para a produção de biogás através da degradação de materias orgânicos. Estes reatores produzem uma mistura de gases através da decomposição da matéria orgânica por meio da ação de bactérias que digerem esta matéria orgânica em condições anaeróbicas.

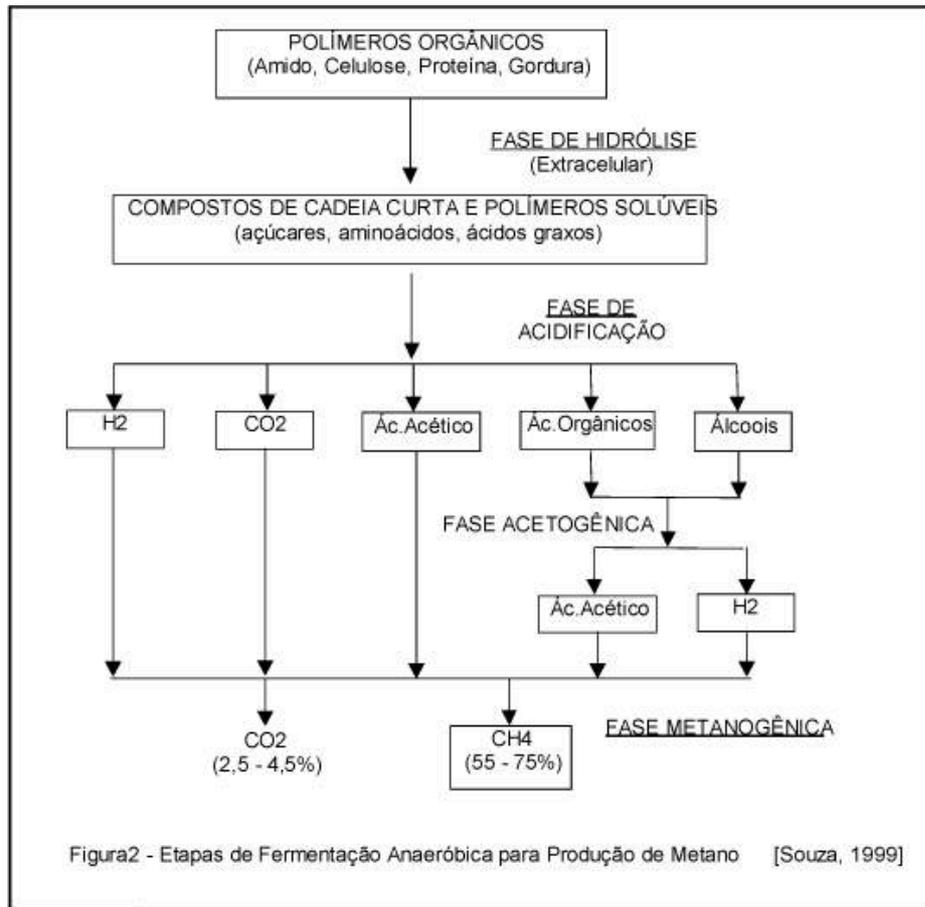
Produzir energia limpa e renovável com utilização de reatores anaeróbicos é uma tendência mundial. Alguns tipos de sistemas de tratamento anaeróbicos são descritos por Chermicharo (1997), sendo eles:

- a) *Tanque séptico*, possui funções múltiplas de seguimentação, remoção de materiais flutuantes e pode comportar-se como digestor de baixa carga, sem mistura e sem aquecimento;
- b) *Lagoa anaeróbia* é um tipo de sistema frequentemente utilizado para o tratamento de despejos com alta concentração de matéria orgânica, como frigoríficos, laticínios, bebidas.
- c) *Filtros anaeróbios* são sistemas com crescimento bacteriano aderido.
- d) *Digestores anaeróbios de lodo* podem ser de vários sub-tipos e são conhecidos como:
- RALF - reatores anaeróbios de leito fixo.
 - RALR - reator anaeróbio de leito rotatório.
 - RALE - reatores anaeróbios de leito expandido.
 - RADE - reator anaeróbio de dois estágios.
 - RALGE - reator anaeróbio de leito granular expandido ou EGSB.
 - RARI - reator anaeróbio com recirculação interna ou CSTR.
 - RAFAMI - reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo UASB.

2.2.1 Conceito e Aplicação da Biodigestão

A biodigestão ou fermentação anaeróbica se refere a um método de reciclagem de materiais orgânicos. Este processo bioquímico é mostrado na Figura 4 onde é descrito as 4 fases do processo e as transformações químicas de cada fase

Figura 4 - Fases da reação anaeróbica em um biodigestor



Fonte: Souza (2006)

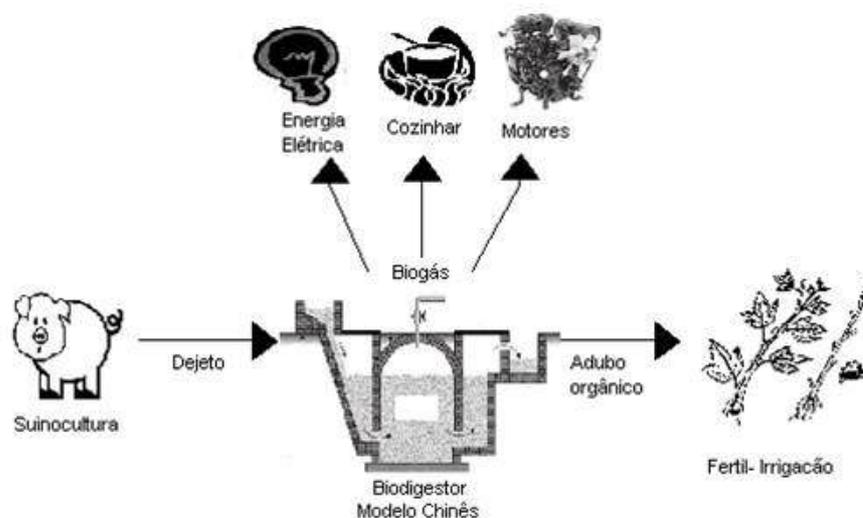
A matéria orgânica utilizada na alimentação do biodigestor pode ser resíduos de produção vegetal (poda, palha, folhas), de produção animal (esterco e urina) ou de atividade humana (fezes, urina e lixo doméstico). As condições ideais para as bactérias anaeróbicas existirem no biodigestor são: inexistência de oxigênio, temperatura adequada (entre 15°C a 45°C), nutrientes e teor de água (90 a 95 % de umidade em relação ao peso).

O biogás produzido pode ser usado como combustível em residências rurais próximas ao local de produção, no aquecimento de instalações para animais muito sensíveis ao frio ou no aquecimento de estufas de produção vegetal. E também pode ser usado para a geração de energia elétrica, através de geradores elétricos acoplados a motores de explosão adaptados ao consumo de gás. O biofertilizante, efluente do biodigestor, possui propriedades fertilizantes. Além de água, esse líquido apresenta elementos químicos como nitrogênio, fósforo e potássio em quantidades e formas químicas que podem ser usadas diretamente na adubação através de fertirrigação. O biodigestor também pode ser ligado ao esgoto doméstico das residências. Apesar de serem usados principalmente como fonte de energia e de biofertilizantes para

produtores rurais, o biodigestor também pode ser usado como um sistema de tratamento de esgotos humanos para pequenas comunidades urbanas.

Na Figura 5 é mostrado um modelo de produção de biogás proveniente da decomposição de materiais orgânicos, fezes de porco, e do adubo produzido pela saída do sistema de biodigestão.

Figura 5 - Biodigestor anaeróbico



Fonte : <<https://osneuronios.wordpress.com/home/>>. Acessado em 23.02.2018

2.2.2 Biomassa

A biomassa é uma das muitas fontes naturais usadas para produção de energia cujo potencial de crescimento vem aumentando nos últimos anos. Tanto no mercado internacional quanto no mercado interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e como consequência a redução da dependência dos combustíveis fósseis. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis. O líder mundial na geração de energia elétrica a partir da biomassa, foi os Estados Unidos, que em 2005 produziu 56,3 TWh (terawatts-hora), respondendo por 30,7% do total mundial. Na seqüência estão Alemanha e Brasil, ambos com 13,4 TWh no ano e participação de 7,3% na produção total conforme World Energy Council (WEC).

No Brasil, em 2007, a biomassa, contribuiu com uma participação de 31,1% na matriz energética, foi a segunda principal fonte de energia, superada apenas por petróleo e derivados. Ela ocupou a mesma posição entre as fontes de energia elétrica existentes no país, ao responder por 3,7% da oferta. Só foi superada pela hidreletricidade, que foi responsável pela

produção de 77,4% da oferta total, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2015.

Existem várias técnicas para transformar a biomassa em energia consumível. Um modo muito utilizado na atualidade no tratamento de dejetos orgânicos é a digestão anaeróbica que é dada pela decomposição do material orgânico, biomassa, pela ação de bactérias anaeróbicas, reação bioquímica que acontece em um ambiente livre de oxigênio. O produto final deste processo é o biogás, composto basicamente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2).

2.2.3 Microbiologia da Biodigestão Anaeróbica

A biodigestão anaeróbica consiste na metabolização da matéria orgânica (biomassa), em condições de ausência de oxigênio (SHARMA et al., 2000). Em função desta reação no interior do reator, acontece o aumento da população de bactérias anaeróbicas que degradam os compostos orgânicos depositados no interior do reator e produzem um tipo de gás, mistura, composta primordialmente por CH_4 e CO_2 .

O Processo utilizado para mensurar as características de tal ciclo utiliza conceitos químicos relacionados com a produção de ácidos graxos e voláteis. Estes ácidos são produzidos durante as funções metabólicas das bactérias aplicadas aos carboidratos, proteínas e lipídios. A cadeia destes ácidos é relativamente curta, onde pode-se perceber a presença de ácido fórmico, acético, propiônico e butírico. Nesta composição é possível notar a presença em maior quantidade do ácido acético, que por sua vez é produzido a partir de todos os compostos orgânicos (CHERNICHARO, 1997).

O processo de biodigestão está dividido em fases compreendidas em 4 etapas fundamentais, tais como: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Para que o biogás seja produzido estas etapas sofrem influências de diversos fatores como: tipo de nutriente, pH, ausência de oxigênio e temperatura. O processo de fermentação que ocorre na digestão anaeróbica é fundamentalmente influenciado pela temperatura. Baixas temperaturas inibem o processo de degradação da biomassa, (CRAVEIRO et al., 1982). As variações bruscas de temperatura levam o sistema ao desequilíbrio, culminando na morte das bactérias que fazem parte do processo de biodigestão. Ambientes em que as temperaturas permanecem em torno de 37 °C, contribuem para a proliferação de comunidades de bactérias mesófilas que produzem um índice maior de fermentação, devido a aceleração metabólica destes micro-

organismos que ocorre quando a temperatura aumenta, contribuindo para uma maior produção de gás metano (CH_4). Sendo assim a temperatura passa a ser um dos fatores mais importantes desta reação química. Para que haja existência de bactérias anaeróbicas em um reator típico, a biomassa deve estar com temperatura entre 15°C e 65°C , pois nessa faixa é onde ocorre a fermentação da biomassa, (RUIZ, 1992).

O metabolismo dos micro-organismos em reação anaeróbica está dividida em três faixas, assim enquadradas: Termófilas de 50°C a 65°C ; Mesófilas de 30°C a 40°C ; e as Psicrófilas abaixo de 20°C . Passando esse limítrofe, tais bactérias entram em processo de cristalização, forma inicial de congelamento, e aí é interrompida a produção de biogás. O gradiente de temperatura esperado para melhor produção de biogás está entre 35°C e 45°C , isso considerando a atuação metabólica dos micro-organismos atuando na região chamada de mesofílica. Esta exatidão depende de outros fatores como o tipo da biomassa e ou forma de composição introduzida ao reator.

2.2.3.1 Hidrólise – Fase I

Nessa fase as bactérias hidrolíticas fermentativas liberam enzimas extracelulares no meio interior do reator, , que tem como principal função realizar a hidrólise das partículas, que consiste na transformação, ou quebra, das moléculas maiores (polissacarídeos) em ácidos orgânicos (ácido láctico e ácido butílico), alcoóis, H_2 e CO_2 . Estas mesmas bactérias realizam ainda a fermentação de proteínas e lipídeos originando compostos semelhantes dos mesmos. Podemos dividir as bactérias hidrolíticas fermentativas em três principais categorias:

- 1 - Produtoras de lipase para degradação de lipídeos e ácidos graxos: *Clostridium*, *Micrococcus* e *Staphylococcus*
- 2 - Produtoras de proteases para degradação de proteínas e aminoácidos: *Bacteroides*, *Clostridium*, *Butyrivibrio*, *Lactobacillus*, *Fusobacterium*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Proteus*, *Peptococcus* e *Bacillus*;
- 3 - Produtoras de amilases para degradação de polissacarídeos e açúcares menores: *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Eubacterium* e *Acetivibrio*.

Nesta fase da hidrólise, as enzimas, polímeros biológicos, produzidas pelas bactérias, produzem amido e proteínas, em monômeros, como açúcares e aminoácidos, conforme mostrado nas equações abaixo.

As Clostridium são uma espécie de bactérias anaeróbicas que formam esporos, podendo dessa forma, sobreviver em ambientes totalmente adversos, como o ambiente livre de oxigênio. As bactérias do tipo bacteróides normalmente estão presentes nos tratos digestivos, tendo importante participação na degradação de açúcares e aminoácidos.

A maioria das bactérias acidogênicas são anaeróbias estritas, mas cerca de 1% consiste de bactérias facultativas que podem oxidar o substrato orgânico por via oxidativa. Isso é particularmente importante, uma vez que as bactérias estritas são protegidas contra a exposição ao oxigênio eventualmente presente no meio (CHERMICARO, 1996).

2.2.3.3 Acetogênese – Fase III

Na acetogênese, as bactérias acetogênicas, produtoras de hidrogênio, convertem os ácidos graxos voláteis, em dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2), acetato e ácidos orgânicos de cadeia curta. Nesta fase as bactérias acetogênicas convertem os aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Os produtos finais produzidos na fase da acetogênese são os substratos essenciais, o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato utilizados pelos grupos de bactérias metanogênicas, fase da metanogênese. No período que compreende a formação dos ácidos acético e propiônico, uma quantidade significativa de hidrogênio é formada, realizando o decaimento do valor do pH no meio aquoso. De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas metanogênicas. No entanto inicialmente apenas 50% da DQO, demanda química de oxigênio, biodegradável é convertida em propionato e butirato, sendo estes decompostos posteriormente em acetato e hidrogênio através da ação bacteriana acetogênica.

2.2.3.4 Metanogênese – Fase IV

Na metanogênese, as bactérias convertem os ácidos acéticos (orgânicos) de cadeia curta em metano CH_4 . Estas comunidades de bactérias podem ser de dois tipos: as metanogênicas acetoclásticas, bactérias utilizadoras de acetato, ácido acético ou metanol, e as as bactérias metanogênicas hidrogenotróficas, bactérias utilizadoras de hidrogênio, (WAYNE, 2005). As bactérias metanogênicas se dividem em dois grupos: um grupo usa o acetato, transformando-o em metano e dióxido de carbono, enquanto o outro produz metano, através

da redução do dióxido de carbono. Nesta etapa final do processo global de degradação anaeróbica de compostos orgânicos, as bactérias produzem metano e dióxido de carbono. Estas bactérias utilizam apenas um número limitado de substratos, sendo: ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono.

O processo de digestão anaeróbia possui, ainda, mais uma fase que depende da composição química do despejo utilizado no reator. Para os despejos dopados com compostos de enxofre a biodigestão anaeróbica passa pela fase da sulfetogênese, redução de sulfato e formação de sulfetos.

2.2.3.5 Sulfetogênese – Fase V

A fase da sulfetogênese consiste na produção de sulfetos, que é um processo no qual o sulfato e outros compostos a base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Durante este processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias redutoras de sulfato, ou bactérias sulforedutoras.

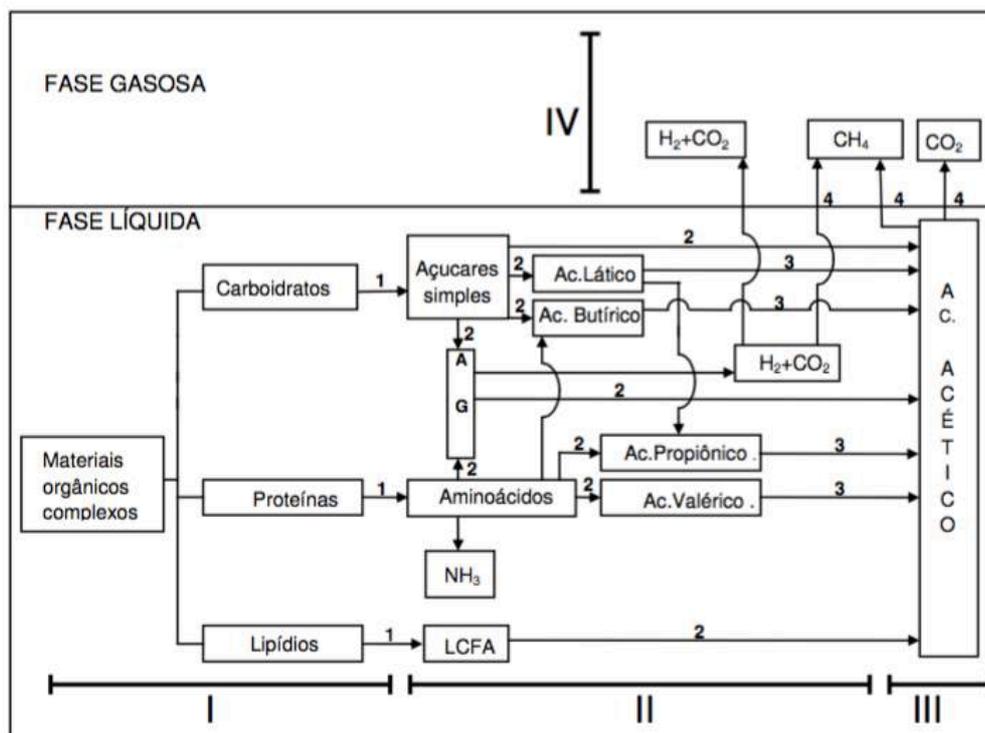
As bactérias sulforedutoras são um grupo de microrganismos, capazes de utilizar uma ampla gama de substratos, incluindo toda a cadeia de ácidos graxos voláteis, diversos ácidos aromáticos, hidrogênio, metanol, etanol, glicerol, açúcares, aminoácidos, e vários compostos fenólicos. As bactérias sulforedutoras dividem-se em dois grupos: bactérias sulforedutoras que oxidam seus substratos de forma incompleta até o acetato e bactérias sulforedutoras que oxidam seus substratos completamente até o gás carbônico (CHERNICHARO, 1995).

2.4 Fatores Pertinentes à Biodigestão

Para que ocorra o processo de fermentação anaeróbia é necessário que se tenha condições favoráveis para o crescimento de microrganismo na biomassa. Fatores como pH, nutrientes, umidade, temperatura, anaerobiose estrita, são necessários para o processo de biodigestão (RUIZ, 1992).

A Figura 6 mostra o processo bioquímico e suas fases decorrentes da degradação do substrato em um biodigestor anaeróbio. É mostrado também que há uma separação da região física onde se localizam os gases, *headspace*, produzidos pelo processo.

Figura 6 - Ilustração do processo bioquímico da biodigestão anaeróbica em fases



(I) hidrólise; (II) Acidogênese; (III) Acetogênese; (IV) Metanogênese.

Fonte: Balmant (2009)

2.4.1 Temperatura

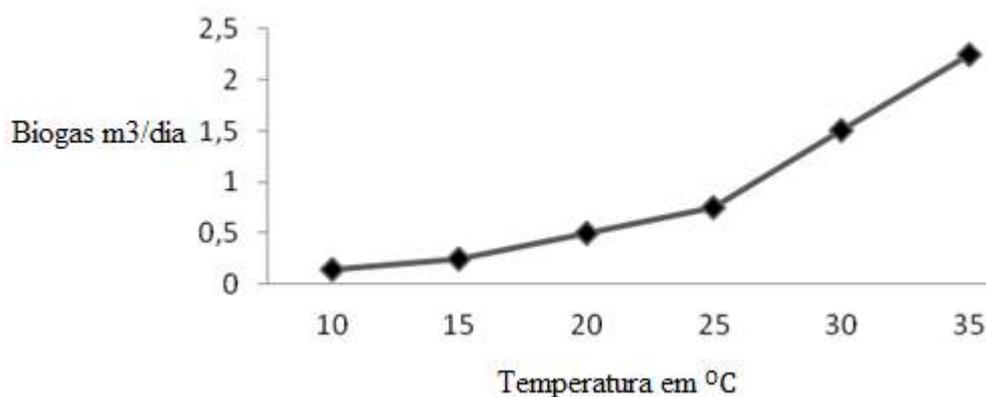
Para que o processo de biodigestão anaeróbica aconteça, alguns fatores devem ser controlados, durante o processo, objetivando o melhor aproveitamento da biodigestão, conseqüentemente, uma melhor produção de biogás. Os principais fatores influenciadores são: temperatura, tipo de resíduo, tempo de retenção hidráulica, substâncias tóxicas presentes, pH, quantidade de água e a relação carbono/nitrogênio, (OLIVEIRA, 1993). A temperatura é um dos fatores que merece atenção no que tange a melhor produção de biogás durante o processo de biodigestão anaeróbica, podendo comprometer diretamente na termodinâmica da reação, alterando a velocidade específica de utilização (MENDONÇA, 2012).

Tartakovsky (2007), afirma que os ensaios realizados com um biodigestor de 10 litros, mostram que após as 24 primeiras horas de produção de biogás, atuando na região termofílica (acima de 40°C), a taxa de produção de metano foi inferior à das condições mesófilas ideais (35°C). As bactérias psicrófilas, organismos extremófilos (organismo que consegue sobreviver ou até necessitam fisicamente de condições geoquímicas extremas, prejudiciais à maioria das outras formas de vida), capazes de viver e de se reproduzir a temperaturas baixas,

agem na faixa inferior a 20°C, já as as mesofílicas, organismos que se desenvolvem e possuem crescimento ótimo em ambientes cuja faixa de temperatura varia entre 25°C e 40°C.

A maioria das comunidades de bactérias mesófilas apresentam crescimento ótimo em temperaturas próximas a 37°C. e as termofílicas, microrganismos termófilos, que se desenvolvem em temperaturas elevadas se comparados com os microorganismos psicrófilicos, normalmente em ambientes cuja faixa de temperatura está entre 45°C e 60°C. Assim, as reações químicas e bioquímicas envolvidas no processo de biodigestão anaeróbica sofrem influência direta da temperatura, afetando todo o processo de produção do biogás conforme mostra Figura 7.

Figura 7 - Produção de Biogás em m³/dia em função da temperatura em °C num reator de 5m³



Fonte: Revista Científica Eletrônica De Medicina Veterinária, 2013

Ao analisar o gráfico da Figura 7, percebe-se que a medida que a temperatura sobe, ficando mais próxima dos 35°C, a produção de biogás aumenta significativamente, devido ao trabalho das bactérias anaeróbicas na região mesofílica, que decompõem a matéria orgânica produzindo metano (CH₄). Estas bactérias também conhecidas por termosensíveis produzem mais ou menos metano dependendo da temperatura encontrada no interior do reator e na biomassa. Se a temperatura ficar muito acima desta faixa de temperatura, 35°C a 37°C, há uma diminuição na produção de metano (CH₄) em função morte das bactérias mesofílicas.

2.4.2 Potencial Hidrogenionte (pH)

Em um biodigestor anaeróbico o pH tem que estar neutro ou ligeiramente alcalino. Essa unidade faz com que as bactérias anaeróbicas consigam desempenhar bem seu papel. O valor médio do pH deve estar entre 6,5 a 7,2. A sobrecarga do biodigestor pode fazer com que ocorra uma acidificação do meio, ocasionada pelas bactérias responsáveis pela degradação dos grandes polímeros, por possuírem uma atividade com maior formação de ácidos orgânicos (RUIZ, 1992).

2.5 Sistemas de Controle de Temperatura

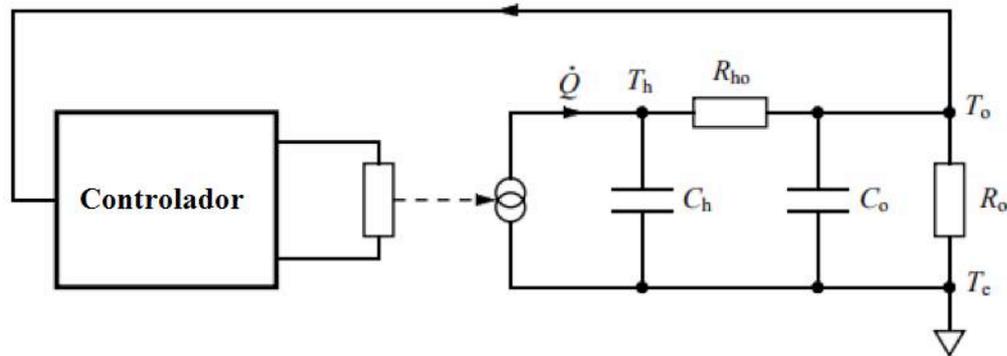
Na seção anterior foi mostrado que a produção de biogás no processo de biodigestão anaeróbica sofre influência da temperatura e que existe uma faixa de temperatura na qual a produção do biogás pode ser otimizada.

Antes de se partir para qualquer atividade prática na tentativa de controlar um sistema, é importante fazer uma análise teórica do seu funcionamento, tendo em mente o que se deseja obter e como atingir esse objetivo a partir do que se tem disponível para ser controlado. Assim é preciso se ter um modelamento matemático adequado afim de conseguir descrever o comportamento do sistema com o passar do tempo levando em consideração as diferentes variáveis e constantes presentes nesse sistema. Tendo feito essa etapa, é importante descrever e modelar o funcionamento do controlador que irá interagir diretamente com o sistema a ser controlado. Nesse contexto, é de fundamental importância ter noções de teorias de controle de forma a servir como base para qualquer decisão de cunho prático que venha a ser tomada posteriormente.

O objetivo da teoria a ser exposta a seguir é, utilizando-se de artifícios matemáticos utilizados em teorias de sistemas de controle moderno, modelar matematicamente o comportamento dinâmico do sistema de temperatura proposto com resposta aos principais tipos de controladores utilizados em sistemas de controle de alta performance e desempenho largamente utilizados em processos industriais ou qualquer outro sistema que precise ter seu controle otimizado.

O circuito contido na Figura 8 mostra um circuito térmico típico de controlador de temperatura com alguns parâmetros fundamentais.

Figura 8 - Circuito térmico eletrônico contendo um de controlador de temperatura para cálculo do circuito de controle.



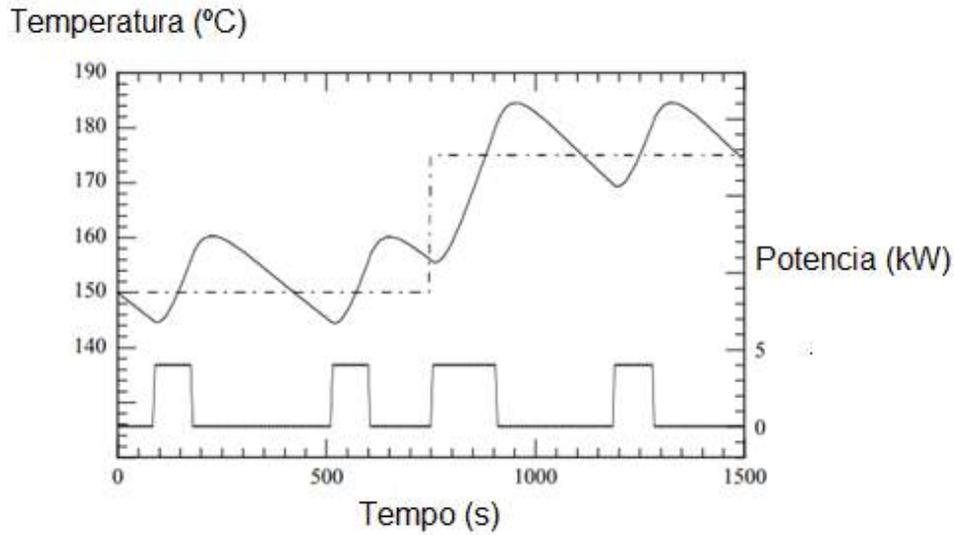
Fonte: Dogan (2013)

A potência \dot{Q} , que é fornecida por um atuador eletrônico o qual aquece uma chapa metálica, que para efeito de cálculos, iremos considerar como um corpo único uniformemente distribuído com uma capacitância térmica C_h , e com uma temperatura uniformemente distribuída T_h . Este elemento aquecedor transfere a energia térmica através da superfície metálica da chapa, com resistência térmica R_{ho} , para a amostra de biomassa que possui uma capacidade térmica C_o , a qual perde calor para o ambiente que está a uma temperatura T_e , através da resistência térmica das paredes do biodigestor R_o . O controlador monitora a temperatura da amostra T_o , e ajusta a potência \dot{Q} fornecida ao aquecedor com o intuito de manter a temperatura do biodigestor T_o o mais próximo possível da temperatura desejada, aqui denominada de T_s (*set-point*).

2.5.1 Sistema de Controle On-Off

Esta é uma das formas mais simples e mais usadas para controle de temperatura de sistemas de aquecimento caseiros e que não necessitem de um controle mais refinado da temperatura a ser atingida. Quando $T_o < (T_s - \Delta/2)$ o sistema de aquecimento é acionado com potência máxima, e quando $T_o > (T_s + \Delta/2)$ o sistema é desligado. O parâmetro Δ introduz uma histerese no sistema para prevenir que o sistema ligue e desligue, o que poderia ocasionar em adição de ruídos excessivos no sistema quando o valor de T_o se aproximasse de T_s . A Figura 9 ilustra a variação de temperatura de sistema de controle ON-OFF quando o valor da banda de histerese é alta:

Figura 9 - Sinal de um sistema de controle ON-OFF comparado com um sinal analógico.



Fonte: Dogan (2013)

2.5.1.1 Equações operacionais:

Os valores de temperatura T_o e T_h são funções de seus próprios valores iniciais, da potência \dot{Q} e do tempo. Analisando o circuito térmico equivalente da Figura 9, chegamos a conclusão que o sistema é governado por um par de equações diferenciais:

$$T'_h = \frac{Q'}{C_h} - \frac{(T_h - T_o)}{(C_h R_{ho})} \quad (4)$$

$$T'_o = \frac{(T_h - T_o)}{(C_o R_{Ho})} + \frac{(T_e - T_o)}{(C_o R_o)} \quad (5)$$

Diferenciando a equação 5 e eliminando os termos envolvendo T_h , obtém-se:

$$[C_h R_o C_o R_{ho}]T''_o + [C_o R_o + C_h R_o + C_h C_{ho}]T'_o + T_o = Q' R_o + T_e \quad (6)$$

Esta é a equação de um oscilador harmônico amortecido forçado. Isto é útil para rescrever as constantes em termos de ω_n , a frequência natural do sistema e δ , fator de amortecimento.

$$T''_o + [2\omega_n \delta]T'_o + \omega_n^2 T_o = (Q' R_o + T_e)\omega_n^2 \quad (7)$$

O sistema é criticamente amortecido se $\delta = 1$, subamortecido se $\delta < 1$ e superamortecido se $\delta > 1$, onde:

$$\omega_n^2 = \frac{1}{(C_h R_{ho} C_o R_o)} \quad (8)$$

e

$$\delta = \frac{\omega_n}{2} [C_o R_o + C_h R_o + C_h R_{ho}] \quad (9)$$

2.5.2 Sistema de Controle Proporcional

O controle proporcional surge de um melhoramento do controle ON-OFF onde a potência injetada no sistema varia de acordo com a proximidade que a temperatura da máquina térmica está da temperatura de *set-point*. Um controlador proporcional realiza isso com a função a seguir:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{R_o} (T_s - T_o) \quad (10)$$

Considerando-se que a potência do aquecedor fique limitada entre 0 e a sua potência máxima (e que o aquecedor não absorve calor). O parâmetro $\lambda > 0$ é o ganho do controlador. Com este controlador, a equação do oscilador harmônico se torna:

$$T_o'' + 2\omega_p \delta_p T_o' + \omega_p^2 T_o = (\lambda T_s + T_e) \omega_n^2 \quad (11)$$

Onde,

$$\delta_p = \delta \sqrt{(1 + \lambda)} \quad (12)$$

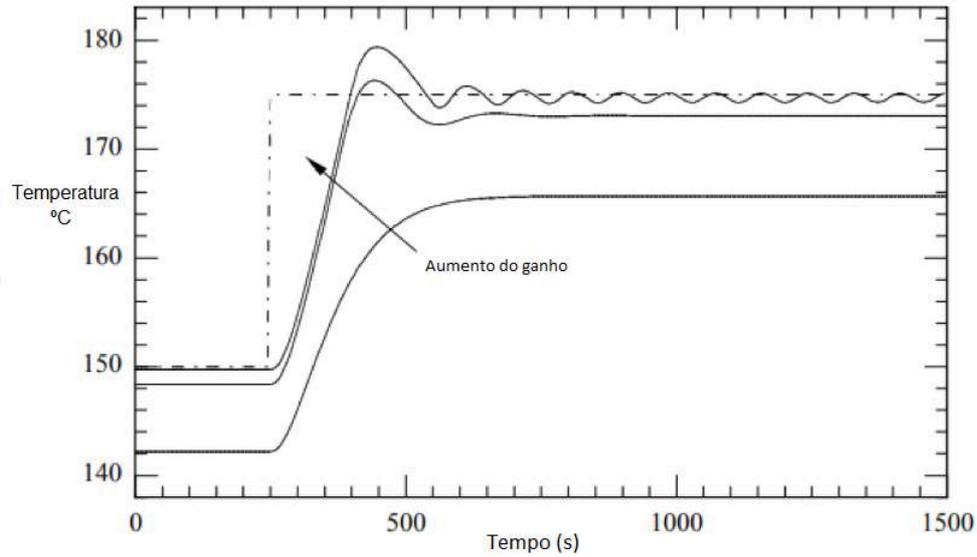
e

$$\omega_p^2 = \omega_n^2 (1 + \lambda) \quad (13)$$

Então, aumentando o ganho λ , teremos um aumento da velocidade do sistema e consequentemente uma redução do coeficiente de amortecimento, causando assim um “*overshoot*” de temperatura em torno do *set-point*, o que para os fins da aplicação desse

trabalho, não é uma situação desejada, pois submeter a amostra a temperaturas superiores ao desejado pode ocasionar danos ao processo de fermentação.

Figura 10 - Sinais de um sistema de controle proporcional, mostrando o pico do sinal da temperatura para evitar o overshoot do sistema



Fonte: Dogan (2013)

2.5.2.1 Resolução da equação diferencial por transformada de Laplace e expansão em frações parciais.

Aplicando a transformada de Laplace na equação (11), obtém-se a seguinte equação:

$$s^2 T_0 + 2\delta_p \omega_p s T_0 + \omega^2 T_0 = \frac{\lambda T_s + T_e}{s} \omega_n^2 \quad (14)$$

Isolando T_0 , obtém-se:

$$T_0 = \frac{\lambda T_s \omega_n^2}{s(s^2 + 2\delta_p \omega_p s + \omega_p^2)} + \frac{T_e \omega_n^2}{s(s^2 + 2\delta_p \omega_p s + \omega_p^2)} \quad (15)$$

Analisando cada termo isoladamente e usando o método de expansão por frações parciais, pode-se representar a equação (15) da seguinte forma:

$$\frac{(\lambda T_s \omega_n^2) * 1}{s(s^2 + 2\delta_p \omega_p s + \omega_p^2)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+p_1} + \frac{C}{s+p_2} \quad (16)$$

$$\frac{(T_e \omega_n^2) * 1}{s(s^2 + 2\delta_p \omega_p s + \omega_p^2)} = \frac{D}{s} + \frac{E}{s+p_1} + \frac{F}{s+p_2} \quad (17)$$

$$\text{Onde: } p_{1,2} = -\delta_p \omega_p \pm \omega_p \sqrt{(\delta_p^2 - 1)} \quad (18)$$

Usando a Transformada Inversa de Laplace, tem-se:

$$T_0(t) = A + B e^{-p_1 t} + C e^{-p_2 t} + D + E e^{-p_1 t} + F e^{-p_2 t} \quad (19)$$

$$T_0(t) = (A + D) + (B + E) e^{-p_1 t} + (C + F) e^{-p_2 t} \quad (20)$$

Para comprovar que o sistema é estável e tende para uma temperatura de equilíbrio para um tempo t tendendo para o infinito, aplica-se o limite para:

$$t \rightarrow \infty$$

E obtém-se:

$$T_0(\infty) = (A + D) \quad (21)$$

A equação acima (21) é a temperatura no equilíbrio térmico, que é obtida em função dos parâmetros do circuito térmico como capacitâncias e resistências térmicas obtidas no experimento.

Para o cálculo dos coeficientes A e D, pode-se fazer da seguinte forma:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{(\lambda T_s \omega_n^2) * s}{s(s^2 + 2\delta_p \omega_p s + \omega_p^2)} = s \left(A + \frac{Bs}{s+p_1} + \frac{Cs}{s+p_2} \right) \quad (22)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{(\lambda T_s \omega_n^2) * 1}{(s^2 + 2\delta_p \omega_p s + \omega_p^2)} = A + \frac{Bs}{s+p_1} + \frac{Cs}{s+p_2} \quad (23)$$

$$A = \frac{(\lambda T_s \omega_n^2)}{\omega_p^2} \quad (24)$$

E de igual forma para o segundo membro da equação:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{(T_e \omega_n^2) * s}{s(s^2 + 2\delta_p \omega_p s + \omega_p^2)} = s \left(\frac{D}{s} + \frac{E}{s+p_1} + \frac{F}{s+p_2} \right) \quad (25)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{(T_e \omega_n^2) * 1}{(s^2 + 2\delta_p \omega_p s + \omega_p^2)} = D + \frac{Es}{s+p_1} + \frac{Fs}{s+p_2} \quad (26)$$

$$D = \frac{(T_e \omega_n^2)}{\omega_p^2} \quad (27)$$

Substituindo as equações (24) e (27) na equação (21), obtém-se:

$$T_0(\infty) = (\lambda T_s + T_e) \frac{\omega_n^2}{\omega_p^2} \quad (28)$$

E utilizando a definição (13) na equação (28), obtém-se :

$$T_0(\infty) = \frac{(\lambda T_s + T_e)}{\lambda + 1} \quad (29)$$

Concluindo que a temperatura de equilíbrio do sistema dependerá diretamente da temperatura de *set-point* desejada, a temperatura externa do ambiente e do ganho do controlador e tenderá a um valor fixo, sem flutuações, independente das características térmicas dos materiais envolvidos.

Para uma análise mais minuciosa da variação de temperatura do sistema com o passar do tempo serão necessários os cálculos dos coeficientes B, C, E e F, para isso deve-se seguir o mesmo princípio de expansão por frações parciais descrito acima e obtemos os seguintes valores:

$$B = \frac{(\lambda T_s \omega_n^2)}{p_1(p_1 + p_2)} \quad (30)$$

$$C = \frac{(\lambda T_s \omega_n^2)}{p_2(p_1 + p_2)} \quad (31)$$

$$E = \frac{(T_e \omega_n^2)}{p_1(p_1 + p_2)} \quad (32)$$

$$F = \frac{(T_e \omega_n^2)}{p_2(p_1 + p_2)} \quad (33)$$

A partir dos termos encontrados acima, das equações descritas em (5) e (6) e das propriedades térmicas dos materiais nas equações (34-37), podemos descrever o comportamento temporal do sistema e como o sistema se comporta de acordo com os valores dessas propriedades.

$$C_h = m_{al} * c_{al} \quad (34)$$

$$m_{al} = d_{al} * V_{al} \quad (35)$$

$$R_{ho} = \frac{1}{hA} \quad (36)$$

$$C_o = m_{biomassa} * c_{biomassa} \quad (37)$$

Onde d_{al} e V_{al} , descritos na equação (35), são respectivamente a densidade e o volume da placa de alumínio, c_o é o calor específico, h é o coeficiente de transferência térmica e A é a área de contato térmico da biomassa com a placa de alumínio.

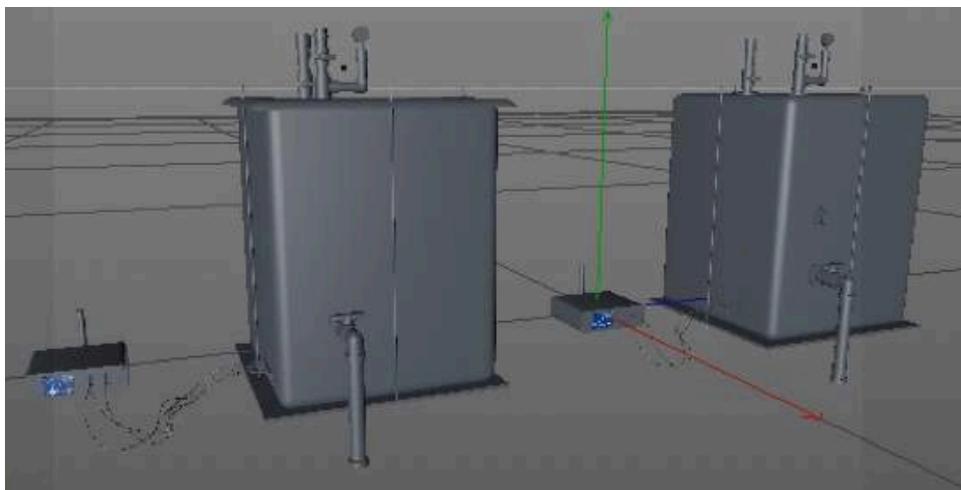
Através das análises teóricas realizadas nesta seção, pode-se observar como sistemas térmicos de aquecimento se comportam em função de suas propriedades térmicas e o que esperar da estabilidade de tais sistemas para a estratégia de controle proporcional adotado nesse trabalho, tendo assim, uma base teórica para podermos passar para a próxima etapa, referente à aplicação prática já prevendo de antemão as possíveis reações de comportamento do sistema às estratégias de aquecimento a serem utilizadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Reatores

Para a construção dos reatores, os quais foram inicialmente desenhados em CAD (Computer Aided Design) conforme Figura 11, foram utilizados os seguintes materiais: fibra de vidro com espessura de 5 mm, com o objetivo de prover o isolamento térmico parcial; placa de alumínio com espessura de 3 mm, na base da câmara do reator, com uma das faces em alto relevo (Figura 12), onde será depositada a biomassa. Na face inferior desta placa de alumínio (face lisa) é onde será instalado os dispositivos eletrônicos de aquecimento. Nesta placa também serão fixados os tubos de alumínio 10 mm de diâmetro, os quais contêm os sensores de temperatura e respectivas conexões (flanges e porcas); colas especiais e resinas. O formato externo escolhido para os reatores foi de formato quadrado e internamente os reatores possuem arestas arredondadas.

Figura 11 - Reatores de biodigestão anaeróbica desenhados em C.A.D.



Fonte: O autor

3.1.1 Armação Férrea

Foi construída uma estrutura de aço, usando barras com perfil em L, de 2 mm de espessura (Figura 13), com o objetivo de minimizar deslocamentos da placa de aquecimento da câmara do reator, em função do peso do substrato.

Figura 12 – Placa de alumínio com estrias em alto relevo para aquecimento da câmara do reator



Fonte: O autor

Figura 13 - Barras metálicas com perfil em L na parte inferior da base do reator



Fonte: O autor

3.1.2 Flange da Placa de Aquecimento

Foi confeccionada uma flange para acomodação do sensor de temperatura na parte inferior da face lisa da placa, na conforme Figura 14.

Figura 14 - Flange conectada à placa de alumínio, base da câmara do reator



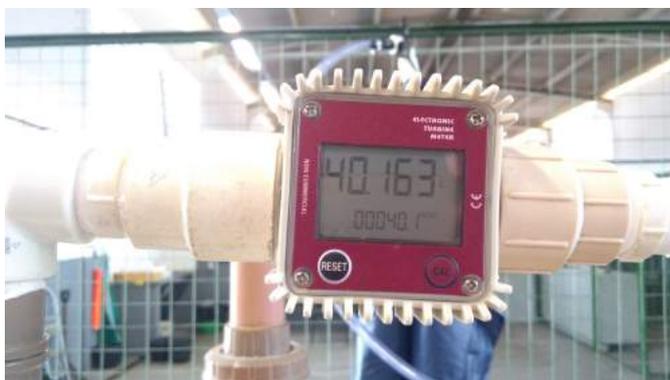
Fonte: O autor

3.2 Equipamentos para Instrumentação

3.2.1 Fluxímetro Digital

Foi utilizado um fluxímetro digital, marca Flow Meter, modelo K24, como medidor de vazão para medir o volume de gás produzido pelo reator (Figura 15). O sistema utiliza tecnologia de medição por princípio eletromagnético cujas especificações técnicas constam descritas na Tabela 1.

Figura 15 - Fluxímetro digital instalado na tubulação de saída do reator



Fonte: O autor

Tabela 1 - Especificações técnicas do Fluxímetro

Descrição	Parâmetro
Medição de Fluxo	10 a 100 litros / min
Incerteza	1%
Pressão Máxima	20 bar
Temperatura Nominal	-10 °C à +50 °C
Tipo de Conexão	Rosca de 1 Polegada.

Fonte: O autor

3.2.2 Sistema de Aquisição

Foi utilizado um sistema eletrônico de monitoramento e controle de temperatura, modelo SMT1604, marca Sciens[®], o qual tem 4 canais de aquisição independentes, sem multiplexarem no tempo, conforme Figura 16.

Figura 16 – Sistema de aquisição modelo – SMT1604



Fonte : O autor

Tal sistema eletrônico tem sinais analógicos de saída de corrente e/ou tensão (4-20mA; 1-10V) para atuar em outros sistemas eletrônicos de aquecimento, resfriamento, bombeamento e etc., ou seja, qualquer grandeza que possa ser alterada eletronicamente. Para o propósito deste estudo foi instalado em cada um dos reatores um sistema de aquisição desse tipo. No reator 1 tem-se o objetivo de monitorar e controlar a temperatura da biomassa. No reator 2 tem-se o objetivo apenas de monitorar a temperatura da biomassa.

3.2.3 Sensor de Temperatura

Foram instalados 6 sensores de temperatura tipo ST1604, marca Sciens[®], dos quais dois deles foram colocados na câmara do reator 2, três sensores foram instalados no reator 1, e um sensor foi instalado na parte externa do reator 1 com o objetivo de monitorar a temperatura do ambiente. A Figura 17 mostra os sensores de temperatura instalados na câmara do reator 1: um a 25 cm de altura e outro a 50 cm de altura da placa fixados nas flanges que foram colocadas na placa de alumínio que serve como base para depositar o substrato na câmara do reator.

Figura 17 – Sensores ST1604 instalados nos reatores



Fonte: O autor

Na figura 18 tem-se o sensor de temperatura instalado na face lisa da placa de alumínio para aquecimento do substrato no reator 1.

Figura 18 – Sensor de temperatura instalado na placa de aquecimento



Fonte : O autor

Para que os sensores se conectem com o sistema eletrônico de controle foi instalado nos reatores uma chapa de alumínio plana e perfurada contendo os conectores do tipo DIN com o objetivo de conectar os cabos vindos dos sensores de temperatura (Figura 19).

Os cabos provenientes do sistema atuador FAL1704-R foram conectados na chapa de alumínio através de conectores BNC.

Figura 19 - Barra de conectores que conecta o sistema de controle



Fonte : O autor

3.2.4 Sistema eletrônico atuador para aquecimento

Um sistema eletrônico foi utilizado para funcionar como atuador (tipo proporcional) do sistema de controle da temperatura no reator 1, modelo FAL1704-R, marca Sciens[®]. Este sistema consiste em um circuito eletrônico com uma entrada para conectar à saída de corrente do instrumento SMT1604.

O aquecimento é feito por dispositivos eletrônicos instalados na parte inferior da placa de alumínio do reator controlado (Figura 20).

Figura 20 – Sistema de controle FAL1704-R conectado ao sistema de aquisição e controle SMT1604



Fonte : O autor

3.2.5 Manômetro Analógico

O manômetro utilizado para medir a pressão de gás produzido nos reatores foi do tipo analógico, de classe B (ABNT), marca A.B.C. – fabricado no Brasil (Figura 21). O instrumento possui uma escala em duas medidas: a primeira, na cor preta, mede pressão

máxima de 1 Kgf/cm^2 , e a segunda escala, em cor vermelha, mede a pressão em psi. Para fins de testes foi adotado a escala de Kgf/cm^2 .

Figura 21 - Manômetro analógico



Fonte: O autor

3.3 Substrato

Para produção do substrato utilizado nos reatores, foi coletado no restaurante universitário da UFPE, restos de alimentos (R.A.) (Figura 22). Os restos de alimentos foram triturados com água em volume de 1:1 (v:v).

Figura 22 - Resto de alimento para produção do substrato



Fonte: O autor

3.4 Procedimentos Experimentais

3.4.1 Reatores

Os dois reatores foram instalados no interior de um galpão do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, devidamente protegidos de ações diretas provenientes da chuva e de intemperes da natureza, estando ambos no mesmo ambiente físico (Baía), sendo expostos e submetidos a influência da temperatura em função das alterações climáticas da região na mesma forma e durante o mesmo período em que foram colocados em produção.

A placa de alumínio possui 3 mm de espessura, contém uma face lisa e outra face com estrias em alto relevo, com o objetivo de distribuir melhor o calor no substrato. Na placa de alumínio foram feitos dois orifícios, a fim de instalar as flanges que serviram de base para os dutos onde os sensores de temperatura foram instalados.

A face estriada da placa de alumínio estará em contato direto com o substrato e a outra face da placa (área lisa), parte de baixo do reator, foram instalados os dispositivos de aquecimento do sistema. Na parte de baixo da placa (área lisa), no centro, foi colado uma flange de alumínio plana e lisa, onde foi feita a instalação do sensor de temperatura que medirá a temperatura no centro da placa.

A tampa dos reatores foi desenvolvida com uma parede de fibra de vidro posicionada no centro do eixo vertical da tampa (Figura 23). Isso porque o projeto inicial do reator vislumbrava um reator de fluxo contínuo, utilizando-se da parede vertical para forçar o fluxo do substrato por dentro das divisões existentes na câmara do reator.

As paredes internas do reator foram retiradas e o modelo proposto inicialmente foi modificado para trabalhar como reator de fluxo de batelada, onde o substrato é colocado e retido por um determinado período de tempo sem que haja fluxo contínuo de alimentação. Para tanto a tampa foi fixada com fibra de vidro e resina catalisada no corpo do reator, mantendo a vedação e o isolamento do sistema.

Figura 23 - Tampa do reator com parede de fibra de vidro



Fonte: O autor

Os reatores foram colocados em cima de estruturas de aço quadradas contendo eixos de rosca com porcas, para unir a tampa superior e a base dos reatores, a fim de poder minimizar a dilatação da fibra de vidro em função da pressão proveniente da câmara dos reatores. Então, os reatores foram fechados para realização dos teste de vedação (Figura 24).

Figura 24 - Reator montado sobre o suporte de aço



Fonte: O autor

3.4.1.2 Pressão e volume dos Reatores

Os reatores foram projetados para que a capacidade máxima de substrato inserido fosse de 216 litros com um *headspace* (área onde ficam localizados os gases na câmara do reator) de 20 cm com capacidade para 8 litros de gás.

A pressão máxima admissível pelo reator quando estiver carregado com substrato é de 100 mbar em função da junta de dilatação construída para unir e vedar a fibra com a placa de alumínio. Foram realizados 5 ensaios de pressurização por insuflamento de ar-comprimido para testar a pressão máxima suportada pelo câmara do reator.

A técnica utilizada para teste de pressão no interior do reator foi a de insuflamento, utilizando ar-comprimido em pressões que variaram entre 1 e 250 mbar com intervalos de tempo de 4 horas. Durante os ensaios realizados, quando a câmara do reator foi submetida a pressões superiores a 200 mbar, houveram rompimentos das juntas de dilatação da placa de alumínio com a fibra, promovendo vazamento dos gases insuflados. Assim, admitiu-se que para este modelo de reator com essas características construtivas a pressão máxima admissível é de 200 mbar para uso com gases e de 100 mbar para uso com substrato, em função da pressão hidrostática.

O reator possui 60cm de altura na câmara. Para cada 1cm de altura temos 1 mbar de pressão, então, a pressão hidrostática exercida pelo substrato é de 60 mbar. Como a câmara do reator foi projetada para uma pressão máxima de 200 mbar, temos: 200 mbar (pressão máxima admissível) – 60 mbar (pressão hidrostática, promovida pelo substrato inserido na câmara do reator) = 140 mbar ou 0,140 bar (pressão máxima real de trabalho nominal do reator em retenção).

3.4.2 Substrato

O substrato utilizado para alimentar os reatores foi composto por inóculo e restos de alimentos. O inóculo foi coletado de um biodigestor tipo contínuo, instalado no Departamento de Energia Nuclear da UFPE, composto por esterco de gado diluído com água potável na proporção 1:1 (v:v), estabilizado há 60 dias antes da coleta para este experimento. Foram coletados 192 litros de inóculo, biofertilizante, na caixa de saída do biodigestor contínuo, com auxílio de um balde.

O resíduo de alimento foi coletado no Restaurante universitário da UFPE e levado para o Departamento de Energia Nuclear em sacos plásticos. Foi realizada uma triagem no resíduo para eliminar presença de matérias não-orgânicos como plástico e papel. O resíduo de alimento foi homogeneizado e triturado em triturador de alimentos semi-industrial e depois diluído com água na proporção de 1:1 (v:v) até obter volume de 96 litros, necessário para obter a mistura resíduo de alimento inóculo na proporção 1:1 (v:v).

O resíduo de alimento diluído foi acondicionado no mesmo recipiente já contendo inóculo, para homogeneização manual da biomassa antes de alimentar os reatores, computando no total 288 litros de substrato. Todo material foi homogeneizado após a coleta em uma caixa d'água de 500 litros (Figura 25).

Figura 25 - Substrato homogeneizado



Fonte: O autor

3.4.3 Alimentação dos reatores

Cada reator recebeu 144 litros da mistura de inóculo, resíduo de alimento, na proporção de 2:1 (v:v) que foi introduzida manualmente, com auxílio de baldes plásticos com capacidade para 12 litros, através da flange de entrada (Figura 26 e 27) .

Figura 26 – Alimentação do reator 1



Fonte: O autor

Figura 27 – Alimentação do reator 2



Fonte: O autor

Após alimentação dos reatores, as válvulas de acesso de entrada de substrato e saída de gás foram fechadas. A memória do contador dos fluxímetros foi apagada e a contagem do fluxo de gás produzido foi iniciada.

3.4.4 Medição de temperatura do substrato

Em ambos os reatores a medição das temperaturas realizada pelo sistema eletrônico de monitoramento foi calculada através da média aritmética dos valores obtidos nos sensores de 25cm e de 50cm respectivamente. Estes sensores foram instalados no interior da câmara dos reatores.

As leituras realizadas pelos sensores foram feitas a cada 3 segundos e os dados gravados na unidade de armazenamento externo foram em intervalos de 1 minuto.

O software do sistema de controle possui dois modos básicos de configuração, manual e automático. Para os ensaios de eficiência do sistema de controle, o sistema foi configurado para funcionar no modo automático de controle da temperatura do substrato, através do aquecimento da placa de alumínio, onde o substrato está depositado.

No modo automático de controle de temperatura a temperatura mínima da biomassa foi configurada em 34°C e a temperatura máxima em 37°C.

Desta forma pode-se compensar as flutuações de temperatura no interior da câmara do reator. Assim o sistema fornece uma potência mínima de 40W e a potência máxima de 240W ao reator controlado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estágio Inicial

No dia 04.01.2018 ambos os reatores foram alimentados com o substrato preparado anteriormente, iniciando o processo de retenção. Os sistemas de monitoramento de temperatura dos reatores foi ligado. Esperou-se que se passassem os 3 primeiros dias de retenção para que tivéssemos a certeza de que não haviam problemas técnicos de construção nos reatores, como: vazamentos de fluidos, gases e etc.

A partir do terceiro dia de retenção (07.01.2018), sabendo-se que não houveram problemas técnicos como vazamentos, contaminações do substrato etc., então, foi de fato iniciado o processo de controle de temperatura do substrato contido no reator 1. No reator 2 não foi instalado um sistema eletrônico de controle de temperatura da biomassa.

Neste momento o software do sistema de controle foi configurado para operar com o controle automático da temperatura da placa. A temperatura mínima da placa foi programada no sistema de controle para $34\pm 1^{\circ}\text{C}$ e a temperatura máxima foi programada para $43\pm 1^{\circ}\text{C}$, dando assim, início à coleta de dados da quantidade de biogás produzida pelos reatores diariamente, por meio das leituras dos fluxímetros.

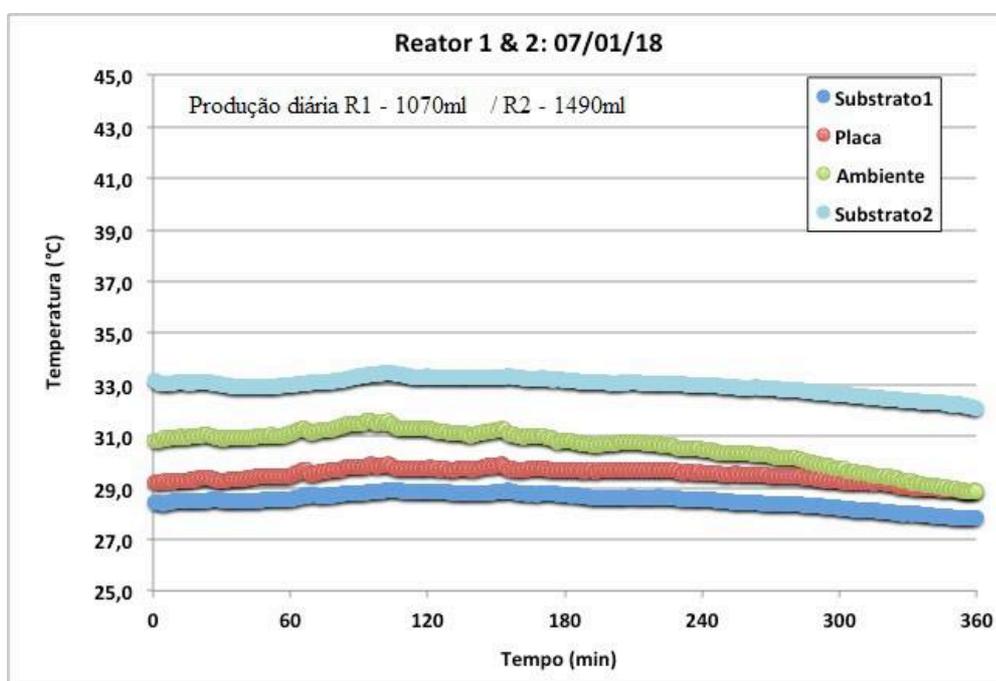
4.2 Acompanhamento diário da produção de Biogás

O sistema de aquisição coleta os dados de temperatura dos substratos contidos nas câmaras dos reatores e armazena em uma unidade de armazenamento USB sobre o formato de arquivo (extensão .txt), o qual gerou o gráfico da Figura 28.

Observa-se no gráfico da figura 28, que no terceiro dia de retenção a temperatura do substrato do reator 2 manteve-se superior à do reator 1, e conseqüentemente a produção de biogás foi maior no reator 2 (1490 ml) do que no reator 1 (1070 ml). Verifica-se também que a temperatura nos substratos dos dois reatores se encontram próximos à temperatura ambiente em $\pm 6\%$. A temperatura do reator 1 manteve-se próxima a 28°C , enquanto a temperatura do reator 2 se manteve próximo a 33°C .

Na Figura 28 temos o gráfico que mostra a evolução da temperatura do substrato contido nos dois reatores, a temperatura ambiente do local e a temperatura da placa aquecedora. Percebe-se que após 3 dias de retenção sem que o sistema de aquecimento entrasse em funcionamento, o reator 2 produziu um maior volume de biogás do que o reator 1, provavelmente devido a temperatura do substrato do reator 2 que se manteve maior do que a do reator 1. Nota-se também que a temperatura do substrato contido no reator 2 ficou mais próxima da temperatura ambiente que a temperatura do substrato contido no reator 1.

FIGURA 28 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato nos Reatores.

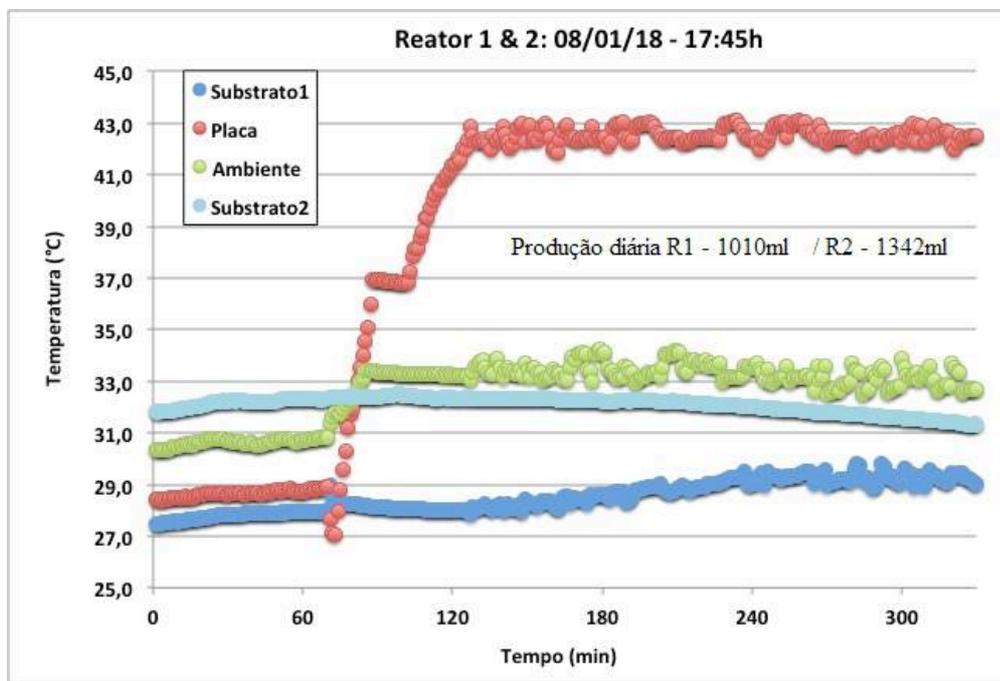


Fonte: O autor

O gráfico da figura 29 ilustra o momento que antecede o acionamento do sistema de aquecimento e controle do reator 1 e os momentos subsequentes ao acionamento do sistema de controle. A temperatura de *setpoint* foi programada para $43\pm 1^{\circ}\text{C}$. Nota-se que a temperatura da placa atinge a temperatura programada no sistema mantendo-se em equilíbrio térmico como esperado. Embora a temperatura da placa de aquecimento esteja em aproximadamente $43\pm 1^{\circ}\text{C}$, observou-se que a temperatura do substrato do reator 1 só começou a subir após pouco mais de 1 hora do acionamento do sistema de controle.

Nota-se também que a presença do pico de temperatura foi minimizado pela eficiência do sistema de controle, como esperado. Nota-se ainda que as curvas de temperatura do reator 2 acompanharam as mudanças de temperatura ambiente. O volume de biogás produzido pelo reator 2 ainda foi maior que o volume de biogás produzido pelo reator 1, pois a temperatura do substrato contido no reator 2 ainda estava maior que a temperatura do substrato contido no reator 1.

Figura 29 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores quando da ligação do sistema.



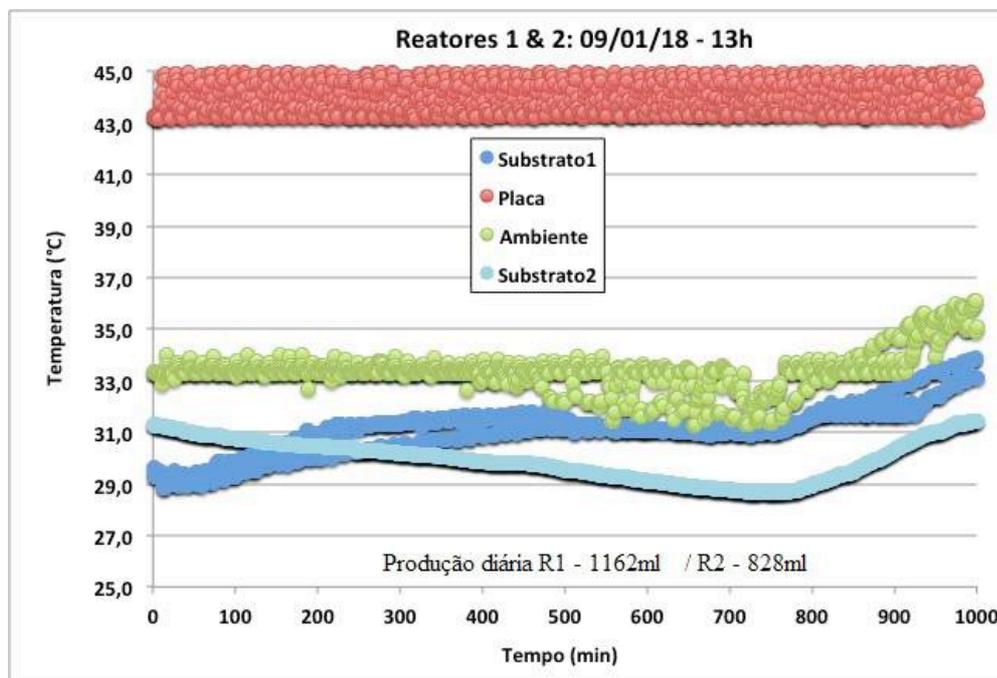
Fonte: O autor

Entre os dias 08 e 09.01.2018, a temperatura de *setpoint* do sistema foi programada para $45 \pm 1^\circ\text{C}$. Observa-se que o sistema manteve a placa com a temperatura em equilíbrio térmico conforme programado no *setpoint*.

A temperatura da placa ficou em torno de $44 \pm 1^\circ\text{C}$ e a temperatura do substrato do reator 1 subiu para $32 \pm 1^\circ\text{C}$, ficando acima da temperatura do substrato do reator 2 (Figura 30).

A temperatura ambiente ficou entre $33 \pm 1^\circ\text{C}$ e $36 \pm 1^\circ\text{C}$. Nota-se então que a produção do biogás no reator 1 foi maior (1162ml) que a do reator 2 (828ml).

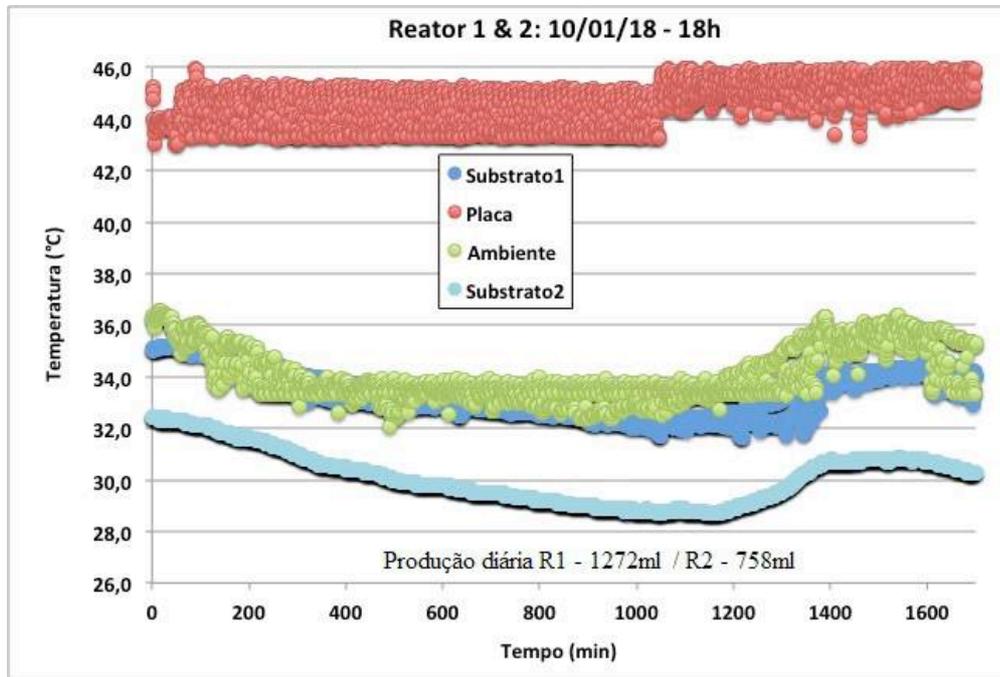
Figura 30 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores.



Fonte: O autor

Entre os dias 09 e 10.01.2018 (Figura 31), propositadamente o valor de *setpoint* da temperatura da placa foi aumentado para $45 \pm 1^\circ\text{C}$ (Figura 32), visando promover o aumento da temperatura do substrato do reator 1, com o objetivo de fazer com que a temperatura do substrato contido no reator chegasse o mais próximo possível de $37 \pm 1^\circ\text{C}$. De fato, neste dia a produção de biogás no reator 1 (1272 ml) foi quase 60% superior ao reator 2 (758 ml). Nota-se ainda que o sistema de controle conseguiu manter a temperatura da placa de aquecimento como configurado no *setpoint* e que a placa do sistema de aquecimento não acompanhou a variação de temperatura do local. Percebe-se que a temperatura do substrato contido no reator 2 acompanhou as variações térmicas do meio ambiente. Nota-se que o sistema de isolamento térmico parcial promovido pelas paredes de fibra de vidro retardam as variações térmicas nos substratos de ambos os reatores. Nota-se também que o sistema de controle não sofreu perturbações que alterassem seu funcionamento.

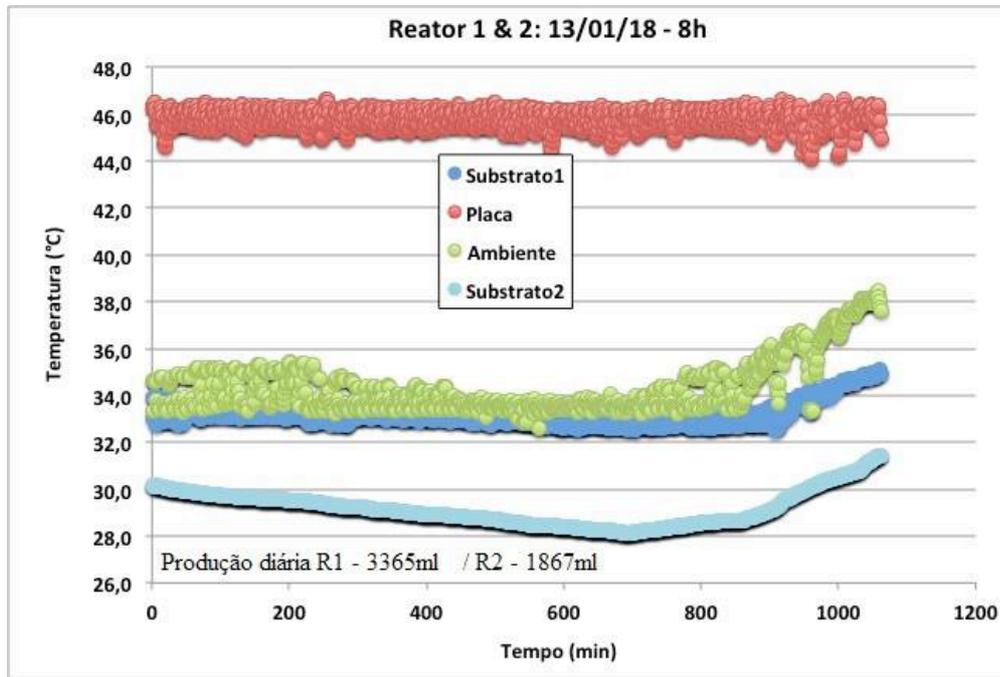
Figura 31 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores.



Fonte: O autor

No dia 13 o sistema foi programado para que a temperatura da placa atingisse $46 \pm 1^\circ\text{C}$ (Figura 32). Nota-se que o sistema mantém a placa em equilíbrio térmico com a temperatura programada no sistema de controle, sem alterações significativas e sem perturbações. Nota-se ainda que no dia 13.01.2018, a temperatura do substrato do reator 1 atingiu $35 \pm 1^\circ\text{C}$ (Figura 32), o que conduziu o reator 1 a uma produção de biogás de 3365ml, neste período (3 dias), enquanto que no substrato do reator 2 a temperatura não ultrapassou $32 \pm 1^\circ\text{C}$ e a produção de biogás neste reator, foi de 1867ml no mesmo período. Percebe-se que a temperatura do substrato contido no reator 2 acompanha as variações térmicas do meio ambiente. Já o substrato contido no reator 1 manteve-se com a temperatura mais elevada que o substrato contido no reator 2. A temperatura ambiente acompanhou as características térmicas do local.

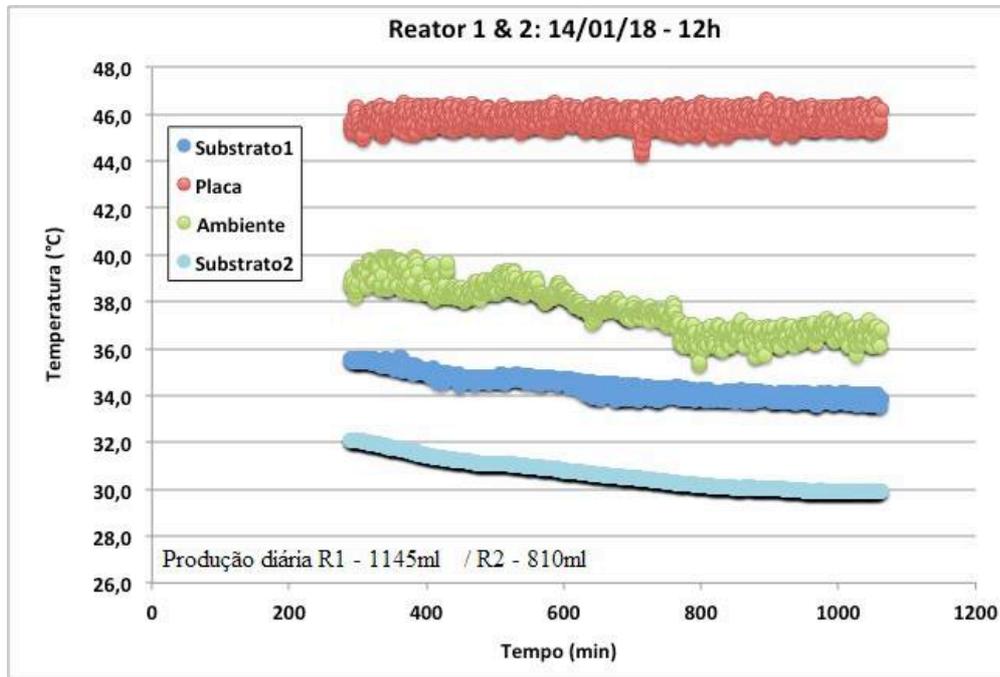
Figura 32 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores.



Fonte: O autor

Na Figura 33 percebe-se que a temperatura do substrato do reator 1 estava em aproximadamente $35 \pm 1^\circ\text{C}$, demonstrando que o sistema de aquecimento no reator 1 foi eficiente, embora houvesse um intervalo de temperatura de aproximadamente 10°C entre a placa de aquecimento e o substrato contido no reator 1. Nota-se também que a temperatura do substrato do reator 2 acompanhou as variações térmicas do meio ambiente, ficando com a temperatura menor que a temperatura do reator 1. Percebe-se ainda que não houveram perturbações no sistema e que a temperatura da placa se manteve estável conforme programado no valor de *setpoint*. A produção de biogás do reator 1 que possui controle de temperatura foi de 1145 ml, enquanto que o volume de biogás produzido pelo reator 2, sem controle de temperatura, foi de 810 ml.

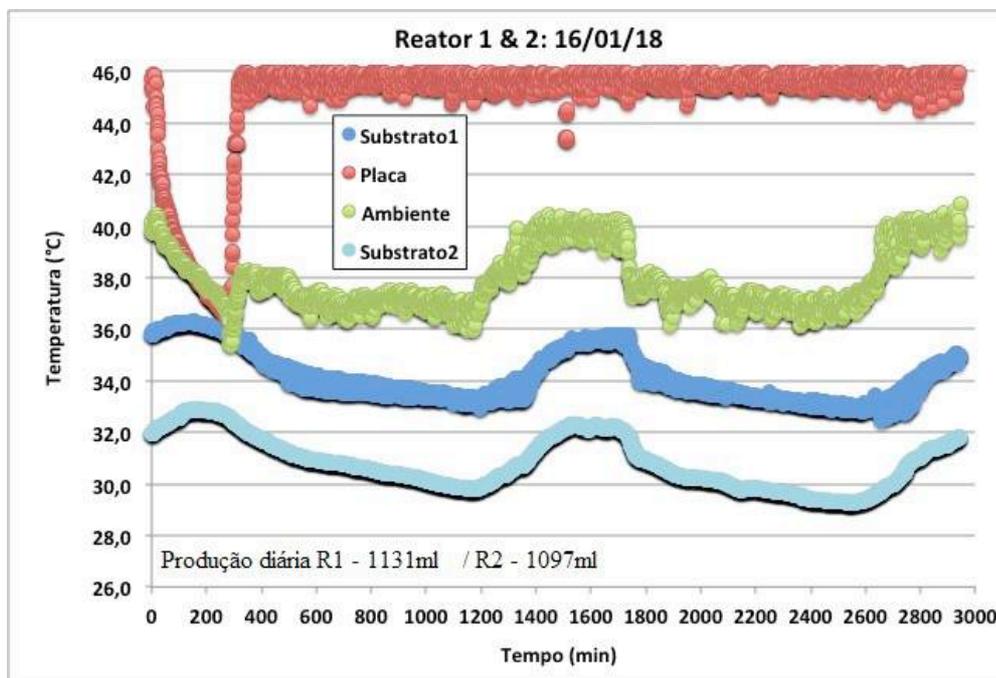
Figura 33 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores.



Fonte: O Autor

Percebe-se no gráfico da Figura 34 que houve um problema no sistema de aquecimento provocado por ruídos provenientes da rede elétrica, pois a temperatura da placa, em um determinado tempo, praticamente se igualou a temperatura ambiente após 3,5 horas. Nota-se também que logo após a perturbação provocada no sistema, o controle de temperatura da placa volta a atuar e manter a placa em equilíbrio térmico com os valores configurados no *setpoint*. A temperatura ambiente variou de acordo com as condições climáticas do local e a temperatura do substrato do reator 2 se manteve abaixo da temperatura do substrato contido no reator 1. Percebe-se que produção de biogás no reator 1 foi ligeiramente superior ao reator 2 e que a temperatura no substrato 1 foi superior.

Figura 34 - Dados coletados do sistema de controle mostrando a temperatura do substrato dos Reatores.



Fonte: O autor

A partir dos gráficos mostrados pode-se observar que quando a temperatura do reator 1 ficou entre 32 e $36^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e a temperatura do reator 2 ficou entre 28 e $32^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ a produção diária de biogás foi sempre superior no reator instrumentado com o sistema de aquecimento e controle de temperatura.

Durante o período avaliado, 33 dias corridos (entre 04.01.2018 e 06.02.2018) observou-se que o sistema permaneceu estável em manter a temperatura da placa conforme programado no valor de *setpoint*.

A tabela 2 mostra um comparativo entre a produção diária de biogás de cada reator, considerando a pressão necessária, mínimo de 10 mbar, para acionamento dos fluxímetros, desprezando o biogás que ficou alocado no *headspace*, (área física da câmara dos reatores onde se alocam os gases) dos reatores. O período de retenção foi de 34 dias, de 04.01.2018 à 06.02.2018.

Tabela 2 - Produção de Biogás dos Reatores

Dia	Reator 1	Reator 2
1	257	393
2	571	402
3	1.070	1.490
4	1.010	1.342
5	1.162	828
6	1.272	758
7	776	579
8	1.177	520
9	1.043	768
10	1.145	810
11	1.148	1.212
12	1.131	1.097
13	1.955	1.750
14	1.700	1.549
15	1.237	1.132
16	1.246	877
17	2.500	2.275
18	3.111	2.321
19	4.870	3.056
20	5.322	2.647
21	5.681	3.526
22	5.712	3.433
23	5.650	3.277
24	2.733	3.301
25	2.520	3.297
26	2.030	1.332
27	1.751	1.082
28	300	210
29	166	213
30	100	133
31	5	15
32	0	9
33	0	0
34	0	1
Total (ml)	60.351	45.635

Fonte: O autor

5 CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos e demonstrados pelos gráficos que referenciam a mudança de temperatura da biomassa em um intervalo de tempo, conclui-se que:

1. O modelo tecnológico de reator para biodigestão anaeróbica que foi construído e posto em operação funciona a contento, produzindo biogás.
2. O sistema de controle de temperatura instalado no Reator 1 se mostrou eficiente em manter a temperatura do substrato em valores superiores aos do reator 2, o qual não tem sistema de controle.
3. A biomassa no reator que não possui um sistema de controle de temperatura acompanha a variação de temperatura ambiente, mantendo-se abaixo da temperatura ótima para produção de biogás tendo produzido um volume inferior se comparado ao reator que possui um sistema de instrumentação para aquecimento e controle da temperatura.
4. A biomassa contida no reator com o sistema de controle atingiu uma temperatura próxima a 36°C, estando na faixa ideal para produzir maior volume de biogás.

REFERÊNCIAS

APHA. American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. 2005. 21th. Disponível em:< <https://www.apha.org>> . Acesso em: 12 abr. 2016.

BALMANT, Wellington. Concepção, construção e operação de um biodigestor e modelagem matemática da biodigestão anaeróbica. 2009. 150f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Curitiba. Disponível em:
<[http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/150\(2\).pdf](http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/150(2).pdf)>. Acesso em: 28 ago. 2015.

B. MACHADO, Gleysson. Geração e Aproveitamento Energético do Biogás: Projeto Probiogás. Portal de Resíduos Sólidos. 2013. Disponível em:<
<https://www.portalresiduossolidos.com>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

BOLZONELLA, D.; CAVINATO, C.; FATONE, F.; PAVAN, P.; CECCHI, F., 2012. High rate mesophilic, thermophilic, and temperature phased anaerobic digestion of waste activated sludge: a pilot scale study. Waste Manage. v. 32, p 1196–1201.

CAVINATO, C.; BOLZONELLA, D.; PAVAN, P.; FATONE, F.; CECCHI, F. 2013. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge and source sorted biowaste in pilot- and full-scale reactors. v. 55, p 260–265.

CHERNICHARO, C. A. L.; CAMPOS, C. M. M. Tratamento Anaeróbio de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Escola de Engenharia da UFMG. 1995. Apostila, 65 p.

CHENGLIU, Gou. Effects of temperature and organic loading rate on the performance and microbial community of anaerobic co-digestion of waste activated sludge and food waste. 2016. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/260110285_Effects_of_Temperature_and_Organic_Loading_Rate_on_the_Performance_and_Microbial_Community_of_Anaerobic_Co_Digestion_of_Waste_Activated_Sludge_and_Food_Waste>. Acesso em: 21 ago. 2017.

CRAVEIRO, A. M.; LA IGLESIA, M. R. de; HIRATA, Y. S. Manual de biodigestores rurais. São Paulo: IPT, 1982. 61 p.

CRONQUIST, Arthur. An integrated system of classification of flowering plants. 1. ed. USA: Columbia University Press, 1981. 1262 p.

EMMANUEL, Morel; BORIS, Tartakovsky; MICHEL, Perrier; SERGE, R. Guiot. Temperature-Based Control of an Anaerobic Reactor Using a Multi-Model Observer-Based Estimator, Biotechnology Research Institute. Département de Génie Chimique. École Polytechnique de Montréal. v. 41. n 3. Jan. 2007. p 978–983.

Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0618043>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

FARIA, R. A. P. Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto. 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura. Disponível em:<<http://tede.unioeste.br>>. acesso em 02 fev. 2015.

FERNÁNDEZ, Rodríguez J.; PÉREZ, M.; ROMERO, L. I. Comparison of mesophilic and thermophilic dry anaerobic digestion of OFMSW. v. 232. Fev 2013. p 59–64. Disponível em:< <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201500097188>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

GASPAR, R. M. B. L. Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais, com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo – PR. 2003. 119f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em:< <https://www.repositorio.ufsc.br> >. Acesso em: 12 fev. 2017.

HARTMANN, H.; AHRING, B.K. Efficiency of the anaerobic treatment of the organic fraction of municipal solid waste: collection and pretreatment. Waste Manage. v. 22. n. 1. Fev 2004. p 35–41. Disponível em:< <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15113112>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

IBRAHIM, DOGAN.; Microcontroller Based Applied Digital Control. 4. ed. U.S: Wiley, 2006. 324. p.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 433 p.

KIM, H.W.; SHIN, H.S.; HAN, S.K.; OH, S.E. Response surface optimization of substrates for thermophilic anaerobic codigestion of sewage sludge and food waste. J. Air Waste Manage. v. 57, p 309–318.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Lei nº 12 305, de 03 de agosto de 2010. Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 24 nov. 2016.

MENDONÇA, E.F. Tratamento anaeróbio de efluentes oriundos da bovinocultura de leite em biodigestor tubular. 2009. 62f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Disponível em: < <http://tede.unioeste.br>>. Acesso em 02 fev. 2015.

NOGUEIRA, L. A. H. Biodigestão: A alternativa energética. v. 1. p 783-787. XIII Congresso Brasileiro de Mandioca. São Paulo 1992.

OLIVEIRA, P. A. V. Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos. EMBRAPA Documentos. 188 p. Concórdia 1993. Disponível em: < <https://www.embrapa.br>>. Acesso em 15 mai. 2017.

PALHARES, J.C.P. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro. Fev 2008. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2008_1/Biodigestao/index.htm>. Acesso em: 21/8/2016.

RUIZ, R. L. Microbiologia Zootécnica. 1.ed. São Paulo: Roca, 1992. 314 p.

SOUZA, M.A.A.; SOUZA, S.R.; VEIGA, Jr. V.F.; CORTEZ, J.K.; LEAL, R.S.; DANTAS, T.N.C.; MACIEL, M.A.M. Composição química do óleo fixo de croton cajucara e determinação das suas propriedades fungicidas. v.16. p 599-610. Fev 2016. Revista Brasileira de Farmacologia.

ZENG, Y.; MU, S.J.; LOU, S.J.; TARTAKOVSKY, B.; GUIOT S.R.; WU, P. Hydraulic modeling and axial dispersion analysis of UASB reactor. v. 25, p 113-123. Fev 2005. Biochemical Engineering Journal.

WARD, A. J.; HOBBS, P. J; HOLLIMAN, P. J.; JONES, D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. v. 99, n. 13. p 7928–7940. Mar. 2008. Bioresource Technology.

WAYNE, J. P.. Application of the adm1 model to advanced anaerobic digestion. Bioresource Technology, v.96, p.1832-1842. USA 2005.