

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS PONTA GROSSA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**BRUNO EDWARD MEYER
JULIANO ESTEVAN RIBEIRO
VINICIUS POMBO**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE
PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE
DEJETOS SUÍNOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

PONTA GROSSA

2017

BRUNO EDWARD MEYER
JULIANO ESTEVAN RIBEIRO
VINICIUS POMBO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE
PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE
DEJETOS SUÍNOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Departamento Acadêmico de Engenharia Química (DAENQ) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa (UTFPR - PG), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Giane Gonçalves Lenzi.

Co-orientador: Prof. Dr. Matheus Pereira Postigo.

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS SUÍNOS

por

BRUNO EDWARD MEYER
JULIANO ESTEVAN RIBEIRO
VINICIUS POMBO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 10 de novembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Giane Gonçalves Lenzi
Prof^a. Dr^a. Orientadora

Matheus Pereira Postigo
Prof. Dr. Co-orientador

Ciro Mauricio Zimmermann
Membro titular

Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli
Membra titular

Juliana de Paula Martins
Responsável pelo TCC do curso de Engenharia Química

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

MEYER, Bruno Edward. RIBEIRO, Juliano Estevan. POMBO, Vinicius. **Análise de viabilidade técnica de um sistema de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de dejetos suínos**. 2017. 82 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Atualmente verifica-se uma grande necessidade em desenvolver meios sustentáveis de obtenção de energia e diminuir o impacto ambiental causado pelo uso de combustíveis fósseis. Assim, fontes de energias renováveis apresentam-se como uma potencial solução para os problemas ambientais e energéticos enfrentados pela população mundial. Diante disso, este trabalho tem como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica de implementar um sistema de produção de biogás e tratamento de efluentes a partir da digestão anaeróbia de dejetos suínos. Para tanto, desenvolveu-se e operou-se um sistema estruturado de biodigestão com controle automático de temperatura para avaliar qualitativamente a produção de biogás e caracterizar o substrato antes e depois da biodigestão por meio de análises físico-químicas (sólidos totais, sólidos voláteis, sólidos fixos, pH, alcalinidade total, DBO e DQO). Utilizou-se um biodigestor de 70 litros, alimentado em batelada com dejetos suínos oriundos de atividades pecuárias realizadas no Instituto João XXIII, de Ponta Grossa - PR. O tempo de retenção hidráulica foi de 35 dias e a temperatura de trabalho foi mantida em 35°C. Por meio do sistema desenvolvido foram gerados 347 litros de biogás e obtido um desempenho de 0,01157 m³/kg (massa seca). O teor de sólidos totais reduziu 61,25% e o de sólidos voláteis 70,21%, o que expõe uma diminuição expressiva da fração orgânica do substrato. Os valores de DBO e DQO reduziram, respectivamente, 73,82% e 81,20%, o que revela uma eficiente taxa de degradação do poluente orgânico. A alcalinidade total manteve-se praticamente constante ao longo da biodigestão (2,60 g/L de CaCO₃) e o pH subiu de 6,6 para 8,0. A manutenção do valor do pH próxima à neutralidade e a constância da alcalinidade total durante a biodigestão demonstra uma boa neutralização dos ácidos orgânicos do sistema e um funcionamento equilibrado do processo digestivo. O sistema mostrou-se eficiente e simples em termos de operação e controle de temperatura, além de apresentar uma ótima performance no tratamento de resíduos.

Palavras-chave: Biodigestão. Biogás. Suinocultura. Tratamento. Arduino.

ABSTRACT

MEYER, Bruno Edward. RIBEIRO, Juliano Estevan. POMBO, Vinicius. **Technical viability analysis of a biogas production system from anaerobic digestion of swine manure**. 2017. 82 pages. Final Paper (Bachelor of Science in Chemical Engineering) - Federal Technology University of Parana. Ponta Grossa, 2017.

Nowadays, there is a great need to development sustainable means of obtaining energy, and reduce the environmental impact caused by the use of fossil fuels. Thereby, renewable energy sources appears as a solution to the environmental and energy problems faced by the world population. Therefore, the main objective of this work is to evaluate the technical viability of implementing a biogas production and effluent treatment system from the anaerobic digestion of swine manure. For this purpose, a structured biodigestion system with automatic temperature control was developed and operated to evaluate qualitatively the biogas production and to characterize the substrate before and after biodigestion by means of physical-chemical analyzes (total solids, volatile solids, fixed solids, pH, alkalinity, BOD and COD). A 70 liter biodigester, operated by bath, used swine manure from livestock activities obtained at the João XXIII Institute, Ponta Grossa - PR. The hydraulic retention time was 35 days and setted the operation temperature to 35 ° C. Through the developed system, 347 liters of biogas were produced and a performance of 0.01157 m³/kg (dry mass) was obtained. The total solids content decreased 61.25% and the volatile solids 70.21%, which shows a significant decrease in the organic fraction of the substrate. The values of BOD and COD decreased, respectively, 73.82% and 81.20%, which shows an efficient degradation rate of the organic pollutant. The alkalinity remained practically constant throughout the biodigestion (2.60 g/L of CaCO₃) and the pH increase from 6.6 to 8.0. The maintenance of the pH value near to neutrality and the constancy of the total alkalinity during biodigestion demonstrates the good neutralization of organic acids of the system and the balanced functioning of the digestive process. The system proved to be efficient and simple in terms of operation and temperature control, besides presenting a great performance in waste treatment.

Keywords: Biodigestion. Biogas. Pig farming. Treatment. Arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Adaptado de Oferta mundial de fontes de energia.....	12
Figura 2 - Oferta nacional de energia elétrica	13
Figura 3 - Aplicação de fertilizante orgânico proveniente de dejetos suínos em lavoura de trigo.....	15
Figura 4 - Rotas metabólicas e respectivos microrganismos envolvidos na biodigestão	17
Figura 5 - Modelo de biodigestor canadense com lagoa de estabilização	22
Figura 6 - Biorreator modelo indiano com regulador de pressão com campânula em aço inoxidável.....	23
Figura 7 - Representação tridimensional em corte do modelo biodigestor chinês	24
Figura 8 - Representação do sistema de produção e tratamento de biogás	32
Figura 9 - Esquema representativo do sistema de controle de temperatura do biodigestor.....	34
Figura 10 - Esquema representativo do circuito eletrônico do sistema de aquecimento.....	36
Figura 11 - Georreferenciamento das instalações do Instituto João XXIII.....	39
Figura 12 - Aquecimento das amostras em banho maria durante análise de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis	43
Figura 13 - Procedimento utilizado na análise de alcalinidade total	48
Figura 14 - Espectrofotômetro Pastel UV SECOMAM®.....	51
Figura 15 - Sistema eletrônico de controle de temperatura do biodigestor	53
Figura 16 - Rotâmetro utilizado para medição de vazão do biogás do sistema experimental.....	54
Figura 17 - Gasômetro utilizado para o armazenamento do biogás produzido	55
Figura 18 - Biomassa e biofertilizante (da esquerda para direita) oriundos do sistema de produção de biogás e tratamento de efluentes	68
Gráfico 1 - Curva de produção acumulada de biogás ao longo do processo da biodigestão	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do biogás.....	25
Tabela 2 - Equivalência energética do biogás com outras fontes de combustíveis...	25
Tabela 3 - Densidade e PCI em função da porcentagem de CH ₄ e CO ₂ do biogás ..	26
Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do metano	27
Tabela 5 - Propriedades físico-químicas do gás carbônico.....	27
Tabela 6 - Propriedades físico-químicas do gás carbônico.....	28
Tabela 7 - Análise do biofertilizante líquido de quatro amostras a partir da fermentação anaerobia em diferentes tempos de retenção	30
Tabela 8 – Parâmetros de operação e dimensionamento do sistema experimental .	37
Tabela 9 - Quantidade de animais e fase dos suínos confinados no chiqueiro do Instituto João XXIII	40
Tabela 10 - Classificação dos microrganismos da biodigestão segundo os intervalos de atuação.....	57
Tabela 11 - Resultados obtidos das análises físico-químicas de afluente e efluente	60
Tabela 12 - Teores de umidade, sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos das amostras de afluente e efluente	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 JUSTIFICATIVA.....	10
2 OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL E BRASILEIRA.....	12
3.2 BIOMASSA	14
3.3 BIODIGESTÃO	16
3.3.1 pH.....	18
3.3.2 Temperatura.....	19
3.3.3 Composição da biomassa	19
3.3.4 Composição de oxigênio	20
3.3.5 Água.....	20
3.4 BIODIGESTOR	20
3.4.1 Modelo tubular ou canadense.....	21
3.4.2 Modelo Indiano	22
3.4.3 Modelo Chinês.....	23
3.5 BIOGÁS	24
3.5.1 Metano.....	26
3.5.2 Gás Carbônico.....	27
3.5.3 Sulfeto de Hidrogênio	28
3.6 BIOFERTILIZANTE.....	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1 SISTEMA EXPERIMENTAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	31
4.2 SISTEMA EXPERIMENTAL DE CONTROLE DE TEMPERATURA.....	33
4.3 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO.....	36
4.4 COLETA DE AMOSTRA.....	38
4.5 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS.....	40
4.5.1 Ensaio Sólidos Totais, Sólidos Voláteis e Sólidos Fixos.....	41

4.5.1.1 Materiais e equipamentos.....	41
4.5.1.2 Procedimento	42
4.5.2 Ensaio Potencial Hidrogeniônico	44
4.5.2.1 Materiais e equipamentos.....	45
4.5.2.2 Procedimento	45
4.5.3 Ensaio Alcalinidade Total.....	45
4.5.3.1 Materiais e equipamentos.....	46
4.5.3.2 Procedimento	47
4.5.4 Ensaio Demanda Bioquímica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio	48
4.5.4.1 Materiais	50
4.5.4.2 Procedimento	50
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	52
5.1 SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E CONTROLE DE TEMPERATURA..	52
5.2 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS	59
5.2.1 Sólidos Totais, Sólidos Voláteis e Sólidos Fixos.....	60
5.2.2 Potencial Hidrogeniônico e Alcalinidade Total	63
5.2.3 Demanda Bioquímica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio.....	66
6 CONCLUSÃO	69
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ANEXO A – Descrição técnica dos equipamentos e acessórios utilizados no sistema de produção e tratamento de biogás.....	81
ANEXO B – Descrição técnica dos equipamentos e acessórios utilizados no sistema de controle de temperatura do biodigestor.....	82

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, verifica-se que o consumo de recursos naturais aumentou vertiginosamente devido ao crescimento contínuo da população e a consequente demanda cada vez maior de produtos e serviços. Nos dias de hoje, os padrões insustentáveis de produção e consumo causam um impacto negativo no meio ambiente e exigem progressivamente uma demanda maior de energia. Nesse contexto, a gestão responsável de recursos e resíduos e a geração de energia proveniente de fontes renováveis configuram mecanismos indispensáveis ao desenvolvimento sustentável das gerações atuais e futuras.

Ante esse cenário, a biomassa apresenta-se como uma fonte para produção de energia com elevado potencial de crescimento para os próximos anos. No mercado nacional e internacional, ela se identifica como uma das principais alternativas para diversificação da matriz energética e consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (NETO *et al.*, 2010). Sua utilização é promissora, pois ela pode ser convertida em uma variedade de formas de energia como calor, vapor, eletricidade, hidrogênio, metanol, metano e biogás (CHYNOWETH *et al.*, 2000).

Diante da grande versatilidade de aplicação da biomassa como fonte renovável de energia, o biogás destaca-se de forma particular devido ao fato de seu processo de obtenção permitir, além da própria geração do recurso renovável, o controle e coleta de resíduos orgânicos e a produção de biofertilizantes para uso na agricultura. Além disso, diferentemente de outras formas de energias renováveis, o biogás não possui limitações geográficas e o seu processo de obtenção não requer tecnologias complexas e de elevada sofisticação para produção de energia (TALEGHANI e KIA, 2004).

Nesse panorama, o Brasil, por ser um país líder mundial no segmento agropecuário, gera uma grande quantidade de resíduos orgânicos oriundos da produção animal e, por isso, possui grande potencial para a geração de biogás. Em contrapartida, verifica-se que tais características o configuram passivamente como poluidor do meio ambiente e por esse motivo torna-se necessário que o país desenvolva de novas tecnologias ou métodos para melhorar o desempenho técnico e a viabilidade econômica de implementação do biogás como fonte geradora de

energia. Diante disso, questiona-se qual deve ser o processo envolvido na geração de biogás e como realizar o tratamento adequado dos efluentes oriundos da agropecuária. Nesse contexto, uma das alternativas consiste no desenvolvimento de um sistema integrado que realize a produção de biogás de forma otimizada e o tratamento dos efluentes gerados pela produção animal.

A proposta desse trabalho é promover o conhecimento acerca das condições do meio e dos parâmetros operacionais que envolvem a produção do biogás, bem como o desenvolvimento de um sistema de tratamento de resíduos que permita o aproveitamento energético da mistura gasosa e, ao mesmo tempo, a caracterização do efluente gerado. Dessa forma, diante da elaboração desse projeto, estimula-se a busca de soluções e novas técnicas que diminuam o impacto ambiental causado pelo uso de combustíveis fósseis, possibilitam o uso de fontes de energias renováveis e contribuem para a diversificação da matriz energética brasileira.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diante da necessidade de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e a geração de resíduos poluentes que poluem o meio ambiente, há uma tendência mundial crescente direcionada à produção de energia limpa. Frente a isso, a produção do biogás e o tratamento de resíduos oriundos da agropecuária possibilita a geração desse tipo de energia, a qual pode substituir aquelas cuja origem é fóssil. Atualmente, existem diversos métodos que podem ser aplicados para a geração de biogás e o tratamento de resíduos orgânicos. Mesmo assim, há ainda diversas oportunidades e melhorias que podem ser aplicadas e estudadas no sentido de melhorar a eficiência dos sistemas existentes. A proposta desse trabalho consiste em desenvolver um processo simples e eficiente de produção de biogás e tratamento de efluente, que propicie o aproveitamento energético da mistura gasosa e ao mesmo tempo valorize a sua aplicação como fonte renovável de energia.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Analisar a viabilidade técnica de implementação de um sistema de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de dejetos suínos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver e operar uma instalação piloto para produção e análise quantitativa de biogás.
- Implementar um sistema automático de controle de temperatura na instalação piloto para otimizar a produção de biogás.
- Avaliar, por meio de análises físico-químicas, o desempenho do sistema proposto no tratamento de resíduos da suinocultura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL E BRASILEIRA

Ao longo dos anos a humanidade tem usufruído de diversas fontes de energia para sua sobrevivência e evolução, isso começa pela manipulação do fogo e chega atualmente com a eletricidade gerada pela água, pelo vento ou pelo calor gerado pela queima de algum material. Nos dias atuais, por questões econômicas, o nosso planeta passa por um momento que sua principal fonte de energia é gerada por combustíveis fósseis, ou mais claramente o petróleo e carvão (SCHUTZ *et al.*, 2013). A Figura 1 mostra a situação atual do consumo energético em todo o mundo ao longo dos anos (em Mtoe - unidade de energia em forma de calor liberado na combustão de uma tonelada de petróleo cru).

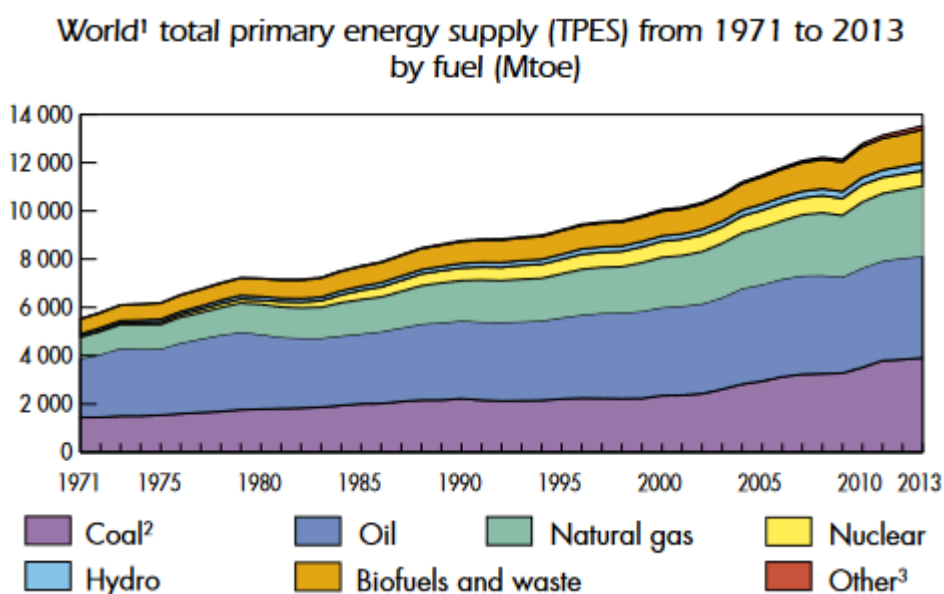
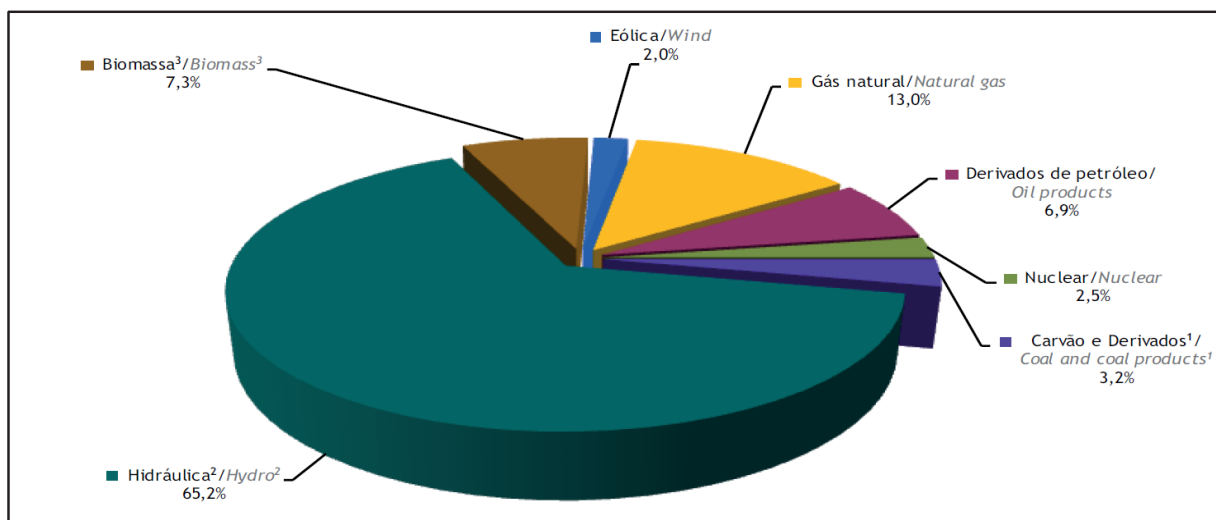


Figura 1 - Adaptado de Oferta mundial de fontes de energia
Fonte: IEA (2015)

O Brasil não se encontra em uma situação muito diferente da mundial com relação ao consumo das fontes de combustíveis fósseis. Porém deve-se destacar as fontes hídricas, que são a principal fonte do país que possui características geograficamente favoráveis pela riqueza fluvial. Tais fontes apresentadas acima na Figura 1 são classificadas com fontes de energia não renováveis, sendo um

problema muito relevante que tem sido caracterizado e discutido por grupos de especialistas ambientais. As fontes hídricas que levam à construção de hidroelétricas, além de alagar áreas de grande extensão e sofrerem problemas burocráticos para liberação dessas, estão chegando a capacidade quase máxima do país e possuem uma vida útil de atividade variando com a represa formada, material e condições climáticas (LIMA *et al.*, 2014).

Com essa classificação destaca-se a biomassa, que como indicado na Figura 2, já vem sendo usada como fonte energia para geração de eletricidade e principalmente em períodos de baixa geração de energia elétrica das hidroelétricas. Porém a principal biomassa utilizada é o bagaço de cana, que são fontes não renováveis e responsáveis pela derrubada de grandes áreas de floresta para queima. Isso gera uma desaprovação de grande parte da população e ambientalistas, e como solução tem se buscado outras fontes de biomassa para geração de energia no lugar da lenha (GOLDEMBERG, 2009).



Notas/ Notes:

¹ Inclui gás de coqueria/ Includes coke oven gas

² Inclui importação de eletricidade/ Includes electricity imports

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações/ Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Figura 2 - Oferta nacional de energia elétrica
Fonte: EPE (2015)

3.2 BIOMASSA

De forma generalizada, a biomassa refere-se à quantidade de matéria orgânica, em geral de origem vegetal, presente em um dado momento, em uma determinada área. Além disso, compreende também os dejetos produzidos pelos homens e animais (SOUZA, 2012 *apud* CARVALHO, 2008). Júnior *et al.* (2009) classifica a biomassa quanto à sua aplicação como fonte de energia: a biomassa “velha”, composta por madeiras e palhas, é normalmente usada na combustão para cogeração de energia térmica; a biomassa plantada é utilizada para produzir agrocombustíveis, como o etanol e o biodiesel; e a biomassa residual é convertida em biogás por meio da biodigestão, para ser usada na geração de energia elétrica.

De maneira mais específica, Júnior *et al.* (2009) enquadra a biomassa residual como restos de vegetais inaproveitáveis para consumo ou plantio (como grãos, sementes e palhas), bem como efluentes sólidos e líquidos da produção pecuária, que podem ser degradados (como dejetos e esterco).

Desde os matrizeiros, início dos processos com animais estabulados, os confinadores e produtores de leite, até os frigoríficos, laticínios e curtumes, pontos finais das cadeias produtivas, gera-se diariamente uma quantidade expressiva de efluentes e resíduos orgânicos, em volumes, ou vazões, proporcionais ao porte dos estabelecimentos. Regulados por legislações e normas ambientais específicas, o atendimento a essas exigências legais demanda investimentos estruturais de grande monta relativamente aos recursos que dispõe a economia setorial. Por falta de equipamentos de tratamento sanitário, esses efluentes quase sempre são lançados no ambiente e atingem redes hídricas ainda carregados de substâncias contaminantes. Não é difícil deduzir que operando dentro de margens de lucro muito limitadas pelas práticas do setor, a produção de proteína animal encontra dificuldades para cobrir os custos de tratamento de seus impactos ambientais. Com isso, a sustentabilidade da atividade é comprometida e pode ocorrer sua inviabilidade quando do não atendimento à legislação ambiental. E encontrar receitas novas e não operacionais, como a produção de energia elétrica e acesso a certificados por redução de emissões de MDL, representa possibilidades preciosas para suprir as necessidades de cobertura de custos e investimentos em tratamentos ambientais. Além do aspecto ambiental, esse aspecto econômico justifica plenamente esforços para o aproveitamento da energia da biomassa residual com a produção de energia elétrica sob a forma de geração distribuídas (JÚNIOR *et al.*, 2009, p. 26).

Frente à essa realidade, certifica-se que é necessário considerar que os resíduos e efluentes, bem como os subprodutos orgânicos da produção rural, são

materiais que poluem o meio ambiente e por isso exigem um tratamento sanitário adequado. Esse tratamento consiste em submeter a biomassa durante um determinado tempo de detenção a um processo fermentativo de digestão, mediante o seu armazenamento sob condições anaeróbias em equipamentos denominados biodigestores. Com isso, obtém-se a redução da carga orgânica bruta do substrato a partir da ação de microrganismos anaeróbios específicos (JÚNIOR *et al.*, 2009). O resultado desse processo de fermentação é a liberação do biogás e produção de biofertilizante (DOTTO e WOLFF, 2012). O biogás é uma mistura gasosa combustível de elevado poder calorífico, que pode ser utilizado como uma fonte renovável de energia (PECORA, 2006). O biofertilizante é um substrato rico em material orgânico, que se encontra na forma líquida após o processo de biodigestão e pode ser facilmente irrigado ao solo como adubo (DOTTO e WOLF, 2012), como mostra a Figura 3 abaixo.



Figura 3 - Aplicação de fertilizante orgânico proveniente de dejetos suínos em lavoura de trigo
Fonte:<http://www.infobibos.com>(2017)

3.3 BIODIGESTÃO

Segundo FNR (2013), o biogás tem origem em um processo biológico denominado digestão anaeróbia, e é uma mistura gasosa composta principalmente de metano (50% a 75% em volume) e dióxido de carbono (25 a 50% em volume), com pequenas quantidades de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e outros gases traço. A sua composição é influenciada principalmente pelos substratos utilizados, pela técnica de fermentação e pelas diferentes tecnologias de construção de usina.

A digestão anaeróbia ou biodigestão é um processo fermentativo realizado por microrganismos que se multiplicam em ambientes anaeróbios e cuja atuação por meio de reações específicas permite a decomposição da matéria orgânica e a sua conversão em produtos específicos (CRAVEIRO *et al.*, 1982). Esse fenômeno ocorre naturalmente em diversos lugares, como por exemplo em pântanos, aterros sanitários e inclusive nos intestinos dos animais (WOHLGEMUT, 2009).

A biodigestão é realizada em cinco etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese. Em tais processos há vários tipos de microrganismos que realizam uma reação biológica, cada um com sua função e importância no sistema, diferentes umas das outras. A Figura 4 demonstra as etapas envolvidas no processo da biodigestão.

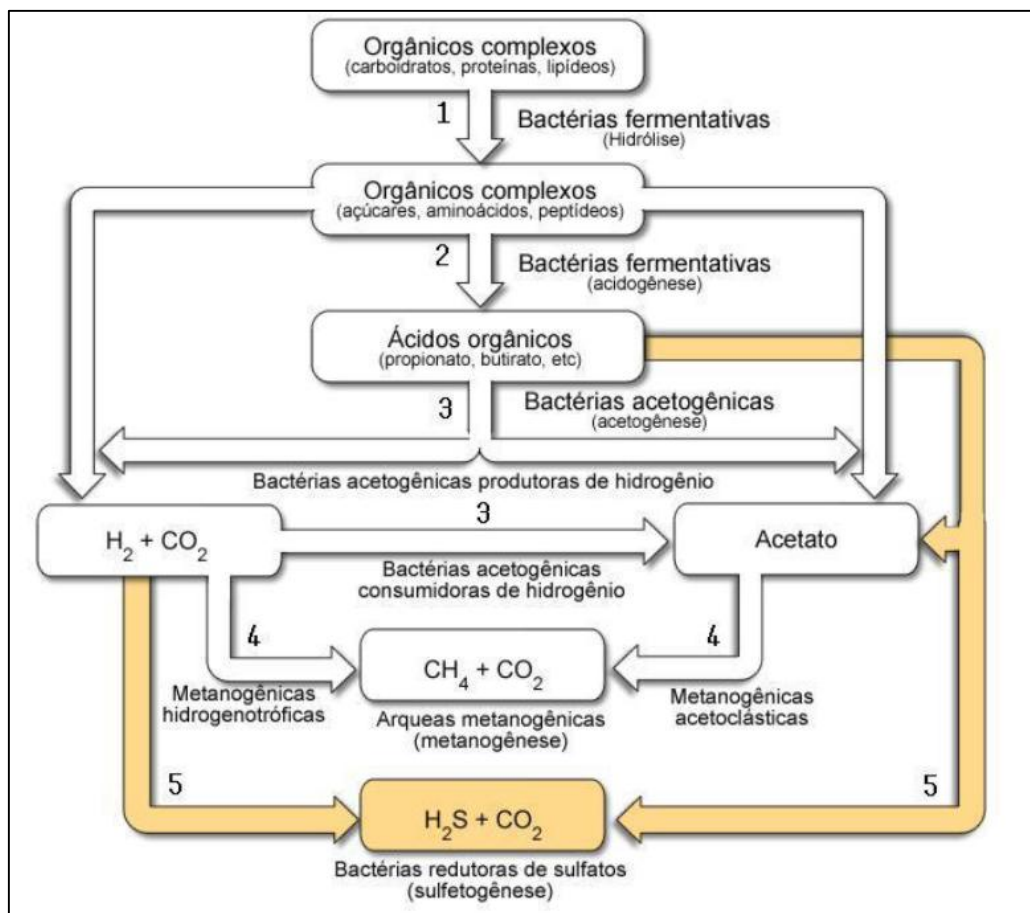


Figura 4 - Rotas metabólicas e respectivos microrganismos envolvidos na biodigestão
Fonte: Gonçalves (2012).

No primeiro estágio, onde ocorre hidrólise, bactérias fermentativas hidrolisam polissacarídeos, celulose é consumida por exemplo, e degradam ácidos orgânicos, álcoois. Elas também fermentam proteínas e lipídeos. Os resultados dessa etapa são compostos orgânicos menos complexos, como açúcares, aminoácidos e peptídeos. A pouquíssima quantidade de oxigênio possível existente nessa etapa é consumido pela reação bioquímica das bactérias (FNR, 2013).

Na etapa posterior, denominada ácidogênese, as bactérias fermentativas transformam o produto da hidrólise em compostos mais simples, que possuem uma cadeia estrutural mais curta. Os produtos finais são ácidos graxos (ácido fórmico e ácido acético), álcoois, ácido láctico, gás carbônico, gás hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio (GONÇALVEZ, 2012). Na etapa seguinte ocorre a acetogênese, onde bactérias sintróficas acetogênicas oxidam as substâncias da fase ácidogênica, gerando hidrogênio e substrato do grupo archeas. Esse grupo de microrganismo consome hidrogênio e gás carbônico gerando acetato que será consumido na

metanogênese. Essas duas transformações, ácidogênese e acetogênese, têm de estar em equilíbrio para não faltar o produto para a fase seguinte. Ambas ocorrem e meio líquido (FNR, 2013).

Na metanogênese o grupo de microrganismos que atuam na bioreação são as archeas, que por definição são microrganismos procarióticos evolutivamente distintos dos procariotos alocados no domínio bactéria (MADIGAN *et al.*, 1997). Os dois grupos de archeas são encontrados, o grupo das archeasmetanogênicas acetoclásticas consome o acetato produzindo metano e gás carbônico e o grupo metanogênicashidrogenotróficas consomem gás hidrogênio e gás carbônico para a produção do metano. Elas produzem 70% e 30% do metano e gás carbônico final do processo respectivamente (GONÇALVES, 2012). Esses microrganismos são muito sensíveis e consomem os compostos de forma muito lenta, logo essa é a etapa limitante de velocidade da biodigestão (BERTOZZO, 2013).

Na sulfatogênese, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, por meio da ação de um grupo de bactérias redutoras de sulfato. Esse processo de metabolismo tem como produto final o sulfeto de hidrogênio (BECKER, 2013). A presença das bactérias redutoras de sulfato na biodigestão é indesejável, pois elas entram em competição metabólica com as produtoras de ácidos voláteis e são responsáveis pela produção do gás sulfídrico, que é corrosivo para os equipamentos metálicos com que o biogás entra em contato (SANTI, 2013).

Por existir uma diversidade de processos e microrganismos diferentes na biodigestão, isso eleva a importância nas condições do ambiente em que ocorre o processo, para que nenhuma etapa seja afetada ou cessada, comprometendo a produção do biogás. As principais condições do ambiente que afetam a biodigestão são apresentadas a seguir.

3.3.1 pH

O controle do pH tem grande importância, principalmente para o grupo de archeas metanogênicas, o qual tem que ser manter em uma faixa neutra (6,3 a 7,8). Qualquer valor fora dessa faixa provoca uma diminuição na velocidade no processo da metanogênese, gerando um desequilíbrio no sistema de biodigestão, uma vez

que a de produção de ácidos pela acidogênese se mantém constante, o pH fica mais ácido e intensifica a queda de velocidade da metanogênese. Esse equilíbrio do processo de alcalinidade e da produção dos ácidos voláteis também pode ser afetado pelas quantidades de certos nutrientes consumidos no processo, as proteínas que geram amônia pela hidrólise e o acetato que gera bicarbonato são as principais fontes que levam o pH para condições alcalinas (PONTES, 2003).

3.3.2 Temperatura

Segundo Chernicharo (1997), em aspectos de reações bioquímicas a temperatura influencia as enzimas e a taxa de difusão de substrato. Em termos biológicos, ela atua como um fator de seleção natural dos microrganismos, uma vez que eles não conseguem controlar a temperatura do meio, e variações bruscas podem afetar o balanceamento da população de bactérias acidogênicas e archeas metanogênicas. Isso pode gerar como consequência variações de pH do ambiente e redução produção de gás, principalmente abaixo de 20°C. Em termos de engenharia, o volume de um reator anaeróbio pode levar em consideração a temperatura, uma vez que pode ser reduzido se o controle térmico for otimizado para a determinada população de microrganismos. Ele descreve a existência de duas faixas ideais para produção de metano, a faixa mesófila entre 30 e 35 °C e a faixa termófila entre 50 e 55 °C.

3.3.3 Composição da biomassa

Os tipos e quantidades de compostos na biomassa têm que ser analisados cuidadosamente para se obter um biogás de qualidade e padrão desejado. Elementos como cálcio, cobre, manganês e molibdênio devem estar presentes em concentrações adequadas para não existir um excesso que provoque inibição na fermentação. Muitas vezes uma fonte é pobre em um grupo de nutrientes, como efluentes industriais de um determinado tipo de indústria ou os resíduos gerados por animais que não possuem uma alimentação rica de nutrientes, logo uma mistura de

diferentes fontes de substrato pode ser uma opção para gerar uma riqueza melhor de nutrientes (PECORA, 2006).

3.3.4 Composição de oxigênio

Como o processo é a biodigestão anaeróbia, então é desejada a menor quantidade possível de oxigênio no ambiente para que não se produza gás carbônico, mesmo que no processo de hidrólise exista o consumo possível de pequenas quantidades. Isso exalta que o meio possua uma impermeabilidade do ar e que exista um cuidado na quantidade de oxigênio na biomassa usada no processo já no início (PECORA, 2006).

3.3.5 Água

A quantidade de água no sistema deve ser entre 60% e 90% do peso total da mistura inicial, o que determina esse valor é ou são os tipos de biomassa usados. A falta ou o excesso além dos valores determinados pode afetar negativamente os microrganismos em suas funções e como consequência a produção do biogás (PECORA, 2006).

3.4 BIODIGESTOR

O biodigestor é uma câmara fechada onde é colocado material orgânico, em meio aquoso, provocando a decomposição, através do consumo e transformação da biomassa, produzindo biogás tendo como principal componente o metano que se encontra na parte superior da câmara e biofertilizante rico em nitrogênio, na forma líquida na parte inferior, por meio de biodigestão anaeróbia (FARIAS, 2009).

Todo biodigestor é seguido por um gasômetro, que é uma campânula que armazena o biogás produzido pela câmara ou tanque de biodigestão. A operação do biodigestor pode ser classificada de três maneiras: com fluxo semi-contínuo, no qual o abastecimento e retirada de produtos ocorre em intervalos de tempo, geralmente

uma vez por dia; com fluxo contínuo, onde o abastecimento de biomassa e descarga de biogás e biofertilizante ocorre praticamente simultaneamente; em bateladas, em que o abastecimento ocorre uma vez e a retirada de produtos é feita apenas no final da biodigestão. Para manter uma produção constante, fluxo contínuo ou semi-contínuo, é necessário que se suceda o abastecimento de matéria orgânica e retirada do biogás a todo o momento da produção. Em ambos os casos, existe uma agitação no substrato para que o contato dos microrganismos e biomassa seja aumentado, e também para que a retirada de bolhas de gás que diminuem a eficiência do processo seja realizada (BERTOZZO, 2013).

A operação por batelada é aquela onde o biodigestor é abastecido uma vez, de forma que a biomassa fica retirada até que o processo de biodigestão ocorra completamente, e só após o término os produtos são retirados liberando o equipamento para uma nova batelada. O método batelada é indicado para biomassas que se decompõem de forma mais lenta, como palha e forragem misturada com resíduos gerados por animais. (GONÇALVES, 2012). Marchaim (1992) descreve uma alternativa para aperfeiçoar o processo em sistema batelada montando um sistema de biodigestores em série, dividindo por períodos de tempo, e movendo de uma câmara para a outra à medida que esse tempo é atingido, mantendo todas as câmaras abastecidas. Exemplificando essa situação, enquanto em um tanque a produção de biomassa é máxima, em outro tanque a produção está em declínio.

Em termos de disponibilidade no mercado, existem 3 tipos de biodigestores disponíveis: o chinês, o indiano e o tubular (canadense). Uma breve descrição dos modelos existentes é apresentada a seguir.

3.4.1 Modelo tubular ou canadense

É o modelo mais moderno encontrado que opera e pode ser construído de forma simples, porém possui pouco tempo de vida útil. A biomassa abastece uma lagoa construída em ambiente externo, com grande extensão e baixa profundidade de forma que possua maior exposição ao sol para a maior produção de biogás. Essa lagoa possui uma manta flexível de PVC que vai inflando à medida que o biogás é

produzido. Existe um tanque que abastece a lagoa com substrato e um tanque que recebe o resíduo da lagoa em forma de biofertilizante (JÚNIOR, 2015). Este modelo é de fácil limpeza, descarga e manutenção. O polímero utilizado é polietileno de alta densidade (PEAD) (EMBRAPA, 2006). A Figura 5 apresenta um biodigestor canadense.



Figura 5 - Modelo de biodigestor canadense com lagoa de estabilização
Fonte: <http://www.radioculturafoz.com.br> (2017)

3.4.2 Modelo Indiano

Este modelo de biodigestor caracteriza-se por possuir uma campânula de metal como gasômetro, a qual estará mergulhada sobre a biomassa em fermentação. Em sua estrutura, há ainda uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. À medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente e aumenta desta forma o seu volume. Com isso, a pressão interna do biodigestor mantém-se constante. Como o gasômetro está disposto sobre o substrato ou selo d'água, há uma redução na perda durante o processo de produção do biogás (DEGANUTTI *et al.*, 2002).

Esses equipamentos apresentam alto custo de construção, devido à necessidade da campânula, e quando feita de aço-carbono ou de ferro fundido, entram em corrosão resultando em uma vida útil curta de aproximadamente 5 anos. Por isto devem ser feitas com aço inoxidável, pois a taxa de corrosão é da ordem de

1.000 a 10.000 vezes menor que em aço comum (TEBECHERANI, 2011). A Figura 6 apresenta um modelo desse tipo de biodigestor.

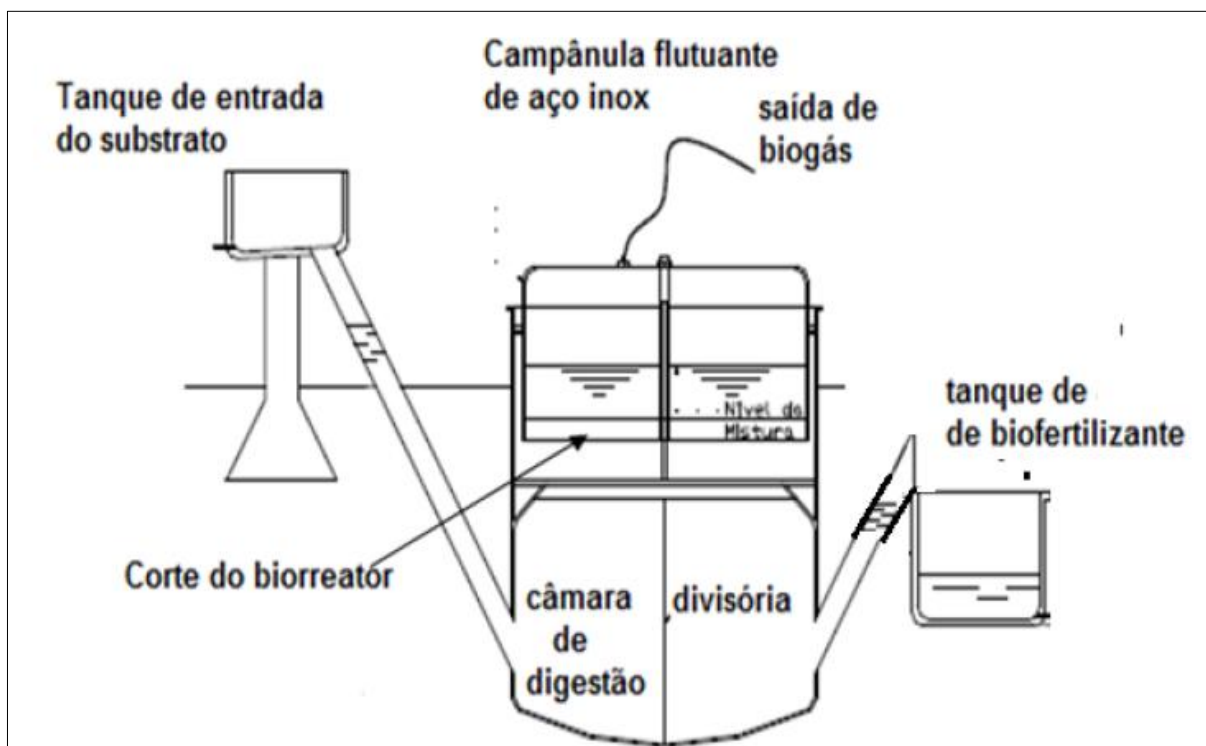


Figura 6 -Biorreator modelo indiano com regulador de pressão com campânula em aço inoxidável

Fonte: ANDRADE *et al.*, 2002

3.4.3 Modelo Chinês

Este tipo de biorreator é construído com reservatório abastecedor de substrato, depósito de biofertilizante em alvenaria, tijolos e cimento com campânula reguladora de pressão, preferencialmente feita de aço inoxidável, também chamado de biorreator com campânula fixa. Na China na década de 70, 7,2 milhões de biodigestores instalados produziram o valor energético equivalente a cinco "Itaipus" ou 48 milhões de toneladas de carvão mineral (GASPAR, 2003).

O modelo chinês tem como base construtiva a mesma estrutura que o indiano, só que possui apenas algumas adaptações básicas. Ele é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria com teto abobado e impermeável, que tem como finalidade o armazenamento do biogás. Seu funcionamento baseia-se no princípio

de prensa hidráulica, ou seja, conforme a pressão interna aumenta durante a produção de biogás, os efluentes da caixa de entrada se deslocarão para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre a descompressão (isto é, quando não há produção de biogás) (DEGANUTTI *et al.*, 2002). A Figura 7 mostra um modelo tridimensional do biodigestor chinês.

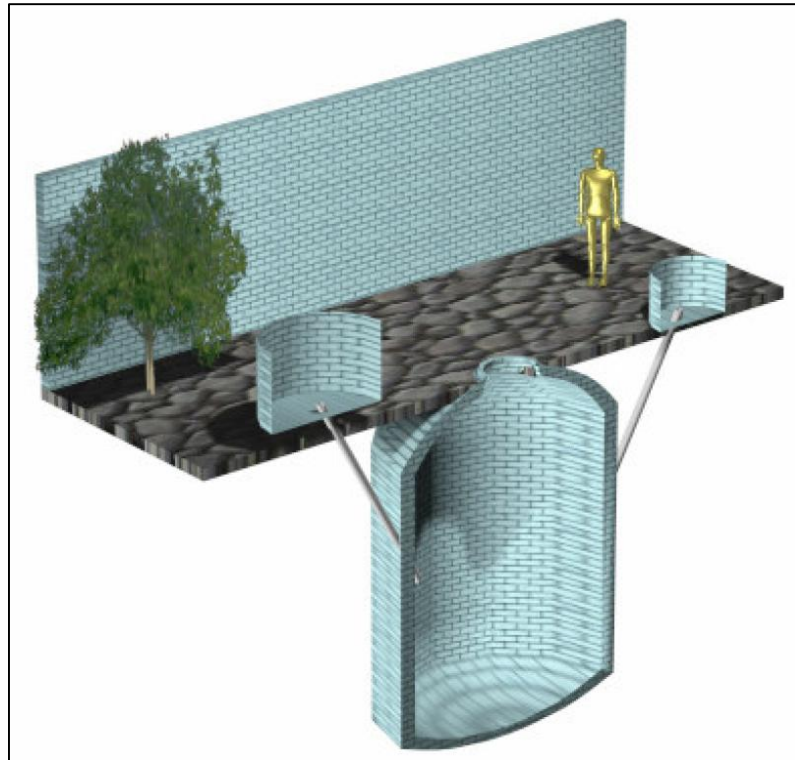


Figura 7 - Representação tridimensional em corte do modelo biodigestor chinês
Fonte: DEGANUTTI *et al.*, 2002

3.5 BIOGÁS

O processo de produção de biogás pela biodigestão é algo comum na natureza. Ele surge em lugares como pântanos, mangues e da decomposição de compostos com celulose e dentro de animais ruminantes. Isso ocorre pela reação anaeróbia de microrganismos, usando matéria orgânica como fonte de nutrição para o processo. O biogás produzido é composto principalmente de CH_4 (metano) e CO_2 (dióxido de carbono), podendo ou não conter pequenas quantidades de NH_3 (amônia), N_2 (gás nitrogênio), O_2 (gás oxigênio) e H_2S (sulfeto de hidrogênio). Esses

traços de gases variam de acordo da composição do material orgânico usado no início do processo (EMBRAPA, 1980). A faixa de composição que pode ser encontrada no biogás é descrita na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Composição do biogás

Gases	Quantidade (%)
Metano	50,0 a 75,0
Dióxido de Carbono	25,0 a 40,0
Nitrogênio	0,5 a 2,5
Oxigênio	0,1 a 1
Sulfeto de Hidrogênio	0,1 a 0,5
Amônia	0,1 a 0,5
Monóxido de Carbono	0 a 0,1
Hidrogênio	1,0 a 3,0

Fonte: Adaptado de Silva (2010)

Oliveira e Gomes (2008) descrevem o uso do biogás produzido na biodigestão como fonte da geração de energia elétrica através de sua queima. O metano, que é o principal componente do biogás, se encontrado em grandes quantidades e com um bom grau de pureza, melhor se a geração de energia. Uma das vantagens da queima do metano é sua conversão em CO₂, e não em CO, que por sua vez é tóxico (COELHO *et al.*, 2006). A Tabela 2 a seguir compara o potencial energética do biogás com outras fontes de combustíveis.

Tabela 2 - Equivalência energética do biogás com outras fontes de combustíveis

Combustível	Biogás (1m³)
Gasolina (L)	0,61
Querosene (L)	0,62
Óleo Diesel (L)	0,55
Gás de cozinha (L)	1,43
Lenha (kg)	3,5
Álcool hidratado (L)	0,8
Carvão Natural (kg)	0,74

Fonte: Adaptado de Inoue (2008)

A Tabela 3 exemplifica mais especificamente o potencial energético do biogás com um comparativo de sua equivalência média energética, com outras fontes através do potencial calorífico inferior (PCI). O PCI define-se como a energia liberada na forma de calor, ou seja, não se leva em consideração a energia gasta na vaporização da água, formada em uma reação de oxidação.

Tabela 3 - Densidade e PCI em função da porcentagem de CH₄ e CO₂ do biogás

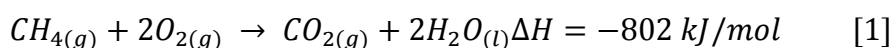
Composição química biogás	Densidade (kg/m ³)	PCI (kcal/kg)
10% CH ₄ 90% CO ₂	1,8393	465,43
40% CH ₄ 60% CO ₂	1,4600	2.333,85
60% CH ₄ 40% CO ₂	1,2143	4.229,98
65% CH ₄ 35% CO ₂	1,1518	4.831,14
75% CH ₄ 25% CO ₂	1,0268	6.253,01
95% CH ₄ 05% CO ₂	0,7768	10.469,60
99% CH ₄ 01% CO ₂	0,7268	11.661,02

Fonte: Adaptado de Iannicelli (2008)

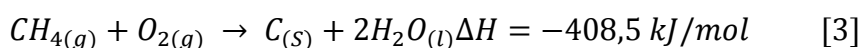
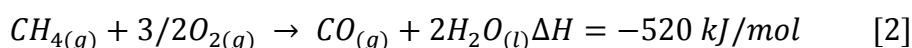
3.5.1 Metano

É uma substância composta por um átomo de carbono e 4 átomos de hidrogênio, ligadas por covalências. É o menor e mais simples hidrocarboneto, encontrado em forma gasosa, inodora e incolor; principal gás causador do efeito estufa. Gerado principalmente pela ação do homem na agricultura, produção de petróleo, jazidas de carvão e por animais ruminantes. Considerado componente mais importante encontrado no biogás para geração de energia (EMBRAPA, 2006). As equações 1, 2 e 3 a seguir apresentam as reações de combustão do metano com liberação de energia:

- Reação completa de combustão do metano:



- Reação incompleta de combustão do metano:



A Tabela 4 apresenta as propriedades físico-químicas do metano.

Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do metano

Propriedade	Descrição
Estado físico	Gasoso
Cor	Incolor
Odor	Inodoro
Densidade	0,717 g.L ⁻¹
pressão de vapor	760 mmHg a -161 °C
massa molar	16,042 g.mol ⁻¹
ponto de ebulição	-161,53 °C
ponto de fusão	-182,6 °C

Fonte: Adaptação de Becker (2013)

3.5.2 Gás Carbônico

O gás carbônico é um dos gases mais comuns no ambiente, principalmente por ser gerado na produção de energia, tanto pela queima de combustíveis fósseis quanto na respiração de animais e plantas. É um gás de pouco impacto para os seres vivos; incolor, inodoro, e com leve tendência a gosto ácido. Porém é o segundo gás com maior responsabilidade no problema do efeito estufa. Em termos da geração de energia no biogás, o gás carbônico abaixa a capacidade calorífica da queima do metano (IANNICELLI, 2008). A Tabela 5 apresenta as propriedades físico-químicas do gás carbônico.

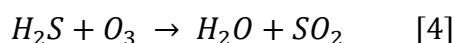
Tabela 5 - Propriedades físico-químicas do gás carbônico

Propriedade	Descrição
Estado físico	Gasoso
Cor	Incolor
Odor	Inodoro
Densidade	1,99 kg.L ⁻¹
Pressão de vapor	60,16 kgf.cm ⁻²
Massa molar	44,010 g.mol ⁻¹
Ponto de ebulição	-56,55 °C a 5,18 bar
Ponto de sublimação	-56,57 °C a 5,30 bar

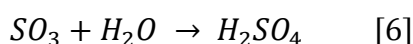
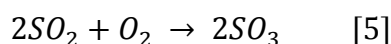
Fonte: Adaptado de Becker (2013)

3.5.3 Sulfeto de Hidrogênio

O sulfeto de hidrogênio é um gás gerador do efeito estufa e causador da chuva ácida, encontrado em campos de petróleo e fontes de gás natural. No biogás é encontrado em pequena quantidade, variando de acordo com a composição da biomassa utilizada no processo. É incolor, inflamável, mais denso que o ar, com odor desagradável e muito venenoso. A sua presença no biogás é indesejável por inibir o processo de biodigestão, e ocasiona corrosão dos equipamentos utilizados (BECKER, 2013). Araújo (2013) explica que o dióxido de enxofre (SO_2) reage com o ozônio (O_3), gás oxigênio e água no ar, produzindo o ácido sulfúrico (H_2SO_4), que é o componente principal de chuva ácida. Na primeira etapa ocorre a reação com o ozônio, conforme mostrado na equação 4:



Em seguida, o dióxido de enxofre (SO_2) oxida com a interação com oxigênio (O_2) e o produto (SO_3) reage com o vapor da água gerando o ácido sulfúrico (H_2SO_4). As equações 5 e 6 ilustram essas reações:



A Tabela 6 apresenta as propriedades físico-químicas do gás carbônico.

Tabela 6 - Propriedades físico-químicas do gás carbônico

Propriedade	Descrição
Estado físico	Gasoso
Cor	Incolor
Odor	Ovo Podre
Densidade	1,363 g.dm ⁻³
Pressão de vapor	1.740 KPa (a 21°C)
Massa molar	34,08 g.mol ⁻¹
Calor específico	1,003 J.K ⁻¹ .g ⁻¹
Ponto de ebulição	-60,0 °C

Fonte: Adaptado de Becker (2013)

3.6 BIOFERTILIZANTE

A produção de biofertilizantes é decorrente do processo de fermentação, ou seja, da atividade dos microrganismos na decomposição da matéria orgânica e de nutrientes, o que pode ser obtido com a simples mistura de água e esterco fresco. (TIMM *et al.*, 2004; SANTOS, 1991).

Devem ser analisados, porém, os riscos decorrentes da sua utilização, principalmente da fonte de matéria orgânica utilizada, com relação à possibilidade de contaminação com metais pesados e também no que diz respeito a danos à saúde humana. Apesar do grande potencial da utilização desses produtos como adubos foliares, são poucos os trabalhos de pesquisa relacionados para esses fins. A reciclagem de resíduos orgânicos, visando seu aproveitamento como fonte alternativa para a produção de biofertilizantes, é uma medida estratégica relevante sob o ponto de vista ambiental e conveniente quando economicamente viável (FERNANDES e TESTEZLAF, 2002).

No que diz respeito à parte analítica de sua composição, o biofertilizante apresenta macro e micronutrientes assimiláveis pelo vegetal, tais como: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, sódio, ferro, cloro, silício, molibdênio, boro, cobre, zinco e manganês. O seu pH pode variar de 7,0 a 8,0 e poderá também ser inferior quando a fermentação for incompleta (SANTOS, 1991).

Poucos trabalhos foram feitos sobre a análise da composição de biofertilizantes, e a grande maioria usa como parâmetro os resultados obtidos por Santos (1991), o qual avaliou a composição química de um biofertilizante (matéria orgânica utilizada foi o esterco de curral de gado leiteiro), a partir de diferentes dias de fermentação. A Tabela 7 expõe a composição do biofertilizante com base no trabalho de Santos (1991).

Tabela 7 - Análise do biofertilizante líquido de quatro amostras a partir da fermentação anaeróbia em diferentes tempos de retenção

Elementos	Dias de fermentação (mg/kg)			
	30	60	90	120
Ca	3260	2600	2460	2372
S	447	170	97,2	112
P	1668	569	410	320
Si	83,1	168	143	177
Fe	44,7	11,3	9,7	11
Cl	1160	810	1090	840
Na	166	250	276	257
K	970	487	532	500
Mo	1	1	1	1
B	1,1	1	1	1
Zn	6,7	3,7	1,3	1,7
Cu	1,1	0,7	1	0,2
Mn	16,6	4,7	3,8	4,6
Mg	312	305	281	312
pH	7,8	7,4	7,6	7,7

Fonte: Adaptado de Santos (1991)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema experimental do presente trabalho foi desenvolvido em escala piloto e utilizado para produção de biogás e análise de biomassa. Os tópicos a seguir elucidam a metodologia experimental e os materiais utilizados para a realização da pesquisa.

4.1 SISTEMA EXPERIMENTAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O sistema foi desenvolvido com o propósito de ser utilizado de forma contínua em pesquisas futuras, tanto na área de tratamento de efluentes quanto no âmbito de produção e purificação de biogás. A Figura 8 apresenta uma ilustração do sistema experimental desenvolvido.

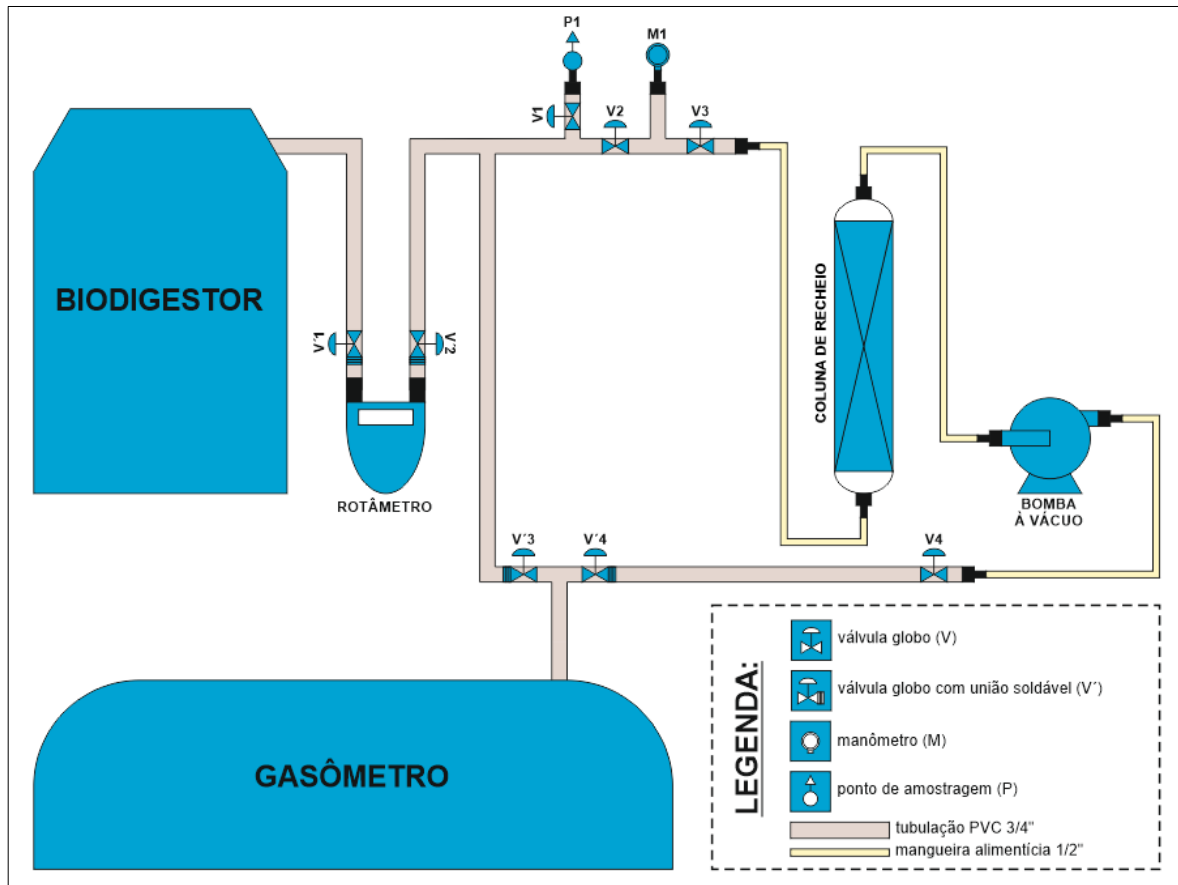


Figura 8 - Representação do sistema de produção e tratamento de biogás
Fonte: Autoria própria (2017)

O sistema possui um funcionamento bastante simples. A biomassa é armazenada no biodigestor e passa naturalmente pelo processo de biodigestão anaeróbia. O sistema como um todo deve, todavia, estar completamente vedado e isolado, de forma a inibir a entrada de oxigênio para o seu interior e permitir a atuação dos microrganismos que realizam a biodigestão. Conforme esse processo ocorre, o biogás é produzido, passa pelo rotâmetro e escoar até o gasômetro. O rotâmetro faz a medição da vazão do biogás quando este passa pelo medidor, e não retorna para o biodigestor por possuir um sistema de retenção instalado internamente. Para atingir o objetivo desse trabalho, o sistema foi utilizado apenas para produção de biogás e tratamento de efluente; assim, a coluna de recheio e a bomba a vácuo, que foram instalados no sistema para realizar estudos futuros na área de purificação de gases, não foram utilizados para execução da pesquisa em questão. Além disso, as válvulas globo 1 e 2 (V1 e V2), bem como a válvula globo com união soldável 4 (V'4), foram mantidas fechadas, para que o gás ficasse armazenado no gasômetro e não escapasse para outros pontos do sistema ou

mesmo para atmosfera. No Anexo A é possível encontrar a descrição técnica detalhada dos equipamentos e acessórios utilizados no sistema de produção e tratamento de biogás.

4.2 SISTEMA EXPERIMENTAL DE CONTROLE DE TEMPERATURA

Para otimizar a produção de biogás foi desenvolvido, com o auxílio do Engenheiro Eletrônico Marcel Antônio Cardoso da Silva, um sistema automático de controle de temperatura da biomassa. Para isso, instalou-se um controle eletrônico simples a partir de um circuito integrado baseado no projeto Arduino. O Arduino, desenvolvido inicialmente na Itália em 2005, trata-se de uma plataforma de prototipagem simples, constituída basicamente de microcontroladores e um software de programação, ambos flexíveis e cuja aplicação permite o desenvolvimento de aplicativos específicos que rodam em circuito eletrônico básico (GOMES e TAVARES, 2013). Diante disso, com base na plataforma Arduino, desenvolveu-se um sistema de controle de temperatura, ilustrado na Figura 9.

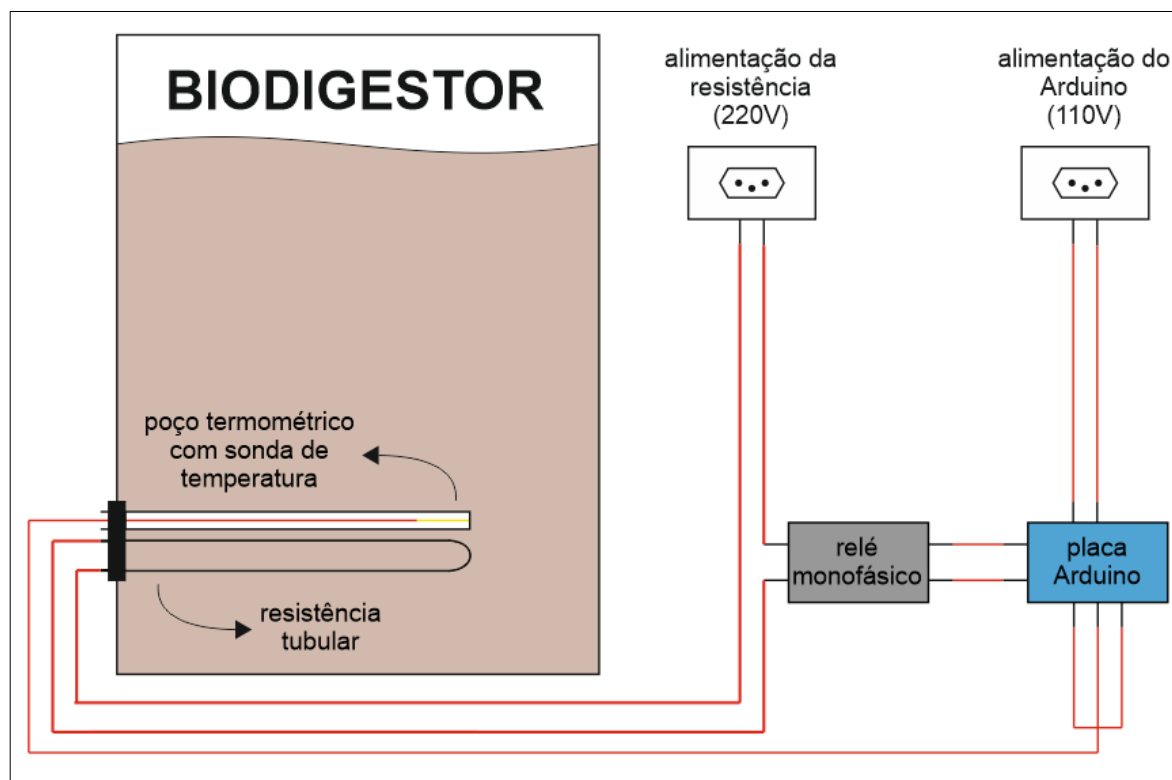


Figura 9 - Esquema representativo do sistema de controle de temperatura do biodigestor
Fonte: Autorial própria (2017)

O sistema foi montado com o intuito manter a temperatura da biomassa constante durante o processo da biodigestão. Para realizar o aquecimento da biomassa instalou-se uma resistência tubular de inox conectada a uma fonte de alimentação de 220V. Próximo a resistência foi instalado um poço termométrico de inox cuja função era acondicionar uma sonda de temperatura. Esta sonda possui um sensor de temperatura em sua extremidade acoplado em uma haste de metal. Dessa forma, o calor é transferido por condução da biomassa para o poço termométrico, que por sua vez transfere o calor para a haste metálica. O sensor que fica acoplado na haste de metal realiza então a leitura da temperatura e envia o sinal para a placa Arduino, que é alimentada por uma tensão de 5V (corrente alternada); assim, há ainda uma fonte conectada na placa que é alimentada por uma tensão de 110V (corrente contínua) e faz a conversão para entregar os 5V necessários. A placa Arduino é conectada também a um relé bivolt, que por sua vez é conectado em uma das fases da alimentação da resistência.

Diante dessa configuração, o sensor realiza constantemente o aferimento da temperatura da biomassa e envia o sinal de leitura para o Arduino. A placa Arduino recebe, por sua vez, o sinal de leitura e envia um sinal de comando ao relé

bivolt. O relé atua somente em função do sinal de comando enviado pelo microcontrolador, e é responsável por executar o corte ou manter ligada uma das fases de alimentação da resistência. Caso a temperatura esteja acima do requerido, o Arduino irá enviar um sinal de comando para que o relé corte a alimentação e desligue a resistência, cessando o aquecimento da biomassa. Caso a temperatura esteja abaixo do requerido, o Arduino enviará um sinal de comando para que o relé mantenha a fase ligada e conseqüentemente a resistência ligada, mantendo o aquecimento da biomassa.

Além disso, instalou-se duas luzes de LED (Light Emitting Diode) e um LCD (Liquid Crystal Display) para interação visual. As luzes de LED eram responsáveis por indicar quando a resistência estava ligada (luz verde) ou desligada (luz vermelha). Isto é, quando a temperatura estava abaixo do requerido, a resistência estava ligada e a luz de LED que acendia era verde; da mesma forma, quando a temperatura estava acima do requerido, a resistência estava desligada e a luz que acendia era vermelha. Além do mais, toda leitura de temperatura realizada pelo sensor e enviada ao Arduino era transformada em um sinal digital que podia ser lido ao vivo no LCD. Junto com a leitura de temperatura, era possível também visualizar no display por indicação de um texto quando a resistência estava ligada ou desligada. Utilizou-se, ainda, um potenciômetro conectado ao sistema para ajuste do contraste e regulagem da luz de fundo do LCD. A Figura 10 expõe um esquema representativo do circuito eletrônico do sistema de aquecimento instalado no biodigestor.

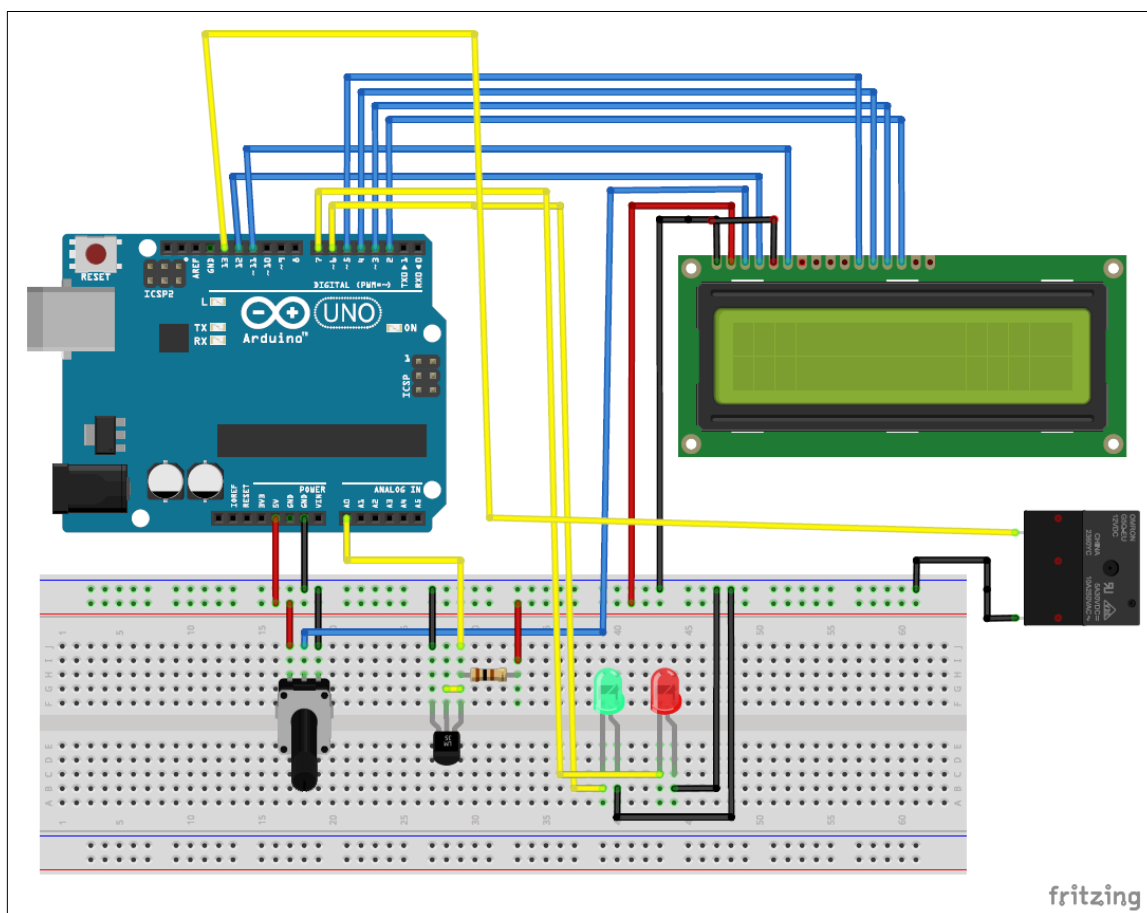


Figura 10 - Esquema representativo do circuito eletrônico do sistema de aquecimento
Fonte: Fritzing (2017)

Para que a placa Arduino funcione e atue corretamente, é necessário programá-la de acordo com a necessidade do usuário, além de logicamente realizar a montagem adequada do microcontrolador e dos seus respectivos componentes. Para tanto, é possível utilizar o software grátis do Arduino e buscar diversas informações contidas no próprio site da empresa. No Anexo B é possível encontrar a descrição técnica detalhada dos equipamentos e acessórios utilizados no sistema de aquecimento do biodigestor.

4.3 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO

O dimensionamento do biodigestor foi feito com base na literatura e nos parâmetros de operação. A Tabela 8 apresenta os parâmetros de trabalho e alguns

parâmetros de dimensionamentos que foram utilizados para a montagem e operação do sistema.

Tabela 8 – Parâmetros de operação e dimensionamento do sistema experimental

Parâmetro	Valor
Modelo de biodigestor	não contínuo
Modo de operação	batelada
Volume do biodigestor	75 litros
Volume do gasômetro	1000 litros
Quantidade de biomassa	60 litros
Tempo de retenção hidráulica	35 dias
Temperatura de trabalho	35 °C
Diluição água/dejeto estimada (volume/volume)	1/1

Fonte: Aatoria própria (2017)

A pesquisa foi realizada em um biodigestor não contínuo e, por se tratar de um sistema simples e prático que exige somente a alimentação de uma única carga, o mesmo foi operado em batelada e projetado em escala laboratorial. Para o dimensionamento do projeto, o volume do biodigestor e do gasômetro foram estimados segundo dados da pesquisa de Xavier e Júnior (2010), que avaliaram a produção média de biogás a partir de bateladas com 60 litros de biomassa, com e sem adição de inóculo. Diante disso, adquiriu-se um biodigestor de 75 litros, que foi abastecido com 60 litros de biomassa para que houvesse uma folga de 20% no equipamento (15 litros), de maneira a evitar o arraste de biomassa para a tubulação do biogás.

O tempo de retenção hidráulica (TRH) de 35 dias e a temperatura de trabalho de 35°C foram escolhidos com base no trabalho realizado por Souza e Campos (2007); o autores realizaram estudos com a digestão anaeróbia de dejetos suínos a partir de diferentes tempos de retenção hidráulica e temperaturas de substrato e observaram que a produção máxima de biogás foi obtida a partir de uma TRH de 30 dias e uma temperatura de fermentação de 35°C. Para garantir que houvesse um aproveitamento maior do processo digestivo, definiu-se para o exposto projeto um aumento de 15% no período de biodigestão (TRH de 35 dias). A relação de água/dejeto da biomassa (1/1 em volume) foi estimada a partir da quantidade de

água utilizada para realizar a limpeza do chão do chiqueiro e, por isso, não era inerente a um fator de seleção ou escolha.

4.4 COLETA DE AMOSTRA

Dentre os diversos tipos de biomassa utilizadas na biodigestão, os resíduos provenientes da suinocultura são uma fonte com elevado teor de matéria orgânica e alto potencial de geração de biogás. Devido à essas características, os dejetos suínos foram escolhidos para serem utilizados no processo de biodigestão do sistema proposto nesse trabalho.

Dessa forma, o local escolhido para realizar a coleta de amostra foi o Instituto João XXIII, uma entidade sem fins lucrativos de direito privado localizada no bairro DER/Colônia Dona Luiza, na cidade de Ponta Grossa - PR. A instituição acolhe crianças e adolescentes das comunidades locais em situação de vulnerabilidade socioeconômica, mediante a promoção de ações continuadas em tempo integral e de forma gratuita, bem como o desenvolvimento de diversas atividades na área educacional e de capacitação profissional.

O instituto possui uma ampla estrutura com cerca de 100 hectares e fomenta diversas atividades agrícolas, como horticultura e pecuária. Essa produção tem como objetivo sustentar as necessidades internas da instituição e gerar renda por meio da comercialização dos excedentes. A Figura 11 demonstra o georreferenciamento das principais instalações do Instituto.

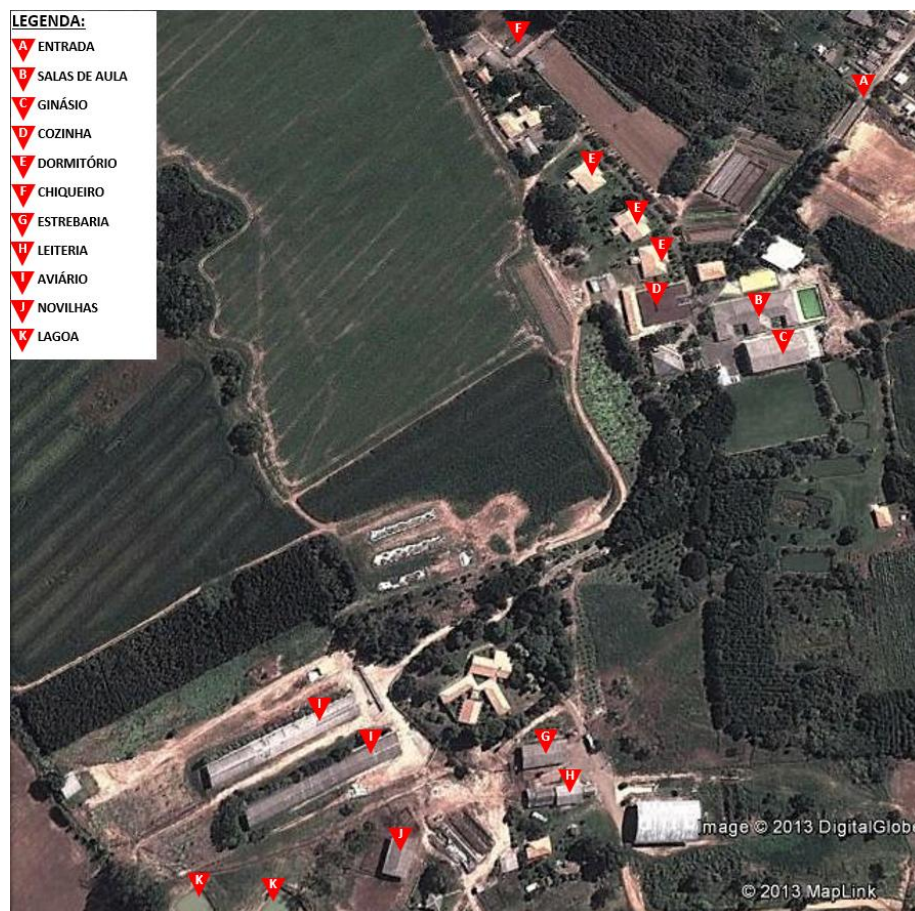


Figura 11 - Georreferenciamento das instalações do Instituto João XXIII
Fonte: Adaptado de Google Earth (2013)

O Instituto João XXIII foi escolhido por desenvolver atividades agrícolas e por estar localizado em uma região de fácil acesso. Dentre as atividades pecuárias a entidade pratica a suinocultura. Todos os suínos ficam abrigados em um galpão localizado na parte mais baixa do terreno (ponto F da Figura 4), são separados em células de confinamento de acordo com a idade e são alimentados basicamente com ração e restos de comida. Os dejetos gerados pelos animais são limpos diariamente mediante raspagem do chão e uso de água e, durante a limpeza, os resíduos caem em uma canaleta externa que desemboca em uma fossa coberta. Semanalmente, quando a fossa enche, um trator com tanque externo e bomba esvazia o local e aplica os dejetos nas plantações de milho e soja presentes na propriedade.

Assim, a coleta da biomassa foi realizada no dia 30 de maio de 2017, apenas após o enchimento completo da fossa. Então, com a fossa cheia, os materiais de coleta e o biodigestor foram levados até o local; inicialmente, os dejetos foram homogeneizados, retirados mediante o uso de um balde graduado de 20 litros

e posteriormente despejados no próprio biodigestor. O procedimento foi repetido até que o biodigestor completasse 70 litros. O biodigestor foi então trazido até as dependências da UTFPR, e o seu conteúdo foi homogeneizado para a retirada de 10 litros de amostra. Essa amostra foi armazenada em um coletor fechado de PVC e depois resfriada, para que subsequentemente fosse utilizada nas análises físico-químicas. O biodigestor foi então devidamente instalado com um volume de 60 litros de biomassa, e todo o sistema foi vedado para que finalmente se iniciasse o processo de biodigestão.

A Tabela 9 apresenta as quantidades de animais e as fases dos suínos confinados no chiqueiro do Instituto João XXIII, referente ao período de coleta de amostra.

Tabela 9 - Quantidade de animais e fase dos suínos confinados no chiqueiro do Instituto João XXIII

Fase	Animal	Idade	Quantidade
Aleitamento	Leitoas	Mais de 6 meses	7
Amamentamento	Filhotes das fêmeas em aleitamento	Menos de 28 dias	9
Crescimento inicial	Suínos	Até 2 meses	28
Crescimento intermediário	Suínos	Entre 2 e 4 meses	13
Crescimento final	Suínos	Entre 4 e 6 meses	3
Reprodução	Leitoa	Mais de 6 meses	1
Terminação	Leitão	Mais de 6 meses	1
Total			62

Fonte: Instituto João XXIII (2017)

4.5 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Da mesma forma que foi feita com a biomassa (afluente), todo o biofertilizante (efluente) obtido após o processo de biodigestão foi homogeneizado para retirada de 10 litros de amostra, que foi armazenada em um coletor fechado de PVC e refrigerada até que as análises fossem realizadas. Ao realizar os ensaios em laboratório, tanto as amostras de 10 litros de afluente quanto de efluentes foram

homogeneizadas e divididas em 3 frascos distintos, os quais foram separados para que todos os experimentos fossem feitos em triplicata.

A caracterização em laboratório da biomassa ocorreu nos meses de maio e junho, e a de biofertilizante nos meses de julho e agosto. Assim, os procedimentos descritos nos tópicos a seguir referem-se tanto às análises de afluente quanto de efluente. Os parâmetros analisados foram: sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos fixos (SF), potencial hidrogeniônico (pH), demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e alcalinidade total (AT). Com exceção da DBO e DQO, todos os ensaios em laboratório foram realizados seguindo as metodologias internacionalmente reconhecidas do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW, 2012), desenvolvidas em conjunto pela *American Public Health Association* (APHA), *American Water Work Association* (AWWA) e *Water Environment Federation* (WEF).

4.5.1 Ensaio Sólidos Totais, Sólidos Voláteis e Sólidos Fixos

O conteúdo dos sólidos totais corresponde à matéria sólida contida nos dejetos e que permanece após a retirada da umidade; por isso, também é chamada de matéria seca. Por sua vez, os sólidos voláteis são constituídos pela fração orgânica e os sólidos fixos pela fração inorgânica dos sólidos totais. Assim, os sólidos totais correspondem à soma dos sólidos voláteis e fixos (LEITE, 2011). Como a biodigestão ocorre por meio da decomposição da matéria biodegradável a partir de microrganismos anaeróbios, os presentes ensaios foram realizados com o intuito de quantificar a matéria orgânica e inorgânica do afluente e efluente. Com base nesse parâmetro, foi possível avaliar então o potencial de produção de biogás e a eficiência do sistema proposto no tratamento de resíduos da suinocultura.

4.5.1.1 Materiais e equipamentos

Para a realização das análises de sólidos voláteis, sólidos totais e sólidos fixos os seguintes materiais e equipamentos foram utilizados:

- Bastão de vidro;
- Balança analítica CHYO NS JK-180;
- Estufa FANEM 320-SE;
- Mufla QUIMIS 318D24;
- Dessecador;
- Chapa de aquecimento;
- Pinças;
- Grampos;
- Cadinhos de 70 mL;
- Béqueres de 100 mL e 200 mL;
- Cacos de porcelana;
- Pisseta com água destilada.

4.5.1.2 Procedimento

Inicialmente, três cadinhos de 70 mL foram aquecidos na mufla a 550°C durante uma hora para eliminação de qualquer potencial contaminante. Após este tempo, os cadinhos foram colocados em repouso no dessecador até que resfriassem naturalmente, e posteriormente foram pesados na balança analítica. Em seguida, inseriu-se uma alíquota de 40 mL de cada frasco de amostra em um béquer de 100 mL e transferiu-se as amostras desses béqueres para os cadinhos, que foram então pesados com os respectivos conteúdos.

Posteriormente à pesagem inicial as amostras foram então colocadas em banho maria com o objetivo de evitar a projeção durante o aquecimento na estufa; para tanto, os cadinhos foram colocados com o auxílio de grampos dentro de béqueres de 200 mL contendo pequenas quantidades de água destilada e cacos de cerâmica, e os mesmos foram levados para a chapa de aquecimento, onde foram aquecidos até o total desaparecimento da água da amostra. A Figura 12 demonstra a etapa de aquecimento da amostra em banho maria.



Figura 12 - Aquecimento das amostras em banho maria durante análise de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis
Fonte: A autoria própria (2017)

Após o aquecimento em banho maria até a evaporação da água, os cadinhos com as amostras foram levados até a estufa com o auxílio de uma pinça, onde foram aquecidos a 105°C durante uma hora e seguidamente colocados no dessecador, até que resfriassem naturalmente. Quando a amostra atingiu a temperatura ambiente, os cadinhos foram novamente pesados na balança analítica e logo depois inseridos na mufla, onde foram calcinados a 550°C durante uma hora. Finalizado o procedimento na mufla, as amostras foram retiradas e introduzidas no dessecador mais uma vez. Quando finalmente atingiu a temperatura ambiente, os cadinhos foram novamente pesados. Os valores dos pesos das amostras em cada etapa foram anotados, e para a realização do cálculo da concentração (em g/L) de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF), utilizou-se as seguintes equações:

$$ST = \frac{(peso_{cadinho\ com\ amostra\ antes\ de\ calcinar}) - (peso_{cadinho\ sem\ amostra})}{V_{amostra}} \quad [7]$$

$$SV = \frac{(peso_{cadinho \text{ com amostra antes de calcinar}}) - (peso_{cadinho \text{ com amostra depois de calcinar}})}{V_{amostra}} \quad [8]$$

$$SF = \frac{(peso_{cadinho \text{ com amostra depois de calcinar}}) - (peso_{cadinho \text{ sem amostra}})}{V_{amostra}} \quad [9]$$

4.5.2 Ensaio Potencial Hidrogeniônico

Toda mistura ou solução apresenta em seu meio uma determinada concentração molar de íons hidrônios H^+ (cátions) e de hidróxidos OH^- (ânions). A quantidade relativa entre esses íons nesse meio é representada pelo potencial hidrogeniônico (pH) ou potencial hidroxiliônico (pOH) e determina se ele será ácido (quando $[H^+] > [OH^-]$), básico (quando $[H^+] = [OH^-]$) ou neutro (quando $[H^+] < [OH^-]$). Essa relação é reproduzida por uma variação numérica entre 0 e 14; assim, considera-se um meio ácido se $pH > 7$, neutro se $pH = 7$ e básico se $pH < 7$.

No que concerne à biodigestão, os microrganismos envolvidos nos diversos estágios da decomposição necessitam de meios com características distintas em termos de alcalinidade e basicidade (ou seja, diferentes valores de pH) para o seu desenvolvimento ótimo e são muito sensíveis à variações bruscas dessa condição. Todavia, independentemente do processo se realizar em um ou vários estágios, o valor do pH no sistema é determinado automaticamente pelos metabólicos ácidos e alcalinos produzidos na decomposição anaeróbia. De maneira geral, a faixa ideal de trabalho referente ao pH das bactérias são (FNR, 2013):

- Hidrolíticas e acidogênicas: $5,2 < pH < 6,3$;
- Acetogênicas e metanogênicas: $6,5 < pH < 8,0$.

Conforme explica FNR (2013), ao contrário das hidrolíticas e acidogênicas, as bactérias acetogênicas e metanogênicas não conseguem transformar o substrato na presença de pH fora da faixa ideal de trabalho. Dessa forma, o afluyente inserido no biodigestor precisa possuir pH próximo à neutralidade e, por isso, ser monitorado para que não haja ineficiência ou mesmo interrupção no processo da biodigestão.

4.5.2.1 Materiais e equipamentos

- Peagâmetro TEC-3MP;
- Soluções padrão de calibração (pH 4 e pH 7);
- Bastão de vidro;
- Béqueres de 100 mL;
- Pisseta com água destilada;
- Papel toalha.

4.5.2.2 Procedimento

Para realizar a análise de pH e temperatura efetuou-se primeiramente a calibração do peagâmetro que seria utilizado com solução padrão de pH 4 e pH 7. Após a calibração, transferiu-se alíquotas de 40 mL dos frascos de amostras de dejetos para béqueres de 100 mL. Posicionou-se então o braço com o eletrodo do peagâmetro e o sensor de temperatura dentro do béquer para aferimento do potencial hidrogeniônico e temperatura. Antes de iniciar cada análise o conteúdo do béquer foi devidamente homogeneizado com o auxílio de um bastão de vidro, e após cada ensaio tanto o bastão quanto o eletrodo e a haste do sensor de temperatura foram devidamente lavados com água destilada e enxugados com papel toalha para que não houvesse contaminação entre uma amostra e outra.

4.5.3 Ensaio Alcalinidade Total

A alcalinidade total de uma solução é a medida da sua capacidade em neutralizar ácidos devido à presença de bases, de sais inorgânicos fracos e de sais ácidos voláteis e não voláteis; seu valor é dado pelo somatório das diferentes formas de alcalinidade existentes, ou mais precisamente pela concentração de íons carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) e hidróxidos (OH^-), expressa em termos de Carbonato de Cálcio (CaCO_3). A concentração desses íons ocorre em função do pH e expressa a capacidade de tamponamento do afluente ou efluente analisado. Com

isso, a alcalinidade pode existir de três formas (apenas uma de cada vez), segundo as seguintes condições (FUNASA, 2014):

- $\text{pH} > 9,4$: hidróxidos e carbonatos
- $8,3 < \text{pH} < 9,4$: carbonatos e bicarbonatos
- $4,4 < \text{pH} < 8,3$: apenas bicarbonatos

Como citado na revisão bibliográfica, o desenvolvimento apropriado do processo de biodigestão ocorre em função de variações menos bruscas de pH, e um meio mais próximo da neutralidade permite uma atuação mais eficiente dos microrganismos (principalmente no que se refere à atividade das bactérias metanogênicas). Caso haja eventualmente uma variação brusca do potencial hidrogeniônico, em situações normais o valor do pH se neutraliza pelo efeito tampão das substâncias alcalinas presentes no substrato. Todavia, o valor do pH se reduz quando a capacidade de tamponamento do sistema se esgota, o que pode ser prejudicial para a biodigestão. Deste modo, a medida de alcalinidade (ou capacidade tamponante) está diretamente relacionada com o grau de decomposição da matéria orgânica e conseqüente liberação de gás carbônico (CO_2). Diante desse fato, a análise de alcalinidade torna-se um importante fator de avaliação de eficiência da biodigestão.

4.5.3.1 Materiais e equipamentos

- Peagâmetro TEC-3MP;
- Solução padronizada de H_2SO_4 0,02N;
- Soluções padrão de calibração (pH 4 e pH 7);
- Agitador magnético;
- Barra magnética;
- Base com suporte e pinça dupla regulável;
- Bureta de 50 mL;
- Bastão de vidro;
- Béqueres de 50 mL;

- Béqueres de 600 mL;
- Pisseta com água destilada;
- Papel toalha.

4.5.3.2 Procedimento

O método utilizado para a análise de alcalinidade total foi a titulação potenciométrica. Antes de iniciar a titulação, o peagâmetro foi calibrado com solução padrão de pH 4 e pH 7. Feito isso, transferiu-se alíquotas de 200 mL dos frascos de amostras de dejetos para béqueres de 600 mL e inseriu-se então uma barra magnética dentro de cada vidraria. Seguidamente posicionou-se um dos béqueres com amostra em cima de um agitador magnético. Após isso, transferiu-se com a ajuda de um béquer 50 mL de solução H_2SO_4 0,02N para uma bureta previamente fixada e regulada em uma pinça dupla, posicionando-a adequadamente para a execução da titulação. Por fim, o braço com o eletrodo do peagâmetro e o sensor de temperatura foram inseridos dentro do béquer para aferimento do potencial hidrogeniônico e temperatura. Com isso, procedeu-se a titulação com a solução padrão até o declínio do valor do pH para 4,5. A Figura 13 ilustra o procedimento utilizado na análise de alcalinidade total.



Figura 13 - Procedimento utilizado na análise de alcalinidade total
Fonte: A autoria própria (2017)

O ensaio foi realizado em triplicata e foram anotados tanto os valores iniciais de pH e temperatura quanto o volume de H_2SO_4 0,02N gasto em cada análise. É importante ressaltar que antes de iniciar cada análise a bureta foi preenchida exatamente com 50 mL de solução padrão de ácido sulfúrico 0,02N, e o béquer o qual seria utilizado para titulação bem como o eletrodo e a haste do sensor de temperatura do peagâmetro foi devidamente limpo e seco para que não houvesse contaminação entre uma amostra e outra. Para realizar o cálculo de concentração (em g/Lde $CaCO_3$) de alcalinidade total (AT) a seguinte equação foi utilizada:

$$AT = \frac{(N_{H_2SO_4}) \cdot (V_{H_2SO_4}) \cdot (50000)}{V_{amostra}} \quad [10]$$

4.5.4 Ensaio Demanda Bioquímica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio

Na natureza, o oxigênio proveniente da atmosfera se dissolve em água naturais através de sua superfície devido à diferença de pressão parcial. Esse oxigênio que se dissolve é o principal responsável pelo metabolismo dos microrganismos aeróbios que habitam as águas naturais e é indispensável à

sobrevivência dos seres vivos, principalmente os peixes. Quando ocorre o arraste de resíduos orgânicos paralençóis freáticos e cursos d'água, o teor de oxigênio dissolvido na água reduz devido à ação de bactérias que necessitam desse oxigênio para realizar a decomposição da matéria orgânica presente no meio. Assim, do ponto de vista ambiental, o despejo de efluentes com elevado teor de carga orgânica em águas naturais é extremamente prejudicial e pode causar a morte de diversos seres vivos.

Diante disso, o impacto ambiental provocado pela introdução de despejos orgânicos em recursos hídricos pode ser analisado mediante a avaliação da demanda de oxigênio necessária para a decomposição da matéria orgânica naquele meio. Nesse caso, para caracterizar a qualidade dos efluentes utilizam-se dois parâmetros de análise: demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO).

A DBO é definida como a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica biodegradável (estabilizar bioquimicamente um composto orgânico) presente na água, mediante a ação de microrganismos em condições anaeróbias. A DQO representa a quantidade de oxigênio exigida para oxidar (degradar) quimicamente a matéria oxidável orgânica e inorgânica total de um efluente (FERNANDES *et al.*, 2014). Basicamente, a diferença entre esses dois parâmetros refere-se à forma com que a degradação da matéria ocorre: enquanto a DBO corresponde a oxidação de matéria orgânica realizada por microrganismos, a DQO representa a oxidação de matéria orgânica e inorgânica por meio de reações químicas.

À vista disso, se a quantidade de matéria orgânica em águas naturais é baixa, as bactérias decompositoras necessitarão de uma pequena quantidade de oxigênio para decompô-la, e conseqüentemente o valor da DBO será baixo. Todavia, quando essa água apresenta substâncias tóxicas para as bactérias decompositoras, a única maneira de determinar a carga orgânica é pela análise da DQO, uma vez que a DBO não pode ser utilizada devido à morte das bactérias que decompõem o substrato orgânico (PEREIRA, 2004).

Como o processo de biodigestão realiza o tratamento do efluente mediante a redução da matéria orgânica pela ação microbiológica anaeróbia, a realização das análises de DBO e DQO são parâmetros importantes para caracterizar a eficiência

do sistema desenvolvido na remoção da carga orgânica da biomassa e consequente transformação em biofertilizante.

4.5.4.1 Materiais

- Espectrofotômetro Pastel UV SECOMAM;
- Célula de quartzo;
- Balança analítica CHYO NS JK-180;
- Balão volumétrico de 500 mL;
- Béquer de 50 mL;
- Pipetas Pasteur descartáveis de 5 mL;
- Micropipeta;
- Ponteiras descartáveis de 1000 µL;
- Pisseta com água destilada.

4.5.4.2 Procedimento

As metodologias mais usuais para análise de DBO e DQO e que estão descritas no SMEWW (2012) pela APHA, AWWA e WEF são:

- DBO: método de azida sódica (Winkler) ou método respirométrico (Oxitop);
- DQO: método titulométrico com refluxo aberto ou no método colorimétrico com refluxo fechado.

Devido às restritas condições de aplicação dos métodos usuais, da disponibilidade dos equipamentos destinados às análises e dos altos teores de DBO e DQO esperados, empregou-se para a obtenção dos resultados a metodologia de espectrofotometria com faixa ultravioleta visível. O equipamento utilizado para tal fim foi o Espectrofotômetro PASTEL-UV da empresa SECOMAM®. Conforme verifica-se nos trabalhos de Oliveira e Madeira (2014) e de Kolakovic *et al.* (2013), a metodologia já foi utilizada em estudos nacionais e internacionais de análises de

água, e, segundo os autores, apresentou resultados coerentes e conclusivos. A Figura 14 mostra o equipamento utilizado nas análises em questão.



Figura 14 - Espectrofotômetro Pastel UV SECOMAM®
Fonte: A autoria própria (2017)

Para realizar a análise de DBO e DQO no espectrofotômetro, realizou-se primeiramente a diluição da amostra na proporção em volume de 1:500, para que o resultado correspondesse à faixa de leitura do equipamento. Para tanto, retirou-se uma alíquota da amostra do frasco de dejetos mediante o uso de uma pipeta Pasteur, e em seguida pesou-se 1 grama dessa amostra em um béquer previamente calibrado na balança analítica. Em seguida, o béquer foi preenchido e lavado com água, e seu conteúdo foi transferido para o balão volumétrico; esse procedimento foi feito sucessivas vezes até que o balão completasse 500 mL. Concluída a diluição, o balão foi homogeneizado e uma alíquota de 1 mL foi retirada com o uso de uma micropipeta com ponteira descartável e posteriormente transferida para uma célula de quartzo, a qual foi então introduzida no espectrofotômetro. O equipamento foi então ligado e automaticamente o mesmo realizou a leitura simultânea de seis parâmetros, dos quais dois foram anotados (DBO e DQO, em g de O₂/L). Ressalta-se que, durante cada análise, utilizou-se para coleta uma nova pipeta Pasteur e para transferência de amostra uma nova ponteira; além disso, as amostras dos frascos e dos balões foram devidamente homogeneizadas e a célula de quartzo foi previamente limpa mediante uso de pisseta com água destilada.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após finalizada a montagem do sistema de produção e tratamento do biogás e do sistema de controle de temperatura, a amostra de dejetos foi coletada e inserida no biodigestor (posteriormente lacrado e vedado), e no mesmo dia a placa Arduino bem como a resistência foram ligados nas respectivas fontes de alimentação. Assim, a partir do sistema experimental devidamente instalado, teve início, no dia 05 de maio de 2017, o processo da biodigestão. As avaliações acerca dos resultados obtidos são apresentadas nos tópicos 5.1 e 5.2.

5.1 SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E CONTROLE DE TEMPERATURA

Para verificar se processo da biodigestão estava ocorrendo de forma adequada monitorou-se diariamente as instalações e equipamentos do sistema. Assim, foram realizadas inspeções rotineiras nas tubulações, conexões e fiações, para assegurar que não houvessem vazamentos de biogás e garantir que o controle de temperatura estivesse sempre ligado e funcionando corretamente.

A partir dessas inspeções diárias foram detectados, em datas distintas, três desvios nas instalações do sistema: um mau contato da fiação da placa Arduino com a *Protoboard* (09 de junho) e dois pontos de vazamentos, um no gasômetro e um no biodigestor (19 e 23 de junho). Ao verificar tais circunstâncias, restabeleceu-se seguidamente a condição adequada do sistema, reconectando os fios com contato deficiente e sanando os vazamentos no mesmo momento que tais desvios foram encontrados. Além disso, foi possível observar detalhadamente o comportamento do sistema de controle de temperatura. O *set-point* foi ajustado para 35°C, e mediante as observações diárias constatou-se que o sistema manteve o controle de temperatura variando em uma faixa de $\pm 2^\circ\text{C}$; averigou-se também que as variações não ocorriam bruscamente e apenas quando a resistência ligava ou desligava para ajustar a temperatura. Tal fator teve um resultado positivo sobre a biodigestão, pois a estabilidade do processo depende muito mais da constância da temperatura do que o seu valor absoluto em si (FNR, 2013). Verificou-se, ainda, que a interatividade

do sistema facilitou o monitoramento relativo ao seu funcionamento; a leitura de temperatura no LCD e a constatação se a resistência estava ligada ou desligada mediante a indicação no visor e das luzes de LED permitiram que houvesse uma interpretação simples sobre a atuação do sistema no controle de temperatura. A Figura 15 representa o sistema eletrônico do presente trabalho em pleno funcionamento durante a biodigestão.

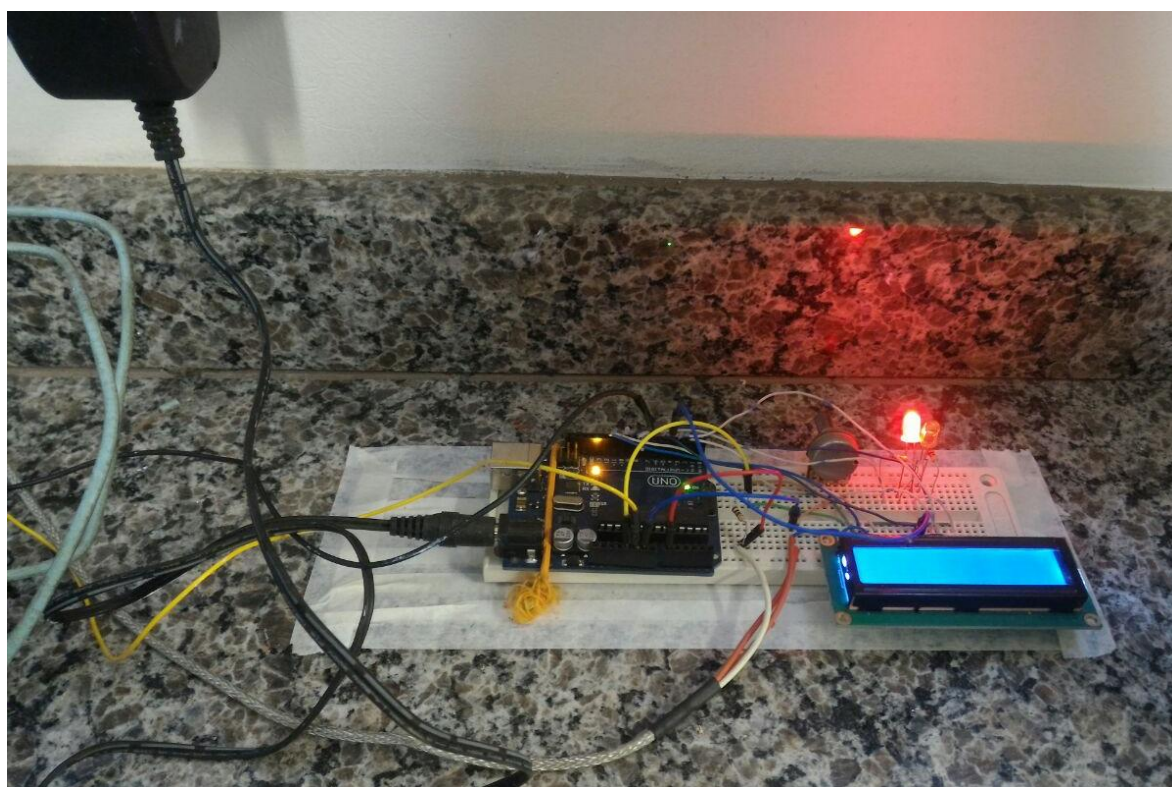


Figura 15 - Sistema eletrônico de controle de temperatura do biodigestor
Fonte: Autoria própria (2017)

Junto com a supervisão rotineira das instalações e equipamentos, realizou-se também a leitura visual do rotâmetro para que fosse possível quantificar a produção diária de biogás. Como citado na metodologia desse trabalho, o rotâmetro era responsável por medir a vazão do biogás (em m^3/h) e, com base na diferença de vazões entre em um dia e outro, foi possível calcular a quantidade de biogás produzido a cada 24 horas. A leitura foi feita até que o processo de biodigestão fosse finalizado, isto é, até que o tempo de retenção hidráulica de 35 dias fosse completado. A Figura 16 mostra o rotâmetro o qual foi utilizado para medição da vazão do biogás produzido.



**Figura 16 - Rotâmetro utilizado para medição de vazão do biogás do sistema experimental
Fonte: Autoria Própria (2017)**

Conforme o biogás foi sendo produzido, o mesmo passava pelo rotâmetro e escoava até o gasômetro, onde ficou armazenado até o final da biodigestão. Finalizada a biodigestão, o biogás foi utilizado para realização de pré-testes de purificação a partir do mesmo sistema (ver tópico 4.1) e posteriormente foi lançado na atmosfera. Por se tratar de uma quantidade irrisória de biogás, a sua emissão para a atmosfera não causou prejuízos ambientais. A Figura 17 expõe o gasômetro parcialmente cheio com o biogás produzido durante a biodigestão.



Figura 17 - Gasômetro utilizado para o armazenamento do biogás produzido
Fonte: Autoria própria (2017)

Com base nos aferimentos diários foi possível plotar um gráfico com os resultados de produção de biogás ao longo do processo da biodigestão. O gráfico 1 expressa visualmente essa produção acumulada e é demonstrado a seguir:

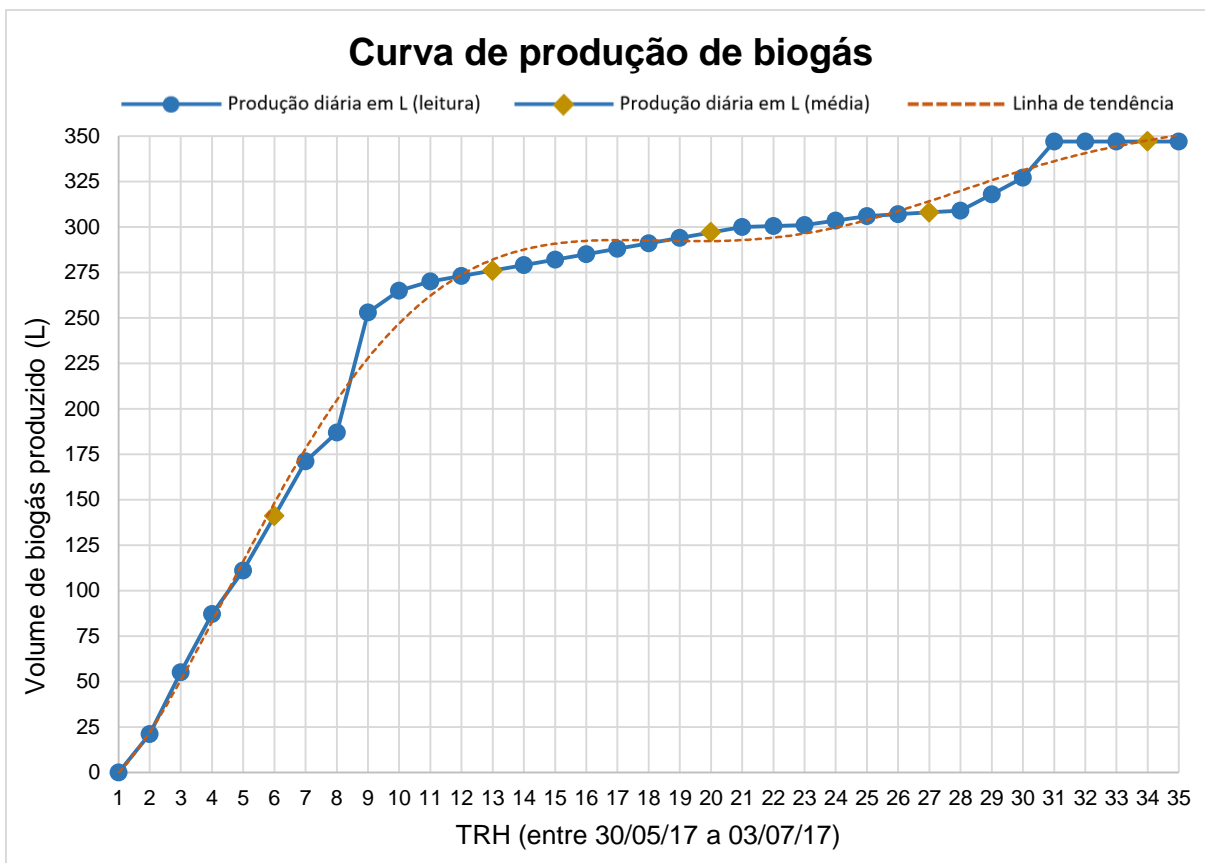


Gráfico 1 - Curva de produção acumulada de biogás ao longo do processo da biodigestão
Fonte: Autoria própria (2017)

No gráfico acima é possível identificar que existem dois pontos distintos que ilustram a produção acumulada de biogás: base leitura (marcação azul) e base média (marcação amarela). As marcações azuis representam a leitura baseada na indicação do rotâmetro (produção real) e as marcações amarelas representam a média de produção entre o dia anterior e posterior daquele período específico (produção calculada); a produção de biogás precisou ser calculada nesses determinados dias pois foram os períodos os quais não foi possível realizar o aferimento no rotâmetro.

Com base no gráfico 1 observa-se que houve uma produção relativamente constante de biogás durante todo o processo de biodigestão. Até o 10º dia o rendimento de biogás ultrapassou o volume de 10 litros a cada 24 horas, e a partir desse dia esse rendimento foi reduzindo até se tornar quase constante, com um pequeno pico de produção do 30º para o 31º dia. A partir do 31º dia a produção de biogás cessou, constatando-se que foi gerado um volume total de 347 litros da mistura gasosa ao longo do processo digestivo.

Segundo FNR (2013), a disponibilidade de nutrientes é essencial para a sobrevivência dos microrganismos da biodigestão e a proporção adequada entre macro e micronutrientes é um pré-requisito para a estabilidade do processo. O autor afirma que a disponibilidade de nutrientes para os microrganismos deve ser mantida em níveis ótimos. Diante disso, é justificável que o volume de biogás gerado diariamente tenha diminuído após um certo período de tempo. O biodigestor do presente estudo foi alimentado em batelada, e devido à uma concentração maior de nutrientes no início da biodigestão, naturalmente houve no princípio uma geração maior de biogás. Então, os nutrientes existentes no substrato foram sendo continuamente consumidos pelos microrganismos ao longo da biodigestão, até que presumivelmente a disponibilidade de determinados elementos nutritivos era tão baixa ou nula que inibiu a atividade das bactérias, o que por sua vez acarretou na interrupção do processo digestivo.

De acordo com Metcalf e Eddy (2003), os microrganismos envolvidos na degradação da matéria orgânica são classificados segundo a faixa de temperatura a qual eles atuam, conforme é demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Classificação dos microrganismos da biodigestão segundo os intervalos de atuação

Tipo de microrganismos	Intervalo normal	Intervalo ótimo
Psicrofílicos	< 20°C	12°C a 18°C
Mesofílicos	≥ 20°C e ≤ 45°C	25°C a 40°C
Termofílicos	> 45°C	55°C a 65°C

Fonte: Metcalf e Eddy (2003)

Gusmão (2008) e FNR (2013) afirmam que a temperatura é um dos fatores mais influentes no processo da biodigestão. No intervalo mesófilo (25°C a 40°C), há um crescimento gradual da velocidade de degradação da matéria orgânica e, dentro dessa faixa, o valor mais favorável ao crescimento dos microrganismos anaeróbios é de 35°C. Diante disso, constata-se que a estabilidade da temperatura proporcionada pelo sistema de controle eletrônico do presente estudo (que apresentou variações amenas de ±2°C) foi um fator determinante para uma produção relativamente constante de biogás. Durante todo o processo digestivo, houve apenas um pico irregular de produção, que pode ser associado ao mau contato da fiação do

sistema eletrônico constatado no dia 09 de junho (ver tópico 5.1), o qual possivelmente causou uma falha no controle e por consequência elevou a temperatura da biomassa durante um determinado intervalo de tempo. Então, com a biomassa e, portanto, com a biodigestão ocorrendo a partir de uma temperatura mais elevada, o processo da decomposição acelerou e em decorrência disso houve uma produção mais impulsionada de biogás.

Ante à isso, essa falha pontual do sistema de controle de temperatura pode ser considerada um distúrbio ocorrido no processo, pois a variação súbita do parâmetro caracteriza-se como um fator negativo sobre o processo da biodigestão. A maioria dos microrganismos metanogênicos são extremamente sensíveis à alterações bruscas do meio, principalmente pH e temperatura, e quando ocorrem oscilações repentinas no meio, a atividade digestiva dessas bactérias é prejudicada e torna-se ineficiente. Ao acontecer isso, a concentração de hidrogênio no meio se eleva e impede a conversão dos compostos intermediários da acidogênese, que por sua vez ocasiona o acúmulo gradativo de ácidos graxos os quais inibem a ocorrência metanogênese. Assim, com a inibição das bactérias metanogênicas, a proporção de metano no biogás gerado durante a biodigestão diminui. Como o metano caracteriza-se como a parte combustível do biogás, a redução de seu teor diminui consideravelmente o poder calorífico da mistura gasosa (FNR, 2013).

Souza e Campos (2007) avaliaram a biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos a partir de biodigestores abastecidos com 10 litros de substrato (composto de 15% de inóculo de biofertilizante de estrume de bovino) e submetidos a diferentes períodos de biodigestão, temperaturas de operação e níveis de agitação. O autor verificou que, com base no tempo de retenção hidráulica, ao comparar produção de biogás com quantidade biomassa adicionada, o melhor desempenho foi adquirido em operações sem agitação de biomassa, com TRH de 30 dias e temperaturas de 35°C, cuja média de produção diária de biogás por massa de substrato seco foi 0,136 m³/kg. No corrente estudo verificou-se que, com base na diluição da biomassa estimada em 1/1 de água/dejeto, essa média foi de 0,01157 m³/kg (base seca). Esse valor relativamente reduzido está intimamente ligado ao fato de não ter havido adição de inóculo na biomassa durante a fase de partida e a suposta disponibilidade reduzida de nutrientes na biomassa ao longo da biodigestão.

Queiroz (2003) declara que a partida é determinada como o início do processo de inoculação dos microrganismos no biodigestor, em que eles se adaptam preliminarmente ao resíduo em suas condições de vazão e carga orgânica. Diante disso, é possível antecipar o início da biodigestão (fase de partida) mediante a adição de um inóculo no começo do processo digestivo. Isso antecipa o pico de produção de biogás e aumenta o potencial efetivo da biomassa. FNR (2013) menciona que a adição de esterco líquido na biomassa como inóculo tem um efeito positivo sobre o processo de partida, devido à abundância de micronutrientes e pela elevada quantidade de populações de bactérias diferentes. Dentre os esterco líquidos, o de categoria bovina destaca-se por possuir bactérias arqueas metanogênicas em quantidade suficiente para estabilizar naturalmente processo da biodigestão. Assim, é possível afirmar que a adição de um inóculo no início do processo da biodigestão teria aumentado consideravelmente o desempenho do sistema na geração de biogás.

Para avaliar com maior precisão o comportamento do processo da biodigestão baseado na produção diária de biogás seria necessário realizar periodicamente análises qualitativas e quantitativas tanto do biogás quanto da biomassa. Diante da caracterização da mistura gasosa e do substrato em períodos específicos da biodigestão seria possível então avaliar a influência de cada fator no processo digestivo. Todavia, para atingir os objetivos desse trabalho, fez-se necessário apenas o desenvolvimento do sistema de biodigestão e a realização de determinadas análises-físico-químicas da biomassa. Os sistemas de produção de biogás e controle de temperatura desenvolvidos e os resultados obtidos referente à eles já foram apresentados no tópico 5.1. A seguir é apresentada uma avaliação acerca dos resultados obtidos nas análises físico-químicas da biomassa e a influência dos parâmetros explorados no processo a biodigestão.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS

Como referido na metodologia, as análises físico-químicas de afluente e efluente foram realizadas em triplicada entre os meses de maio e agosto de 2017. A

Tabela 11 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais efetuados em laboratório.

Tabela 11 - Resultados obtidos das análises físico-químicas de afluente e efluente

Amostra		ST (g/L)	SV (g/L)	SF (g/L)	pH (20°C)	AT (g/L CaCO ₃)	DBO (g O ₂ /L)	DQO (g O ₂ /L)
Afluente (Biomassa)	1	253,08	230,90	22,18	7,39	2,44	10,70	32,00
	2	380,28	355,53	24,75	6,29	2,77	11,00	33,50
	3	345,78	318,60	27,18	6,30	2,61	11,30	35,50
	Média	326,38	301,68	24,70	6,66	2,60	11,00	33,67
Efluente (Biofertilizante)	1	82,51	46,82	35,69	8,04	2,29	2,90	6,40
	2	121,27	86,25	35,02	8,01	2,88	2,95	6,45
	3	175,59	136,50	39,09	8,00	2,65	2,80	6,15
	Média	126,46	89,96	36,60	8,02	2,61	2,88	6,33

Fonte: Autoria própria (2017)

Com base na Tabela 11, foi possível caracterizar a biomassa utilizada no processo da biodigestão e avaliar a eficiência do sistema desenvolvido no tratamento de efluentes. A discussão relacionada à essas questões é apresentada nos tópicos que se seguem.

5.2.1 Sólidos Totais, Sólidos Voláteis e Sólidos Fixos

De acordo com a Tabela 11, observa-se que o teor de sólidos totais e voláteis nas amostras reduziu, ao passo que a concentração de sólidos fixos (cinzas) aumentou. Conforme APHA, AWWA e WEF citam em SMEWW (2012), os sólidos totais são a soma de sólidos voláteis e fixos; diante disso, verifica-se então que a redução da fração de sólidos totais ocorreu devido à diminuição da concentração de sólidos voláteis nos dejetos. Além disso, é bem provável que o teor de cinzas tenha aumentado devido ao acréscimo da concentração desse componente na biomassa ao longo da biodigestão, pois a quantidade de carga orgânica diminuiu expressivamente e a quantidade de água permaneceu a mesma durante o processo digestivo.

Quando avalia-se a biodigestão, constata-se que os sólidos voláteis (ou seja, a fração orgânica) presentes na biomassa constituem-se como os principais

componentes do meio que serão utilizados pelos microrganismos para converter o substrato em biogás (ORRICO JÚNIOR *et al.*, 2011). Com isso, o teor de sólidos voláteis (e conseqüentemente o teor de sólidos totais) no afluente e a eficiência de redução da concentração desses elementos durante o processo digestivo, aliada à conseqüente conversão em subprodutos, está diretamente relacionada ao desempenho do sistema de biodigestão no tratamento de efluentes (produção de biofertilizante) e geração de biogás.

Assim, para avaliar de maneira mais precisa o desempenho do processo da biodigestão, calculou-se com base nos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais os teores de umidade, sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos na amostra e a eficiência de remoção desses compostos a partir de sua inserção no sistema de tratamento de efluentes; os valores obtidos são apresentados na Tabela 12 e posteriormente no texto que se segue.

Tabela 12 - Teores de umidade, sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos das amostras de afluente e efluente

Amostra		Teor Umidade (%)	Teor ST (%)	Teor SV (%)	Teor SF (%)
Afluente (Biomassa)	1	69,31	30,69	28,00	2,69
	2	58,24	41,76	39,04	2,72
	3	63,78	36,22	33,38	2,85
	Média	63,78	36,22	33,47	2,75
Efluente (Biofertilizante)	1	89,02	10,98	6,23	4,75
	2	86,25	13,75	9,78	3,97
	3	81,45	18,55	14,42	4,13
	Média	85,57	14,43	10,14	4,28

Fonte: Autoria própria (2017)

Segundo os resultados apresentados na Tabela 12, houve uma redução no teor de sólidos totais e um aumento no teor de umidade dos dejetos. Como citado anteriormente neste tópico, a diminuição do teor de sólidos totais está diretamente relacionada à decomposição da fração orgânica (consumo de sólidos voláteis) durante a biodigestão, e tal fato é corroborado diante dos dados da Tabela supramencionada. O teor de sólidos fixos teve um aumento brando após a biodigestão, cuja diferença percentual pode ser considerada irrisória devido ao pequeno valor apresentado. Em relação ao teor de umidade, é possível afirmar que

a concentração de água aumentou apenas em decorrência da diminuição da concentração de sólidos voláteis, uma vez que a quantidade de água no substrato é praticamente a mesma durante a biodigestão. Além dos resultados das Tabelas 4 e 5, verifica-se que, com base nos resultados das análises de laboratório, o sistema desenvolvido obteve uma eficiência de remoção de sólidos totais de 61,25% e sólidos voláteis de 70,21%.

De acordo com a EMBRAPA (2017), o conteúdo de umidade dos dejetos dos animais determina de forma parcial a melhor maneira dele ser manejado, tratado e armazenado. Assim, ele é classificado sob três formas distintas de acordo com sua consistência básica: sólido (16% ou mais de ST), semi-sólido (12% a 16% de ST) e líquido (12% ou menos de ST). Diante disso, referente aos dejetos utilizados nesse trabalho, é possível classificar as amostras de afluente como sólida e a de efluente como semi-sólida.

Com base nessa classificação, Poulsen (2003) determina que o processo de biodigestão é otimizado quando a biomassa inserida no sistema possui um teor de umidade na faixa entre 75% e 97%, com uma faixa ideal entre 88% e 97% (isto é, os dejetos que alimentam o biodigestor devem ser líquidos). O autor declara ainda que é importante que o teor de sólidos totais se mantenha razoavelmente constante durante todo o processo digestivo para que a produção de biogás não seja comprometida devido à uma produção excessiva de ácidos orgânicos. Baseado nessas afirmações e nas Tabelas 11 e 12, averigua-se que apesar de ter havido uma remoção eficiente de sólidos voláteis do substrato e um efetivo aproveitamento energético da matéria orgânica, a geração de biogás poderia ser otimizada se a diluição de água nos dejetos fosse maior e se houvesse um controle adequado de concentração de sólidos voláteis na biomassa durante o processo de biodigestão diante de, por exemplo, um sistema de alimentação semi-contínuo.

De acordo com estudos de diversos autores (RODRIGUES *et al.*, 2009; VIVAN *et al.*, 2010; AIRES *et al.*, 2014; VELOSO, 2014; CREMONEZ *et al.*, 2015), verifica-se que existe uma grande variação de resultados referente às concentrações de sólidos totais, voláteis e fixos de dejetos suínos utilizados em sistemas de tratamentos de efluentes a partir da biodigestão. Isso ocorre pois a eficiência do processo da biodigestão na geração de biogás e biofertilizante está relacionada à natureza física e química do substrato, da carga orgânica aplicada e do tempo de

retenção de sólidos (LUNA *et al.*, 2009), e esses fatores são muitas vezes singulares e próprios da origem da biomassa e de cada sistema de biodigestão.

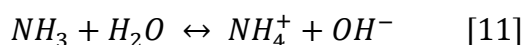
Todavia, mesmo diante desse panorama, certifica-se que os resultados obtidos segundo o objeto de estudo foram satisfatórios quando comparados à literatura. Ao confrontar os resultados adquiridos nesse trabalho com estudos de eficiência de remoção de carga orgânica em plantas de manejo e tratamento de resíduos da suinocultura a partir de estruturas relativamente mais completas em termos estruturais, como àquelas apresentadas por Veloso (2014) e Rodrigues *et al.* (2009), evidencia-se que o sistema desenvolvido para a presente pesquisa foi eficiente em termos de redução de matéria orgânica do substrato. Veloso (2014) obteve, a partir de um sistema de tratamento de dejetos suínos constituído de um tanque de equalização, dois biodigestores tubulares e uma lagoa de estabilização, resultados de eficiências globais de remoção de ST e SV de 76,21% e 61,35%, respectivamente. De maneira similar, Rodrigues *et al.* (2009) utilizou um decantador seguido de um reator anaeróbio de manta de lodo para realizar o tratamento de águas residuárias da suinocultura e obteve eficiências globais de remoção de ST de 88,00% e de SV de 85,00%. Diante desses resultados, reitera-se que o sistema desenvolvido para o presente estudo foi eficiente na remoção de carga orgânica do substrato (61,25% de ST e 70,21% de SV). Avalia-se, ainda, que o percentual de remoção de sólidos totais não foi mais elevado que o alcançado pois o teor de sólidos fixos manteve-se praticamente constante durante a biodigestão.

5.2.2 Potencial Hidrogeniônico e Alcalinidade Total

Conforme observa-se na Tabela 11, o pH do substrato subiu de 6,66 para 8,02 após a biodigestão. Segundo Quadros *et al.* (2010), a faixa recomendada de pH para operação em biodigestores é entre 6,0 e 8,0, cujo ponto ideal é 7,0 (neutro). Diante disso, verifica-se que o valor do potencial hidrogeniônico do substrato manteve-se dentro da faixa recomendada pela literatura.

Todavia, apesar do pH no final do processo digestivo estar na faixa recomendada de operação, seu valor próximo de 8,0 pode ter causado um efeito inibitório na decomposição da biomassa. Quando ocorre, a inibição da produção de

gás ou do processo pode ser provocada tanto por motivos de cunho técnico e operacional quanto pela ação de substâncias inibidoras que podem ser advindas durante a adição do substrato no biodigestor ou originadas como compostos intermediários em estágios da biodigestão. Dentre os compostos inibidores formados durante o processo digestivo, a amônia livre não iônica, proveniente da conversão do nitrogênio (N) contido na matéria orgânica durante a decomposição, insurge como uma substância química que tem um efeito prejudicial para a biodigestão mesmo em concentrações reduzidas. A amônia livre (NH_3) dissocia-se em água (H_2O) e forma íons amônio (NH_4^+) e hidroxila (OH^-), e vice-versa, segundo mostra a equação 11 (FNR, 2013):



Conforme verifica-se na equação 11, a amônia livre encontra-se em equilíbrio com a concentração de amônio. Quando a concentração de íons OH^- se eleva, o pH do meio torna-se muito alcalino e o equilíbrio tende a deslocar-se para esquerda, o que acarreta no aumento de concentração de amônia. Frente à isso, FNR (2013) afirma que, diante de uma elevação de pH no meio de 6,5 para 8,0, a concentração de NH_3 pode aumentar em até trinta vezes. Como consequência, a metanogênese é interrompida por causa do excesso de amônia e a produção de biogás é inibida devido ao colapso de toda a população de microrganismos. Assim, é possível afirmar que, aliado à falta de nutrientes, a interrupção do processo digestivo referente à esse trabalho no 31º dia de biodigestão (ver gráfico 1) pode ter ocorrido também em virtude de uma elevada concentração de amônia no meio, uma vez que o pH do efluente apresentou valores iguais ou ligeiramente maiores que 8,0. Ressalta-se ainda que, em decorrência desse fator inibitório, efluentes com pH maiores que 8,0 normalmente são oriundos de sistemas de pós-tratamento de resíduos, como lagoas de estabilização e maturação (VELOSO, 2014; VIVAN *et al.*, 2010).

De acordo Veloso (2014) e FNR (2013), os processos biológicos são em sua maioria regidos pelo valor de pH do meio. No caso da biodigestão, o valor de pH controla o equilíbrio de dissociação de importantes produtos metabólicos como ácidos orgânicos, sulfeto de hidrogênio e amônia e, por isso, o seu valor está

diretamente relacionado às concentrações desses produtos no meio. Portanto, o monitoramento do pH constitui um importante parâmetro para a obtenção de um processo digestivo eficiente e, assim, deve-se buscar valores de operação considerados ideais, no objetivo de proporcionar o desenvolvimento adequado dos microrganismos de todas as etapas da biodigestão.

Perante isso, ao avaliar o processo da biodigestão, verifica-se que o intervalo de trabalho de pH dos microrganismos da metanogênese é estreito e que as bactérias metanogênicas são mais sensíveis à distúrbios em virtude de sua baixa taxa de crescimento. Por isso, as condições do meio precisam ser adaptadas às suas necessidades, isto é, o pH do substrato precisa estar em sua faixa ideal de trabalho (entre 6,5 e 8,0). A partir dessa indicação, constata-se que, apesar de eventualmente o efluente ter ocasionado uma formação indesejada de amônia em decorrência de suas características alcalinas, o pH do meio do sistema desenvolvido apresentou valores que permitiram a ação das bactérias metanogênicas, responsáveis pela formação do metano e do gás carbônico.

É importante enfatizar que a quantificação dos valores de pH é importante para uma análise preliminar de processos biológicos, porém a avaliação das concentrações de alcalinidade total permite uma apreciação mais consistente do comportamento do sistema (LUNA *et al.*, 2009). Em biodigestores anaeróbios, a investigação sistemática da alcalinidade total pode ser considerada mais importante do que a avaliação do potencial hidrogeniônico, pois os valores do pH variam em escala logarítmica e pequenas variações em seus valores podem revelar grandes alterações de concentrações de alcalinidade (PEREIRA *et al.*, 2010).

Conforme citado no tópico 4.5.3, a concentração expressa pela alcalinidade total exprime a capacidade de tamponamento do sistema, isto é, a capacidade de manter o pH em uma determinada faixa de trabalho. Assim, em diversos processos, inclusive os biológicos, a capacidade de tamponamento do meio garante a estabilidade do valor do pH. No caso da biodigestão, apesar das bactérias fermentativas produzirem ácidos orgânicos e compostos intermediários que acarretam no abaixamento do potencial hidrogeniônico durante as etapas de hidrólise e acidogênese, o bom tamponamento do meio e a atividade de degradação permitem a manutenção do pH dentro da faixa ideal de trabalho (próximo à neutralidade). Todavia, se a capacidade de tamponamento se esgota, o meio torna-se ácido devido

à elevação da fração não dissociada de ácidos orgânicos (FNR, 2013; VELOSO, 2014).

Como nota-se na Tabela 11, os valores de alcalinidade total do substrato proveniente dessa pesquisa tiveram um pequeno aumento durante a biodigestão, em que o afluente apresentou uma concentração média de 2,60 g/L de CaCO_3 e o efluente 2,61 g/L de CaCO_3 . Ao avaliar esses resultados juntamente com os valores de pH, evidencia-se que o valor praticamente constante de alcalinidade total indica um bom tamponamento do sistema e conseqüentemente uma estabilidade no processo. Além disso, o aumento no valor do pH de 6,6 para 8,0 corrobora com os valores de alcalinidade e aponta um consumo equilibrado e constante de ácidos orgânicos. Outrossim, embora a proporção de água na biomassa não tenha sido propícia para uma maior geração de biogás (ver tópico 5.2.1), evidencia-se que a sua concentração pode ter sido adequada para manter a estabilidade da neutralidade do meio, uma vez que a capacidade de tamponamento do meio decresce com o aumento da diluição (RODRIGUES *et al.*, 2009; FNR., 2013; VELOSO, 2014).

5.2.3 Demanda Bioquímica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio

A partir do processo de biodigestão intercorrido a partir do sistema desenvolvido e, de acordo com os dados apresentados na Tabela 11, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) reduziu de 11,00 g/L para 2,88 g/L, e a demanda química de oxigênio (DQO) reduziu de 33,67 g/L para 6,33 g/L. Isso significa uma eficiência de remoção de carga orgânica de 73,82% e 81,20% para DBO e DQO, respectivamente. Para os parâmetros de DBO e DQO, constata-se que os resultados obtidos estão em consonância com aqueles obtidos por diversos outros autores (LUNA *et al.*, 2009; ORRICO *et al.*, 2009; QUADROS *et al.*, 2010; RODRIGUES *et al.*, 2009; FERNANDES *et al.*, 2014; VELOSO, 2014; CREMONEZ *et al.*, 2015). Diante disso, a eficiência do sistema de tratamento de resíduos em controlar a poluição gerada pelas unidades de produção de suínos é comprovada quando o desempenho de remoção de poluentes orgânicos é alto, fator o qual é exibido pelos valores de DBO e DQO (da SILVA *et al.*, 2012).

Apesar de caracterizar a degradabilidade de um composto orgânico mediante a ação microbiológica e de ser um importante parâmetro na determinação do grau de poluição de sistemas aquáticos, a DBO constitui um parâmetro cuja medida é muitas vezes incompleta, pois os seus resultados não consideram a atividade de microrganismos anaeróbios. Em contrapartida, a medida de DQO possibilita a quantificação do oxigênio necessário para degradação da matéria orgânica e inorgânica, e os seus valores permitem uma avaliação precisa da eficiência de tratamentos de resíduos por processos aeróbios e anaeróbios. Devido à essas características, a DQO é muito útil para detectar a presença de substâncias resistentes à degradação biológica e seus valores normalmente são maiores que a DBO (BRAGA *et al.*, 2012).

Como os parâmetros de DQO e DBO indicam a tratabilidade de substâncias biodegradáveis e recalcitrantes de materiais orgânicos, observa-se que a relação DQO/DBO expressa informações importantes para indicar qual tipo de oxidação será mais efetiva para a degradação da carga orgânica de determinados resíduos. Segundo Braga *et al.* (2012), para um determinado afluente, verifica-se que:

- $DQO/DBO < 2,5$ → efluente facilmente biodegradável;
- $2,5 \leq DQO/DBO < 5,0$ → efluente tem exigências maiores para remoção eficiente de carga orgânica via processos biológicos;
- $DQO/DBO > 5,0$ → tratamento do efluente por meios biológicos é ineficiente, e por isso deve-se utilizar meio de oxidação química para remoção da carga orgânica.

Os resultados obtidos com o tratamento de resíduos a partir do sistema desenvolvido mostram que a relação DQO/DBO no processo digestivo decaiu de 3,06 no afluente para 2,20 no efluente. Ao relacionar esses valores com as afirmações de Braga *et al.* (2012), verifica-se que a biomassa apresentava inicialmente características que permitiam a sua tratabilidade por meios biológicos, desde que o processo utilizado fosse eficiente para remoção da carga orgânica do meio. Contudo, ainda, após a biodigestão a relação DQO/DBO diminuiu e apresentou valores menores que 2,5, o que demonstra que substâncias mais resistentes foram degradadas biologicamente e que o efluente se tornou mais

biodegradável ao longo do processo digestivo. Diante dessa averiguação, corroborada pelos valores de eficiência de remoção de DBO e DQO (73,82% e 81,20%, respectivamente), é possível afirmar que a realização do tratamento de dejetos mediante a aplicação do sistema proposto foi muito eficiente para realizar a remoção da carga orgânica presente no substrato. Essa examinação pode ser ratificada, inclusive, ao verificar visualmente as amostras de afluente e efluente coletadas durante o processo da biodigestão, conforme mostra a Figura 18:



Figura 18 - Biomassa e biofertilizante (da esquerda para direita) oriundos do sistema de produção de biogás e tratamento de efluentes
Fonte: Autoria própria (2017)

Com base na Figura 19 e nos resultados adquiridos, fica nítida a remoção da carga orgânica do substrato. Araújo *et al.* (2011) afirmam que, apesar da decomposição da matéria orgânica em ambientes anaeróbios ocorrer de forma mais lenta quando comparada com processos de tratamento aeróbios, a sua eficiência, indicada diretamente pelos parâmetros de DBO e DQO, é comprovadamente maior. Assim, quando trata-se da biodigestão, a degradação do substrato traduz a eficiência de seu aproveitamento para a ocorrência do processo digestivo. Fundamento nisso, os resultados obtidos a partir do projeto desenvolvido demonstram uma elevada eficiência de remoção DBO e DQO, que por sua vez revelaram uma eficiente taxa de degradação e uma ótima performance do sistema.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos mediante a elaboração do modelo experimental de produção de biogás e controle automático de temperatura, constata-se que o desenvolvimento, montagem e operação do sistema implementado é, de modo geral, simples e eficiente. O sistema apresentou interatividade com o usuário, o que permitiu o seu manuseio e o aferimento dos parâmetros de forma acessível e descomplicada. Averigua-se, ainda, que as duas falhas estruturais detectadas (vazamento de biogás e mau contato de fiação da Arduino) poderiam ser facilmente evitadas com a aplicação de uma vedação mais adequada das conexões das tubulações e uma simples soldagem dos fios na placa *Protoboard*.

No que tange à biodigestão, nota-se que a boa performance do sistema permitiu que o processo digestivo ocorresse de forma estável. A alcalinidade do meio manteve-se praticamente constante durante o processo digestivo, ao passo que o valor do pH subiu de 6,6 para 8,0. Isso demonstra que, por via de reações de dissociação, houve uma neutralização equilibrada dos ácidos orgânicos e compostos intermediários da biodigestão. Esse fator manteve o meio próximo à faixa neutra de trabalho e permitiu o bom funcionamento das atividades das bactérias metanogênicas, as quais possivelmente possibilitaram (mediante uma produção mais elevada de metano) a geração de um biogás com maior poder calorífico.

Além disso, segundo os resultados dos ensaios laboratoriais, a eficiência de remoção de sólidos totais foi de 61,25% e dos sólidos voláteis foi de 70,21%, o que expressa uma eliminação significativa de matéria orgânica do substrato. Aliado a isso, a redução de DBO e DQO de, respectivamente, 73,82% e 81,20%, revelam um alto desempenho de remoção de poluentes orgânicos, e a redução da relação DQO/DBO de 3,06 para 2,20 expõe a elevada capacidade de degradabilidade do meio. Assim, tais resultados exprimem um sistema eficiente no tratamento de resíduos oriundos da suinocultura.

Em relação a avaliação quantitativa de biogás, observa-se uma produção acumulada de 347 litros, com um desempenho calculado de 0,01157 m³/kg (base seca). Apesar de ser um resultado relativamente satisfatório, verifica-se que a eficiência do sistema poderia ter sido otimizada mediante o aumento do teor de água no afluente de 63,78% para, pelo menos, 75,00%. Além disso, a adição de um

inóculo de dejetos suínos no início da biodigestão poderia aumentar a disponibilidade de nutrientes (principalmente proteínas) no meio e favorecer a atividade das bactérias metanogênicas.

No tocante período de biodigestão, o tempo de retenção hidráulica pré-determinado foi de 35 dias, todavia detectou-se a interrupção do processo digestivo no 31º dia. Diante disso, supõe-se que a suspensão do processo foi causada por um ou mais fatores inibitórios. Nesse ponto levantam-se duas hipóteses: a falta de disponibilidade de nutrientes no meio pelo fato do biodigestor ter sido alimentado de forma não contínua e sem adição de inóculo, e o aumento da concentração de amônia causado pela elevação do valor do pH ao longo da biodigestão (ver equação 5). Assim, atesta-se que o monitoramento dos parâmetros físico-químicos ao longo da biodigestão teria permitido um controle mais rigoroso e preciso do processo, e eventualmente teria aumentado o tempo de retenção hidráulica e o rendimento do sistema. Salienta-se, ainda, que as características iniciais do substrato, bem como o sistema de operação e suas condições, são bastante influenciadores no sucesso do tratamento de resíduos. Outrossim, conhecer precisamente a alimentação dos animais e a espécie estudada viabiliza a realização de um estudo mais preciso e consistente sobre a caracterização da biomassa e a sua transformação em biofertilizante por meio da biodigestão.

Diante dessas observações, certifica-se que o sistema desenvolvido é tecnicamente viável para ser implementado para geração de biogás e tratamento de dejetos animais, e a aplicação das melhorias suprarreferidas poderiam potencializar a produção de biogás e otimizar o processo da biodigestão como um todo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES, A. W.; SILVA, F. M. da; CASTRO, V. M. U. de; WENZEL, B. M. Avaliação de desempenho de um biodigestor canadense modificado no tratamento de dejetos de suínos. **ENGEVISTA**, Niterói, v. 16, n. 4, p. 329-338, 2014.

AISLER. Fritzing. Version 0.9.3b. 2016. Disponível em:
<http://google_earth.pt.downloadastro.com/vers%C3%B5es_antigas/>. Acesso em: 14 ago. 2017.

ANDRADE, M. A. N.; RANZI, T. J. D.; MUNIZ, R. N.; SILVA, L. G. S.; ELIAS, M. J. **Biorreatores Rurais no Contexto da Atual Crise de Energia Elétrica Brasileira e na Perspectiva da Sustentabilidade Ambiental**. Disponível em:
<<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v1/030.pdf>> Acesso em 27. fev. 2017.

ARAÚJO, G. M. **Remoção biológica de gás sulfídrico concentrado para tratamento do biogás**. 2013. 100 f. Dissertação (Mestre) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

ARAÚJO, I. S.; OLIVEIRA, J. L. R.; ALVES, R. G. C. M.; FILHO, P. B.; COSTA, R. H. R da. Avaliação de sistema de tratamento de dejetos suínos no estado de Santa Catarina. **AGRIAMBI**, Campina Grande, v. 16, n. 7, p. 745-753, 2011.

ARDUINO. Arduino Software. Version 1.8.5. 2017. Disponível em:
<<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>>. Acesso em: 04 abr. 2017.

ARDUINO. **Examples from Libraries**. Disponível em:
<<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/LibraryExamples>> Acesso em: 22 abr. 2017.

ARDUINO. **Foundations**. Disponível em:
<<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Foundations>> Acesso em: 21 abr. 2017.

BECKER, H. R. **Remoção de H₂S por meio de adsorção em óxido de ferro granular**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BERTOZZO, F. **Co-digestão anaeróbia de dejetos de bovinos e dois tipos de glicerina bruta**. 2013. 92 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2013.

BRAGA, E. A. S.; AQUINO, M. D. de; MALVEIRA, J. de Q.; NETO, J. C.; ALEXANDRINO, C. D. Avaliação da biodegradabilidade das águas de lavagem provenientes da etapa de purificação do biodiesel produzido com óleo extraído das vísceras de tilápia. **REGA**, Porto Alegre, v. 9, n. 2, p. 35-45, jul./dez. 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Empresa Brasileira de Agropecuária (EMBRAPA). **Biogás: uma alternativa de energia no meio rural**. Belém: EMBRAPA/CPATU, 1980, 23 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Empresa Brasileira de Agropecuária (EMBRAPA). **Manejo dos Dejetos**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia8/AG01/arvore/AG01_250_21720039249.html> Acesso em: 13 out. 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Empresa Brasileira de Agropecuária (EMBRAPA). **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. Concórdia, 2006. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/publicacao_l4i77t4r.PDF> Acesso em 15. mar. 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde (FUNASA). **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs**. Brasília: FUNASA, 2014, 112 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2015, 292 p.

BODANSKY, David, **The Energy Source Book**, Ruth Howes and Anthony Fainberg editors, New York, American Institute of Physics, 1991, Appendix: Energy Units.

CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás**. 1985. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1985.

CHERNICHARO, C. A. L.; BORGES, A. M.; MESQUITA, L. C. P.; DIAS, A. M. A. Desenvolvimento de um respirômetro automatizado para avaliação da atividade microbiana anaeróbia. **Revista de Engenharia Sanitária**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 3-4, p. 120-126, 1997.

COELHO, S. T.; VELAZQUEZ, S. M. S. G.; PECORA, V.; ABREU, F. C. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um grupo gerador de 18 kW. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 11., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Brasília: DF, 2006. 12 f.

CRAVEIRO, A. M.; LA IGLESIA, M. R. de; HIRATA, Y. S. **Manual de biodigestores rurais**. São Paulo: Editora IPT, 2013. 61 p.

CREMONEZ, P. A.; ROSSI, E. de; FEROLDI, M.; TELEKEN, J. G.; FEIDEN, A., DIETER, J. Codigestão de água residual de suinocultura e vinhaça sob diferentes condições térmicas. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 38, n. 1, p. 103-110, 2015.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M.C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2002. 5 f.

DOTTO, R. B.; WOLFF, D. B. Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos. **Disciplinarium Scientia**, Santa Maria, v. 13, n. 11, p. 13-26, 2012.

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP. **Características químicas da água**: pH, acidez, alcalinidade e dureza. Disponível em: <www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=1801> Acesso em: 03 out. 2017.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR). **Guia Prático de Biogás**: Geração e Utilização. Gülzow, 2013. Disponível em: <<http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/l/e/leitfadenbiogas-por-finalweb-20131002.pdf>> Acesso em 01 out. 2017.

FARIAS, D. F.; JUNIOR, M. A. A. S. **Estudo para implementação de um biodigestor comunitário em comunidade de baixa renda**. 2009. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FERNANDES, A. L. T.; TESTEZLAF, R. Fertirrigação na cultura do melão em ambiente protegido, utilizando-se fertilizantes organominerais e químicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n.1, p. 45-50, jan./abr. 2002.

FERNANDES, D. M.; COSTANZI, R. N.; FEIDEN, A.; SOUZA, S. N. M. de; KITAMURA, D. S. Processo de biodigestão anaeróbia em uma granja de suínos. **Ambiência**, Guarapuava, v.10, n.3, p. 741-754, set./dez. 2014.

GAO, W. J. J.; LIN, H. J.; LEUNG, K. T.; LIAO B. Q. Influence of elevated pH shocks on the performance of a submerged anaerobic membrane bioreactor. **Process Biochemistry**, Oxford, v. 45, n. 8, p.1279-1287, ago. 2010.

GASPAR, R. M. B. **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. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

GOLDEMBERG, J. Biomass and energy. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009.

GOMES, E. L. B.; TAVARES, L. A. **Uma solução Arduino para controlar e monitorar processos industriais**. 2013. 4 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Automação e Controle Industrial) - Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2013.

GONÇALVES, G. L. F. **Biodigestores: Uma Alternativa para Reduzir a Contaminação das Águas pelo Esgoto**. 2012. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Atenção Básica em Saúde de Família) – Faculdade de Medicina, Universidade Federal de Minas Gerais, Araçuaí, 2012.

GOOGLE. Google Earth. Version Pro 7.1. 2013. Disponível em: <http://google_earth.pt.downloadastro.com/vers%C3%B5es_antigas/>. Acesso em: 10 jul. 2017.

GUSMÃO, Maria. M. F. e C. de C. **Produção de biogás em diferentes sistemas de criação de suínos em Santa Catarina**. 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Ambiental) - Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

HARDOIM, P. C. **Efeito da temperatura de operação e da agitação mecânica na eficiência da biodigestão anaeróbia de dejetos bovinos.** 1999. 88 f. Tese (Doutorado em Produção Animal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 1999.

IANNICELLI, A. L. **Reaproveitamento Energético do Biogás de Uma Indústria Cervejeira.** 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, São Paulo, 2008.

INFOBIBOS. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2010_1> Acesso em: 24 out. 2017.

INOUE, K. R. A. **Produção de Biogás, Caracterização e Aproveitamento Agrícola do Biofertilizante Obtido na Digestão da Manipueira.** 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Key Word Energy Statistics.** Paris: OECD/IEA, 2015. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf> Acesso em: 7 set. 2016.

JÚNIOR, C. B.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais.** 2. ed. Foz do Iguaçu/Brasília: TechnoPolitik Editora, 2009. 137 p.

JUNIOR, D. C. F. **Estudo de caso: viabilidade de implantação de biodigestor no Instituto João XXIII na cidade de Ponta Grossa/PR.** 2015. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

KOLAKOVIC, S.; STEFANOVIC, D.; MILICEVIC, D.; TRAJKOVIC, S.; MILENKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. S.; ANDELKOVIC, L. Effects of reactive filters based on modified zeolite in dairy industry wastewater treatment process. **CI & CQE**, Mitrovica, v. 19, n. 4, p. 583-592, 2013.

LEITE, Wanderli R. M. **Digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto**. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

LIMA, M. T. da S. L.; SOUZA, M. C. de; FLORES, T. S.; CRUZ, N. G. da S.; DIAMANTINO, H. D.; BARROSO, L. A.; ROCHA, B. A.; SOUZA, R. L. M.; RAMOS, P. C.; MACEDO, M. H. M. Sobre a Situação Energética Brasileira: De 1970 a 2030. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, Ed. Especial UFVJM, p. 06-16, 2014.

LUNA, M. L. D. de; LEITE, V. D.; LOPES, W.S.; SOUSA, J. T. de; SILVA, S. A. Tratamento anaeróbico de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos. **Eng. Agríc.**, Joboticabal, v. 29, n. 1, p. 113-121, jan./mar. 2009.

MARCHAIM, U. **Biogas process for sustainable development**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/t0541e/T0541E00.htm>> Acesso em: 16 set. 2016.

METCALF & EDDY, Inc.; TCHOBANOGLOUS, George; BURTON, Franklin Louis; STENSEL, David. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. 5. ed. New York: Editora McGraw - Hill Education, 2013. 1856 p.

MEDIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M. & PARKER, J. (1997). **Brock biology of microorganisms**. 8 Ed. Cap 15, 16 e 17. New Jersey: Prentice-Hall. p. 606-768.

NETO, E. D. D.; ALVARENGA, L. H.; COSTA, L. de M.; NASCIMENTO, P. H.; SILVEIRA, R. Z.; LEITE, L. H. de M. Implementação e avaliação de um biodigestor de produção descontínua. **Revista E-xacta.**, Belo Horizonte. v. 3, n. 2., 2010.

OLIVEIRA, K. T. L. L.; GOMES, R. A. Contribuições da Recuperação do Biogás de Aterro Sanitário: uma análise para Goiânia. **Boletim Trimestral Conjuntura Econômica Goiânia**, 2008.

OLIVEIRA, L. A.; MADEIRA, V. S. Tratamento terciário de esgoto sanitário visando o reúso da água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: Blucher, 2015. p. 7498-7505.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; JÚNIOR, J. de L. Biodigestão anaerobia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica. **Eng. Agríc.**, Joboticabal, v. 29, n. 3, p. 474-482, jul./set. 2009.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; JÚNIOR, J. de L. Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. **Eng. Agríc.**, Joboticabal, v. 31, n. 2, p. 399-410, mar./abr. 2011.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP - Estudo de caso.** 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MOTERANI, F. Avaliação do desempenho físico-químico de um reator UASB construído em escala piloto na remoção de poluentes de efluentes de suinocultura. **Ambi-Água**, Lavras, v. 5, n. 1, p. 79-88, 2010.

PEREIRA, R. S. Identificação e caracterização das fontes de poluição em sistemas hídricos. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**, Pelotas, v. 1, n. 1, p. 20-36, 2004.

PONTES, P. **Reatores UASB Aplicados no Tratamento Combinado de Esgotos Sanitários e Lodo Excedente de Filtro Biológico Percolador.** 2003. 175f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

POULSEN, Tjalfe G. Solid waste management: Anaerobic digestion. Disponível em: <http://agrienvarchive.ca/bioenergy/download/intwastech5_poulsen_2003.pdf> Acesso em: 07 out. 2017.

QUADROS, D. G. de; OLIVER, A. de P. M.; REGIS, U.; VALLADARES, R.; SOUZA, P. H. F. de; FERREIRA, E. de J. Biodigestão anaerobia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 236-332, 2010.

QUEIROZ, S. de C. **Modelagem da produção acumulada de biogás em biodigestores tipo batelada segundo a porcentagem de inóculo adicionada utilizando os modelos de regressão não-linear de Gompertz e exponencial.** 2003. 128 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Paulista, Botucatu, 2003.

QUEIROZ, Simone de C. **Modelagem da produção acumulada de biogás em biodigestores tipo batelada segundo a porcentagem de inóculo adicionada utilizando os modelos de regressão não-linear de Gompertz e exponencial.** 2003. 128 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Paulista, Botucatu, 2003.

RÁDIO CULTURA FOZ. Disponível em: <http://www.radioculturafoz.com.br/uso-de-energias-alternativas-sera-discutido-no-forum-do-oeste-em-desenvolvimento/#.We_Au2jWxPY> Acesso em: 24 out. 2017.

RICE, W. E.; BAIRD, B. R., EATON, D. A.; CLESCERI, L. S. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 22. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012. 1496 p.

RODRIGUES, L. S.; SILVA, I. J. da; ZOCRATO, M. C. de; PAPA, D. N.; SPERLING, M. V.; OLIVEIRA, P. R. de. Avaliação de desempenho de reator UASB no tratamento de águas residuárias de suinocultura. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 94-100, 2010.

SANTI, L. **Influência da adição de enzimas e microrganismos sobre a digestão anaeróbia de dejetos bovinos e suínos.** 2013. 68 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2013.

SANTOS, A. C. V. dos. Efeitos nutricionais e fitossanitários do biofertilizante líquido em nível de campo. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v.13, n. 4, p. 275-279, out./dez. 1991.

SCHUTZ, F.; MASSUQUETTI, A.; ALVEZ, T. W. Demanda e oferta energética uma perspectiva mundial e nacional para o etanol. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology**, Santa Maria, v. 16, n. 16, p. 3167-3186, nov. 2013.

SILVA, W. R. da. **Biogás: potencialidade dos aterros sanitários do estado do Paraná**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Tecnologia, Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2010.

SILVA, W. T. L. da; NOVAES, A. P. de; KUROKI, V.; MARTELLI, L. F. de A.; JÚNIOR, L. M. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. **Quim. Nova**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 35-40, 2012.

SOUZA, B. B. **Biodigestores: Economia e Sustentabilidade**. 2012. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Auditoria, Perícia e Gestão Ambiental) - Faculdade Redentor, Ponte Nova, 2012.

SOUZA, C. de F.; CAMPOS, J. A. Avaliação do tempo de retenção hidráulica, agitação e temperatura em biodigestores operando com dejetos suínos. **Rev. Bras. Agroecologia**, Guarapari, v. 2, n. 1, fev. 2007.

TAVARES, L. A. **Uma solução Arduino para controlar e monitorar processos industriais**. 2013. 4 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Automação e Controle Industrial) - Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rica do Sapucaí, 2013.

TEBECHERANI, C. T. P. **Artigo Técnico Aços inoxidáveis**. Disponível em: <http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html> Acesso em: 16 set. 2016.

TIMM, P. J.; GOMES, J. C. C.; MORSELLI, T. B. Insumos para agroecologia: pesquisa em vermicompostagem e produção de biofertilizantes líquidos. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 29, p. 131-140, jul./dez. 2004.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos. Curitiba: UTFPR, 2008. Disponível em: <http://www.utfpr.edu.br/documentos/normas_trabalhos_utfpr.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2017.

VELOSO, Alessandro V. **Análise ambiental e energética de sistema de produção de suínos com tratamento de dejetos em biodigestor**. 2014. 192 f. Tese

(Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

VIVAN, M.; KUNZ, A.; STOLBERG, J.; PERDOMO, C.; TECHIO, V. H. Eficiência da interação biodigestor e lagoas de estabilização na remoção de poluentes em dejetos de suínos. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 320-325, 2010.

XAVIER, C. de A. N.; JÚNIOR, J. de L. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e se muso de inóculo. **Eng. Agríc.**, Joboticabal, v. 30, n. 2, p. 212-223, mar./abr. 2010.

WOLHGEMUT, O. **Co-digestion of hog manure with glycerin to boost biogas and methane production**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Estudos de Pós-Graduação, Universidade de Manitoba, Winnipeg, 2009.

ANEXO A – Descrição técnica dos equipamentos e acessórios utilizados no sistema de produção e tratamento de biogás

Item	Equipamento	Descrição	Dados técnicos
1	- Biodigestor	- Bombona de PVC com tampa removível para armazenamento de biomassa.	- Capacidade: 75 litros - Dimensão: 95 cm de altura x 50 cm de diâmetro
2	- Rotâmetro	- Medidor de vazão de biogás tipo diafragma, com totalizador ciclométrico de 8 dígitos. Modelo: LAO G1.	- Vazão nominal: 1m ³ /h - Vazão mínima: 0,016 m ³ /h - Vazão máxima: 1,6 m ³ /h - Pressão máxima de trabalho: 50 kPa
3	- Gasômetro	- Balão de armazenamento de biogás, feito com lona de PVC.	- Capacidade: 1.000 litros - Dimensão: 1,5m x 2,2m - Espessura da lona: 6 mm
4	- Coluna de recheio	- Coluna cilíndrica de vidro com entrada e saída para engate de mangueira de 1/2".	- Dimensão: 45 cm de altura x 9 cm de diâmetro
5	- Bomba à vácuo	- Bomba à vácuo com gabinete em aço carbono com tratamento anti-corrosivo e pintura eletrostática. Modelo: TECNAL TE-058.	- Vazão nominal: 15L/min - Pressão nominal: 0 a +-700 mmHg - Compressor: Hermético 1/6HP a base de óleo
6	- Manômetro	- Medidor de pressão vertical com glicerina e caixa externa/interna de inox.	- Diâmetro: 63 mm - Pressão de trabalho: 0 a 4 bar / 0 a 60 psi
7	- Válvula globo	- Válvula globo de PVC.	- Diâmetro: 3/4" - Pressão nominal: 16kgf/cm ² - Temperatura máxima: 60°C - Cor: marrom
8	- Válvula globo com união soldável	- Válvula globo com união soldável de PVC.	- Diâmetro: 3/4" - Pressão nominal: 16kgf/cm ² - Temperatura máxima: 60°C - Cor: marrom
9	- Tubo	- Tubos de 6 m de PVC soldável.	- Diâmetro: 3/4" - Pressão nominal: 16kgf/cm ² - Temperatura máxima: 60°C - Cor: marrom
10	- Conexões de PVC	- Adaptadores soldáveis com flanges, joelhos 45°, joelhos 90°, tês 90°, luvas lisa/rosca (PVC soldável).	- Diâmetro: 3/4" - Pressão nominal: 16kgf/cm ² - Temperatura máxima: 60°C - Cor: marrom
11	- Conexões diversas	- Espigões machos com rosca e abraçadeiras com cabeça sextavada com fenda.	- Diâmetro espigão: 3/4" Rosca NPT x 1/2" bico escama - Diâmetro abraçadeira: 1/2" - Material espigão/abraçadeira: aço inox

ANEXO B – Descrição técnica dos equipamentos e acessórios utilizados no sistema de controle de temperatura do biodigestor

Item	Equipamento	Descrição	Dados técnicos
1	- Placa Arduino	- Placa eletrônica Arduino UNO R3 com 14 entradas/saídas digitais, 1 cristal oscilador de 16 MHz, 6 entradas analógicas, 1 conexão USB, 1 entrada de alimentação, 1 conexão ICSP e 1 botão de reset.	- Microcontrolador: ATmega 328 - Tensão de operação: 5 V - Tensão de alimentação: 7 a 12 V - Corrente contínua por pino I/O: 40 mA - Corrente contínua por pino 3.3V: 50 mA - Dimensões: 68,58 x 53,34 mm
2	- Placa <i>Protoboard</i>	- Placa de prototipagem eletrônica com 4 barramentos de alimentação	- Base: MB102 - Número de furos: 830
3	- Visor LCD	- Visor LCD 16 colunas x 2 linhas	- Conexão: 16 pinos - Luz de fundo: azul - Cor das letras: branca
4	- Luzes de LED	- Luzes de LED vermelha e verde tipo difuso para aplicações diversas	- Tensão: 2 V - Corrente: 20 mA - Diâmetro: 5 mm
5	- Relé de estado sólido	- Relé de estado sólido sem elementos mecânicos e peças móveis, compatível com microcontroladores e lógica TTL.	- Tensão de trabalho: 40 a 280 VCA - Tensão de acionamento: 3 a 32 VDC - Corrente máxima de saída: 25 A - Temperatura de trabalho: -25 a 70 °C - Dimensões: 63 mm x 45,4 mm x 23 mm
6	- Resistência elétrica com poço termométrico	- Resistência elétrica tipo tubular com poço termométrico e conexão tipo rosca 1.1/4"	- Material: aço inox - Comprimento (resistência): 200 mm - Potência: 1500 W - Tensão de alimentação: 220 V
7	- Sensor de temperatura	- Sensor de temperatura PT-100 de 3 fios, sem cabeçote, sem rosca, com corpo liso e cabo em trama metálica.	- Faixa de temperatura: -10 a 150 °C - Haste fixa de inox - Diâmetro da haste: 6,35 mm - Comprimento do cabo: 2 m
8	- Potenciômetro	- Potenciômetro tipo linear rotativo.	- Resistência: 100 KΩ - Potência: 1/5 W
9	- Resistor	- Resistores com terminais metálicos nas duas extremidades	- Resistência: 1 KΩ - Potência: 1/4 W
10	- Cabo USB	- Cabo USB tipo A-B para placas Arduinos com 5 pinos de entrada analógica e 5 pinos digitais de entrada e saída.	- Tensão de operação: 5 V - Comprimento do cabo: 30 cm - Cor: azul - Conectores: USB tipo A + USB tipo B
11	- Anel de vedação	- Anel O´RING para vedação estática e dinâmica em conexões, tubulações, tampas, entre outros.	- Material: borracha nitrílica - Diâmetro: 28 mm - Temperatura de trabalho: -40 a 120 °C