

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

JULIA CESINO BEZ BATTI

**DIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETO DE VACA LEITEIRA: UM
ESTUDO DO USO DE CINZAS DE CASCA DE ARROZ PARA
AUMENTAR A PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

ARARANGUÁ

2018

JULIA CESINO BEZ BATTI

JULIA CESINO BEZ BATTI

DIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETO DE VACA LEITEIRA: UM ESTUDO DO USO DE CINZAS DE CASCA DE ARROZ PARA AUMENTAR A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro(a) de Energia.

Araranguá, 26 de novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Regina Antônio Vasconcellos
Universidade Federal de Santa Catarina



Profa. Dra. Elaine Virmond
Universidade Federal de Santa Catarina

Tatiana Pineda U.

Profa. Dra. Tatiana Gisset Pineda Vásquez
Universidade Federal de Santa Catarina

DIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETO DE VACA LEITEIRA: UM ESTUDO DO USO DE CINZAS DE CASCA DE ARROZ PARA AUMENTAR A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Julia Cesino Bez Batti*

RESUMO

O objetivo principal desse trabalho foi investigar o potencial de aumento da produção de biogás ao introduzir cinza de casca de arroz como catalisador na digestão anaeróbia de dejetos de vaca leiteira. A investigação foi desenvolvida no âmbito do projeto “Técnica Sem Fronteiras: estudo e implantação de um biodigestor de baixo custo em uma pequena propriedade rural no município de Araranguá”. Amostras de dejetos de vaca leiteira e de biofertilizantes foram coletadas. Os valores de sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis e pH foram determinados. Treze reatores de bancada com capacidade de 250 ml foram confeccionados. Testes de digestão anaeróbica foram executados sem regime de batelada. Dejetos de vaca leiteira (substrato), biofertilizante (inóculo), bem como sílica comercial e diferentes concentrações de cinzas de casca de arroz foram utilizados como catalisador. Os ensaios foram realizados em duas temperaturas - ambiente (em torno de 25 °C) e a 40 °C, por um período de dez dias, sendo monitorada a produção de biogás. Os resultados obtidos nos testes para a determinação de sólidos totais, fixos, voláteis e pH indicaram, em geral, valores adequados aos testes de digestão. O aumento da temperatura provocou aumento na produção de biogás. Observou-se que a melhor condição foi a adição de 1,0 grama de cinza da casca de arroz nos reatores operados a 40 °C, a qual foi capaz de aumentar a produção de biogás em 151% quando comparada com o reator à temperatura ambiente. Conclui-se que o uso de cinzas de casca de arroz como catalisador é uma alternativa viável para aumentar a produção de biogás. Isso possibilita a valoração deste resíduo, conferindo vantagens econômicas e ambientais ao processo.

Palavras-chave: Dejetos de vaca leiteira. Cinza de casca de arroz. Sílica Gel. Biogás.

ANAEROBIC DIGESTION OF DAIRY CATTLE MANURE: A STUDY OF RICE HUSK ASH TO INCREASE BIOGAS PRODUCTION

ABSTRACT

This research aimed at investigating the increase potential of biogas production using rice husk ash as a catalyst for anaerobic digestion of cattle manure. The investigation was carried out in the scope of the project "Technology without Borders: study and implantation of a low cost biodigester in a small rural property in Araranguá-South of Brazil". Samples of cattle manure and cattle manure-based fertilizers were collected. The total, fixed and volatile solids and pH were determined. Thirteen bench reactors with capacity of 250 ml were used. Anaerobic biodigestion tests were performed in a batch regime. Dairy cow manure (substrate), biofertilizer (inoculum) as well as commercial silica and different concentrations of rice husk ash were used as catalysts. The tests were carried out at two ambient temperatures (around 25 °C) and at 40 °C for a period of ten days. The biogas production was controlled. The results obtained from the solids and pH series indicated, in general, adequate values for the biodigestion tests. The tests showed that the increase in temperature caused an increase in biogas production. It was observed that the best condition was the addition of 1.0 grams of rice husk ash in the reactors operated at 40 °C. The biogas production increased by 151% compared to the reactor at the room temperature. It is concluded that the use of rice husk ash as a catalyst is a viable alternative to increase the biogas production. This allows the valuation of this waste, providing economic and environmental benefits to the process.

Key words: Dairy cattle manure. Rice husk ash. Silica Gel. Biogas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1 Biomassa	9
2.1.1 A bovinocultura de leite em Santa Catarina	10
2.1.2 Dejetos da bovinocultura de leite	11
2.2 Digestão anaeróbia	13
2.2.1 Fatores que afetam o processo de digestão anaeróbia	15
2.3 Produtos da digestão anaeróbia: biogás e biofertilizante	17
2.4 Biodigestores	19
2.4.1 Biodigestores de escala laboratorial.....	19
2.5 Efeito dos catalisadores na produção de biogás	20
2.5.1 Casca de arroz	21
2.5.2 Sílica a partir das cinzas de casca de arroz	23
2.6 Projeto de extensão para implantação de um biodigestor de baixo custo ..	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Coleta do material	27
3.2 Caracterização do substrato e do inóculo	27
3.2.1 Sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos	28
3.2.2 pH.....	30
3.3 Montagem dos reatores	31
3.4 Operação dos reatores	32
3.4.1 Primeiro teste	32
3.4.3 Segundo teste	34
3.5 Medição do biogás gerado	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36

4.1 Caracterização do substrato e do inóculo	36
4.1.1 Sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis	36
4.1.2 Variação do pH	37
4.2 Efeito da adição de sílica e CCA sobre a produção de biogás	37
5. CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A biomassa vem sendo utilizada como fonte de combustível há muitos anos, inicialmente por meio da queima de madeira para a cocção de alimentos e aos poucos, por meio da evolução e do aperfeiçoamento da tecnologia para seu aproveitamento, vem ganhando espaço como uma fonte importante de energia renovável. Com o passar do tempo, tornou-se possível o armazenamento e a utilização do gás gerado pela fermentação anaeróbia dos resíduos orgânicos e atualmente esse produto possui diversas aplicações, como aquecimento, iluminação e geração de eletricidade.

O aumento da demanda pelo uso de combustíveis faz do biogás uma alternativa ao gás natural, com as vantagens de ser uma fonte de energia segura, de qualidade e mais limpa. O investimento em pesquisas e desenvolvimento de tecnologias que permitam que o biogás se torne um combustível cada vez mais eficiente é de extrema importância para aumentar sua competitividade perante os combustíveis fósseis, tornando seu uso mais vantajoso, tanto do ponto de vista tecnológico quanto econômico.

Entre os problemas enfrentados atualmente por parte da população mundial estão a falta de energia, aumento da geração de resíduos, mudança climática e baixa segurança alimentar. Tais adversidades poderão ser ainda intensificadas e expandidas nos próximos anos caso não ocorra uma mudança de comportamento em relação ao consumo desenfreado dos recursos naturais e conseqüente poluição do meio ambiente.

Tanto a queima de combustíveis fósseis quanto a atividade pecuarista contribuem para a liberação de gases nocivos ao ambiente e favorecem as mudanças climáticas. O setor de produção animal é responsável por 18% das emissões totais de gases de efeito estufa, equivalente em CO₂, e por 37% do metano antropogênico, que tem 23 vezes o potencial de aquecimento global em relação ao CO₂ (HOLM-NIELSEN; AL SEADI; OLESKOWICZ-POPIEL, 2009). Em 2010, as emissões de gases de efeito estufa pela agropecuária brasileira representaram cerca de 7% das emissões globais, de acordo com Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), colocando o Brasil em 4º lugar como maior emissor mundial.

Investir na produção e consumo de combustíveis provenientes de fontes renováveis, que não compitam por espaço com a produção de alimento e que valorizem os resíduos que antes seriam descartados no ambiente, é um passo em direção à garantia do suprimento energético e constituição de um meio ambiente mais limpo, seguro e equilibrado.

A literatura conta com diversos trabalhos que buscam alcançar esse objetivo. Abubakar e Ismail (2012) e Nwaukwu *et al.* (2014) investigaram o potencial do esterco de vaca para a produção de biogás e apresentaram como resultado boa produção, além de ser mostrar como uma alternativa para o tratamento de parte dos resíduos gerados por essa atividade. Alfa *et al.* (2014) compararam a produção de biogás utilizando capim limão, esterco de vaca e excremento de aves e encontraram uma maior produção de biogás quando o esterco de vaca estava entre os substratos digeridos.

Outros autores estudaram a codigestão do esterco de vaca juntamente com outras matérias primas. Otaraku e Ogedengbe (2013) utilizaram a serragem digerida com esterco de vaca e jacinto-de-água para gerar biogás. Já Yamashiro *et al.* (2013) testaram a co-digestão de estrume de vaca leiteira com resíduos concentrados de processamento de alimentos.

Com o objetivo de aumentar a produção de gás gerado, encontra-se também na literatura estudos sobre o efeito de catalisadores na digestão anaeróbia. Patel *et al.* (1992) obtiveram uma melhora na digestão do esterco bovino e jacinto-de-água ao acrescentar sílica gel ao substrato. Desai e Madamwar (1994) também utilizaram sílica gel para melhorar a eficiência da digestão anaeróbia de uma mistura composta por esterco bovino, resíduos de aves e soro de queijo, atingindo uma maior biodegradação e desempenho ao adicionar o catalisador ao processo.

Mais recentemente, Salam *et al.* (2015) investigaram a capacidade de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de esterco de vaca usando sílica gel como catalisador e obtiveram um aumento de 11,94% da produção total de gás. Ahamed *et al.* (2016) também conseguiram um aumento na produção de total de gás em 33,12% ao usar sílica gel na digestão anaeróbia de excrementos de aves e resíduos domésticos.

Sabendo do efeito positivo da introdução de sílica gel na produção de biogás, o objetivo geral desse trabalho foi investigar o potencial de aumento na produção de biogás ao adicionar cinza de casca de arroz, que é um resíduo rico em sílica, ao

substrato, que são dejetos de vaca leiteira. Adicionalmente, observar o efeito da temperatura na produção de biogás com o emprego do catalisador.

As atividades desse trabalho relacionam ensino, pesquisa e extensão, pois sua realização envolve a prática dos conhecimentos adquiridos em sala de aula e proporciona uma interação da comunidade externa com a Universidade no que se refere a coleta de material para pesquisa e posterior divulgação de informações obtidas com o desenvolvimento dos experimentos.

Esse trabalho está correlacionado com o projeto de extensão “Técnica Sem Fronteiras: estudo e implantação de um biodigestor de baixo custo em uma pequena propriedade rural no município de Araranguá/SC”. No referido projeto foi instalado um biodigestor de baixo custo que utiliza dejetos de vaca leiteira como substrato. O mesmo foi executado por estudantes da Universidade Federal de Santa Catarina e colaboradores, com apoio da organização alemã *Technology Without Borders* (TwB) e da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri).

A partir da possibilidade de aumentar a produção de gás no biodigestor operado nessa propriedade rural, procurou-se estudar e testar alternativas econômica e ambientalmente viáveis para atingir uma maior eficiência nessa produção, resultando assim no estudo do uso de cinzas de casca de arroz para aumentar a produção de biogás.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Biomassa

Do ponto de vista energético, biomassa é toda matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada para a produção de energia (ANEEL, 2002). É considerada um dos recursos renováveis mais abundantes, formada pela fixação de dióxido de carbono na atmosfera durante o processo de fotossíntese da planta e, portanto, é carbono neutro em seu ciclo de vida (NI *et al.*, 2006).

Os recursos energéticos da biomassa podem ser classificados de diversas maneiras. Nogueira e Lora (2003) classificam a biomassa fonte de biocombustíveis em três grupos principais, sendo os biocombustíveis da madeira, resíduos urbanos e biocombustíveis de plantação não florestal, onde estão enquadrados os resíduos animais.

De acordo com Cortez, Lora e Gómez (2008), a biomassa pode ser obtida de vegetais lenhosos ou não lenhosos, de biofluidos ou de resíduos orgânicos, que por sua vez, provém de centros urbanos, da indústria ou de atividades agrícolas. A Figura 1 ilustra um esquema das fontes de biomassa.

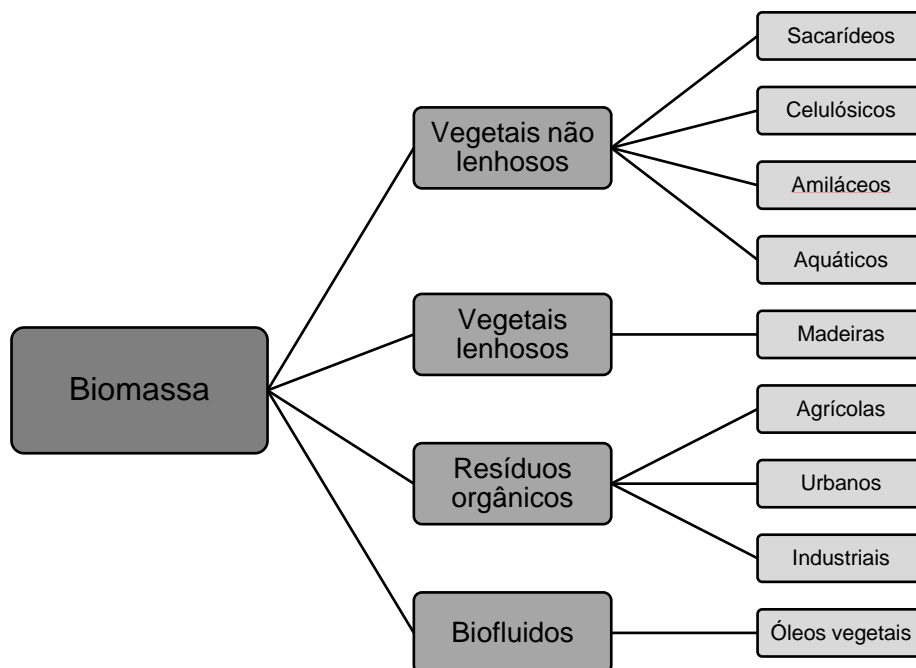


Figura 1 - Fontes de biomassa

Fonte: Ministério de Minas e Energia (1982) citado por Cortez, Lora e Gómez (2008).

Com o avanço tecnológico, a biomassa passou a ser aproveitada de diferentes formas, revelando diversas aplicabilidades. Atualmente, é utilizada como insumo energético para a produção de biocombustíveis sólidos para geração de energia térmica (carvão e resíduos agrofloretais), biocombustíveis líquidos (álcool e biodiesel) e geração de energia elétrica (combustão direta, gaseificação, queima de gases, entre outras tecnologias) (MARTINS, 2004).

O aproveitamento energético da biomassa não necessariamente precisa ser feito a partir de culturas específicas para esse fim, como ocorre, por exemplo, com a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, onde uma vasta quantidade de terra é exclusivamente dedicada ao seu cultivo. Atualmente, as tecnologias existentes permitem o aproveitamento da biomassa na forma de resíduos constantemente gerados por atividades já consolidadas, como a agropecuária.

Os resíduos agropecuários compreendem os resíduos agrícolas, que são resultantes de colheitas e processamento de cultivos, e os resíduos pecuários, que compreendem excretos animais. Sendo a fermentação anaeróbia dos resíduos agropecuários a forma mais adequada de conversão de energia, permitindo a produção de biogás e de fertilizante orgânico (NOGUEIRA; LORA, 2003).

2.1.1 A bovinocultura de leite em Santa Catarina

Entre os anos de 1990 a 2000 a produção mundial de leite de vaca apresentou uma trajetória de expansão discreta, aumentando apenas 2,6%. Porém, mais recentemente, a produção mundial voltou a se expandir mais significativamente, entre 2000 e 2016 o crescimento foi de 33,1% (EMBRAPA; INTELECTUS, 2017).

Dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) apontam o Brasil como quarto maior produtor mundial de leite, considerando uma média entre os anos de 2010 a 2016. Segundo dados mais recentes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no primeiro e segundo trimestre de 2018 foram produzidos em território nacional 11.474.248 litros de leite, tendo o estado de Santa Catarina contribuído com 10,4% dessa produção.

A atividade da bovinocultura leiteira representa uma importante fonte de geração de renda e emprego para Santa Catarina e está distribuída em quase todo o território nacional (SANTOS; MARCONDES; CORDEIRO, 2006). De acordo com dados da Aliança Láctea Sul Brasileira, em 2013 a região Sul de Santa Catarina

ocupou o segundo lugar na produção de leite, com um total de 257.366 litros produzidos, ficando atrás apenas do Oeste catarinense, que produziu 2.146.94 litros no ano.

Segundo dados do IBGE (2015), a Região Sul do país apresentou uma produtividade de 2.900 litros/vaca/ano, tendo uma média de 7,9 litros/vaca/dia. Considerando que uma vaca produz 45 kg/dejeto/dia, para cada litro de leite produzido, o animal também excreta 5,7 kg de dejetos (ALVARENGA, 2011). Sendo assim, nos dois últimos semestres do ano de 2018, somente Santa Catarina teve uma produção de mais de 6 toneladas de dejetos oriundos da atividade de bovinocultura leiteira, uma quantidade promissora para a geração de biogás.

2.1.2 Dejetos da bovinocultura de leite

São definidos como dejetos de animais o conjunto de fezes, urina, água desperdiçada dos bebedouros, água de higienização e resíduos de ração (UTEMBERGUE *et al.*, 2013). Esses materiais representam grande quantidade de biomassa, sendo sua reciclagem importante tanto por aspectos ambientais quanto econômicos (XAVIER; JÚNIOR, 2010).

Os dejetos produzidos pela bovinocultura são formados por macro e micronutrientes, sendo majoritariamente nitrogênio, fósforo e potássio em proporções variadas, salientando que a composição do esterco não é mesma para todos os bovinos (UTEMBERGUE *et al.*, 2013). Essa diferente composição é responsável por alterar o nível de atividade microbiológica durante o processo de decomposição para cada tipo específico de esterco (FERNANDES; SILVA, 1999).

Segundo Kiehl (1985) citado por Santos e Nogueira (2012), ela varia principalmente em função da alimentação dos animais, bem como com sua espécie, raça, idade, material utilizado como cama e com o seu próprio manejo, dificultando uma comparação direta entre as características físico-químicas dos excrementos de diferentes animais.

O volume excretado e a frequência com que ocorre a defecação dos bovinos não são fixos. Esses valores são fortemente afetados pela temperatura ambiente, pela qualidade e quantidade de alimento por eles ingerido, bem como pelas características individuais de cada animal (PÁSCOA, 2001 APUD HAFEZ; BOUISSOU, 1969; ARNOLD E DUDZINSKI, 1978; FRASER, 1980). Porém,

Alvarenga (2011) aproxima a produção diária de esterco dos bovinos para 10% de seu peso corporal, representando uma quantidade de 45 a 48 kg/vaca/dia.

Embora exista diferença na composição e na quantidade de dejetos, Lemos da Silva e Costa (2018) apresentam como valores médios das características dos dejetos de bovinos de leite os valores descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Produção e características dos dejetos (valores em animal/dia) de bovinos de leite.

Parâmetros	Vaca em Lactação	Vaca seca
Peso (kg)	453,6	635
Dejetos totais (kg)	50,3	32,2
Água (%)	88	88
Densidade (kg/m ³)	993	993
ST (%)	12,90	8,21
SV (%)	10,91	6,94
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	0,76	0,47
N (kg)	0,33	0,19
P ₂ O ₅ (kg)	0,17	0,07
K ₂ O (kg)	0,18	0,15

Fonte: Lemos da Silva e Costa (2018).

Devido à sua rica composição, o esterco bovino serve como substrato para vários microrganismos, sendo esses vetores de alta importância sanitária. Portanto, caso não seja estabilizado, pode se tornar um agente contaminador tanto do solo, vegetais e ar quanto do seu operador (BARROS *et al.*, 2009).

Pohlmann (2000) aborda como principais impactos ambientais negativos que podem ser causados pela bovinocultura a poluição dos lagos, rios e lençóis freáticos, a poluição do ar pela liberação de gases nocivos que causam problemas de saúde às pessoas e aos animais, bem como outros problemas epidemiológicos relacionados aos agentes causadores de infecções. O autor chama atenção para o fato de que na bovinocultura leiteira, além dos resíduos gerados pelos animais, também existe a água residuária, que é gerada em decorrência da retirada e processamento do leite.

Os prejuízos sofridos pela falta de tratamento e manejo inadequado desses resíduos podem ser vastos, sendo consideradas por Oliveira (2010) questões de

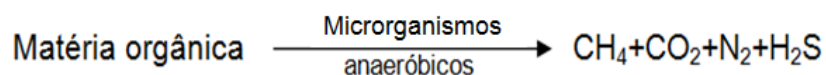
dimensões sanitária, ecológica e econômica, em razão da saúde dos animais e do homem, da poluição e desequilíbrio do meio ambiente e do envolvimento de recursos para viabilizar o manejo adequado.

Quando esses resíduos passam a ser manejados e tratados adequadamente, deixam de ser poluentes e acabam por constituir valiosos insumos para a produção agrícola sustentável (CAMPOS, 2018). Além disso podem vir a ser uma forma de economia, ou mesmo de renda, por meio da sua exploração como fonte de energia, pela digestão anaeróbia para aproveitamento do biogás e fertilizante gerados.

2.2 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia consiste de reações químicas que ocorrem de forma paralela e em série na ausência de oxigênio livre (ROZZI; REMIGI, 2004). É definida por Côté, Masse e Quessy (2006) como a engenharia da decomposição anaeróbia metanogênica da matéria orgânica.

A digestão anaeróbia envolve o trabalho de numerosas populações microbianas que interagem de muitas maneiras, convertendo a matéria orgânica em uma mistura de metano, dióxido de carbono e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio, gerando como produto final o biogás e um resíduo orgânico rico em nitrogênio também tratado por biofertilizante (PINTO, 1999; ROZZI; REMIGI, 2004; LI; PARK; ZHU, 2011). A reação simplificada desse processo pode ser descrita como:



Os grupos tróficos de microrganismos procarióticos anaeróbios (facultativos e obrigatórios) que geralmente são considerados relevantes para os projetos e para o controle dos processos anaeróbicos são as bactérias hidrolíticas, bactérias acidogênicas (ou fermentativas), bactérias acetogênicas, acetotróficas e hidrogenotróficas e archeas metanogênicas (JÚNIOR; ORRICO; JÚNIOR, 2010; ROZZI; REMIGI, 2004).

Essas bactérias são classificadas de acordo com as fases metabólicas de que fazem parte, sendo as bactérias acidogênicas responsáveis pelas etapas de hidrólise e acidogênese e as bactérias metanogênicas responsáveis pelas etapas de acetogênese e metanogênese (LI; PARK; ZHU, 2011; RODRIGUES, 2005).

Autores como Bueno (2010) e Carneiro (2009), dividem o processo de fermentação em quatro fases:

- I) Hidrólise: A matéria orgânica insolúvel e a matéria orgânica mais complexa (lipídios, proteínas, e hidratos de carbono) são transformadas em matéria orgânica solúvel pela ação de enzimas hidrolíticas (RODRIGUES, 2005). Segundo Pinto (1999) essa é uma etapa geralmente lenta, mas pode ser acelerada pelo aumento da temperatura, pela utilização de material finamente dividido ou por um pH levemente ácido.
- II) Fermentação ácida ou acidogênese: A matéria orgânica solúvel resultante da etapa de hidrólise é transformada em ácidos orgânicos voláteis (nomeadamente o ácido acético), hidrogênio e dióxido de carbono (RODRIGUES, 2005). De acordo com Pinto (1999), as bactérias que realizam essa fase podem ser anaeróbias estritas ou facultativas, que fazem o papel de eliminar qualquer traço de oxigênio dissolvido. De acordo com o autor, essa é uma fase que tem cinética rápida, em que a assimilação da matéria em biomassa microbiana é grande.
- III) Acetogênese: Nessa fase ocorre a conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção de metano (acetato, dióxido de carbono e hidrogênio) (BUENO, 2010). É um processo intermediário que permite a obtenção de um substrato apropriado para as archaeas metanogênicas por ação das bactérias acetogênicas utilizadoras de hidrogênio ou homoacetogênicas, e das bactérias acetogênicas produtoras obrigatórias de hidrogênio ou sintróficas (CARNEIRO, 2009).
- IV) Metanogênese: Essa é a fase em que os ácidos voláteis são consumidos como alimento pelas arqueas metanogênicas (estritamente anaeróbias) e são produzidos metano e dióxido de

carbono (BUENO, 2010), sendo muitas vezes a etapa limitante do processo (CARNEIRO, 2009, apud CHERNICHARO, 1997).

A Figura 2 apresenta as principais etapas da digestão anaeróbia.

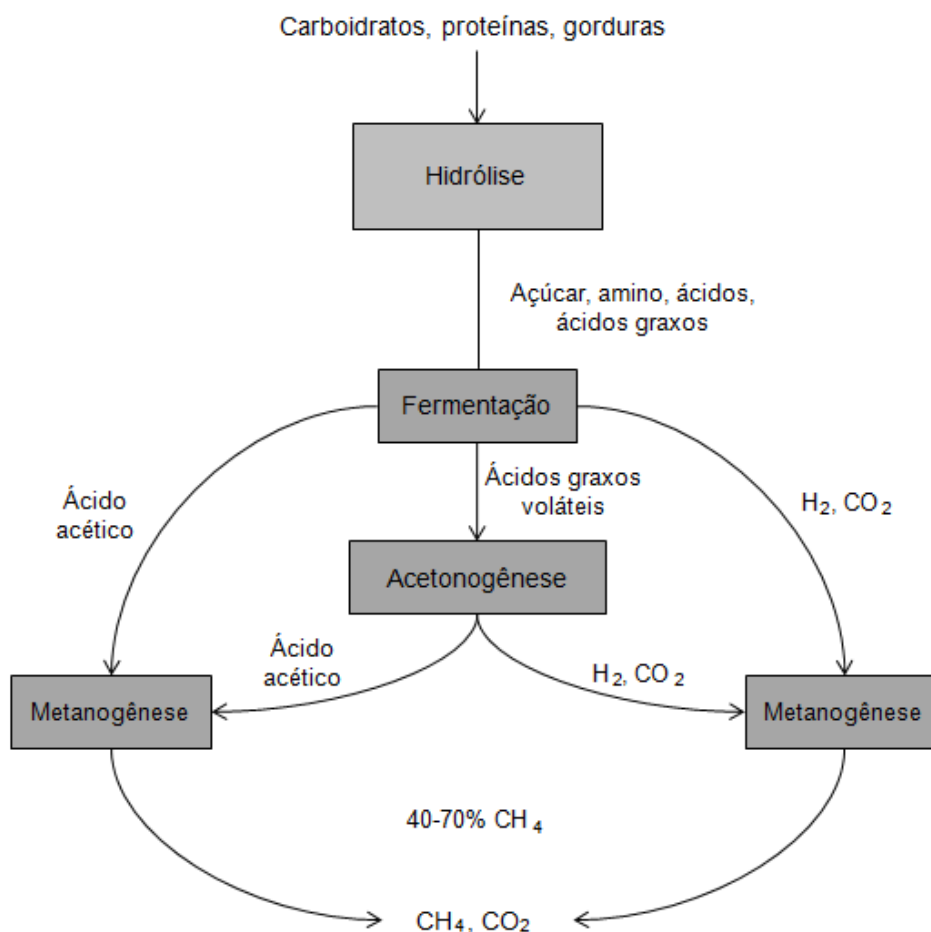


Figura 2 – Fluxo do processo de degradação da matéria orgânica pela digestão anaeróbia

Fonte: Adaptado de Li, Park e Zhu (2011)

2.2.1 Fatores que afetam o processo de digestão anaeróbia

Além de depender do potencial metabólico dos microrganismos atuantes, a digestão anaeróbia depende também da existência de condições ambientais adequadas (PEREIRA, 2013). Khalid *et al.*, (2011) destacam como fatores que afetam o processo de digestão anaeróbia a temperatura, pH, umidade, tipo da fonte de carbono, nitrogênio e a relação C/N. Rizzoni *et al.* (2013) consideram também

como fatores pertinentes a digestão o atendimento às necessidades nutricionais das bactérias, a ausência de materiais tóxicos, o TRH e agitação do meio.

Raposo *et al.* (2012) fizeram uma abordagem sobre quais fatores afetam o desempenho de testes anaeróbios em regime batelada. Os autores dividiram as condições operacionais com potencial de afetar os ensaios de biodegradabilidade e, portanto, a produção de metano em condições operacionais físicas como sendo: o volume do reator utilizado, temperatura, agitação e tempo de retenção hídrica (TRH), e em condições operacionais químicas: os gases no espaço livre do reator, pH e alcalinidade e o meio mineral.

Bavutti *et al.* (2013) chamam atenção para a importância de manter uma temperatura constante durante o processo de digestão, pois as bactérias metanogênicas sobrevivem em uma faixa de temperatura bastante estreita, a partir da qual o rendimento da planta de biogás pode entrar em colapso. Segundo os autores, o digestor anaeróbio é mantido a uma temperatura próxima a 40 °C nas condições operacionais mais comuns, encontrando nos seus experimentos uma máxima produção de biogás entre 37 °C e 40 °C.

Em seus estudos sobre digestão anaeróbia para a produção de biogás, Jiang *et al.*, (2014) identificaram o pH como um dos parâmetros mais sensíveis para o processo. Khalid *et al.* (2011) concluem em seus estudos sobre o tema que o pH ótimo para a metanogênese está em torno de 7,0.

O teor de umidade foi, por muitos autores, controlado pelo percentual de sólidos totais do lodo (mistura de materiais) usado para a digestão. De acordo com a análise de Maamri e Amrani (2014), a produção de biogás depende em grande parte da concentração total inicial de sólidos. Em seus estudos Zennaki-Bensouda *et al.* (1996) concluíram que os melhores rendimentos de biogás ocorreram para a fermentação de um lodo com concentrações entre 7% e 9% de matéria seca. Otaraku e Ogedengbe (2013) também concluíram que um teor total de sólidos entre 8% e 9% é o mais adequado para a produção de biogás.

Entre os fatores químicos que influenciam o crescimento das bactérias estão o carbono, nitrogênio, enxofre, fósforo e elementos traços, que são quantidades muito pequenas de outros elementos minerais, como ferro, cobre, molibdênio e zinco (TORTORA; FUNKE; CASE, 2012). Segundo Metz (2013) a relação entre C/N está diretamente relacionada ao desenvolvimento do processo fermentativo.

Alguns autores evidenciaram a necessidade de manter uma relação C/N específica para uma digestão ótima, como Oliveira (2009) que considera necessária uma relação entre 20:1 e 30:1, Gaspar (2003) que diz que essa relação deve ser mantida entre 20:1 e 30:1 e Werner, Stohr e Hees (1989) consideram favorável entre 10:1 e 30:1.

Por outro lado, Guarino *et al.* (2016) concluíram em seus estudos que a razão C/N não afeta a produção de biometano proveniente da digestão de estrume de búfalo, mostrando que uma alta produtividade de biometano pode ser atingida em um intervalo C/N entre 9:1 a 50:1. Da mesma forma, Hills (1979) já havia identificado uma variação muito pequena na concentração de metano produzido quando alterou a relação entre C/N na digestão de esterco de vaca leiteira.

Em relação à fonte de carbono utilizada para digestão anaeróbia, Li *et al.* (2013) chamaram atenção para as matérias-primas que contêm uma alta porcentagem de lignocelulose, pois não podem ser efetivamente digeridas por bactérias anaeróbias e levam a um baixo rendimento de biogás e longo tempo para digestão, como é o caso da palha de milho, por exemplo.

2.3 Produtos da digestão anaeróbia: biogás e biofertilizante

A digestão anaeróbia é uma alternativa para o aproveitamento energético da biomassa, pela qual são obtidos o biogás e o biofertilizante.

A formação do biogás pode ocorrer espontaneamente em alguns ambientes naturais com baixas concentrações de oxigênio, como em pântanos e lamas escuras. Porém, sua produção também é possível a partir da fermentação de diversos resíduos orgânicos, como resíduos agrícolas, resíduos urbanos, efluentes industriais, esterco animal, que é o objeto do presente estudo, entre outros.

O biogás obtido a partir do esterco bovino é constituído, especialmente, por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), amônia (NH₃), sulfeto de hidrogênio (H₂S) e nitrogênio (N₂) (BARROS *et al.*, 2009). A Tabela 2 mostra composição típica do biogás.

Tabela 2 – Composição típica do biogás

Componente	Quantidade (%)
Metano	55 – 65
Gás Carbônico	35 – 45
Nitrogênio	0 – 3
Hidrogênio	0 – 1
Oxigênio	0 – 1
Gás Sulfídrico	0 – 1

Fonte: Prati (2010) *apud* Magalhães (1986).

O biofertilizante é o material efluente do biodigestor, após a digestão anaeróbia do seu substrato. É considerado um adubo orgânico com alta qualidade, sendo aplicado no solo para proporcionar nutrientes para as plantas. O mesmo também pode servir como inóculo, por meio da sua introdução na carga de um novo substrato que será tratado (MENDONÇA, 2009; SCHLUNKE, 2011).

A inserção desse inóculo em um novo reator ou nova batelada é capaz de fornecer uma população adicional de microrganismos típicos da digestão anaeróbia. Apresentando como benefícios a diminuição do TRH e o aumento da produção de gás (KARLSSON *et al.*, 2014; SCHLUNKE, 2011; XAVIER; JÚNIOR, 2010). A composição típica do biofertilizante é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição típica do biofertilizante

Componente	Quantidade (%)
Nitrogênio (N)	1,5 – 2,0
Fósforo (P)	1,0 – 1,5
Potássio (K)	0,5 – 1,0

Fonte: Junqueira (2014).

Além da geração desses produtos, a digestão anaeróbia se apresenta como uma forma adequada para o tratamento dos resíduos gerados pela bovinocultura de leite, pois promove a redução de microrganismos patogênicos e de odores, além de tornar possível o controle da liberação de gases e efluentes (JÚNIOR; ORRICO; JÚNIOR, 2010).

2.4 Biodigestores

Um biodigestor pode ser definido como um equipamento destinado à fermentação de matéria orgânica. Surgiu com o pressuposto de tratamento para resíduos agroindustriais e seus produtos foram posteriormente utilizados como fonte de energia e adubo para a agricultura (ECKERT *et al.*, 2015). Sua construção pode diferir em alguns aspectos, mas geralmente esses equipamentos são compostos basicamente de duas partes: um recipiente para abrigar e permitir a digestão da biomassa e o gasômetro para armazenar o biogás (DOTTO; WOLFF, 2012).

Souza (2010) e Gaspar (2003) classificam os biodigestores em relação ao seu abastecimento, que pode ser contínuo e intermitente. O biodigestor é classificado como contínuo quando o abastecimento de biomassa é diário, sendo a entrada de material proporcional à sua saída. O intermitente (também chamado de batelada por outros autores) é quando a biomassa é retida no biodigestor até sua completa digestão. Os biodigestores alimentados de forma intermitente são considerados de construção mais simples, conforme proposto por Xavier e Júnior (2010).

Na mesma linha de raciocínio, Shubeita *et al.* (2014) dividem o funcionamento dos sistemas por demanda, quando a referência de carga é a capacidade máxima de armazenamento de biomassa, ou temporal, quando esse recebe uma carga de matéria orgânica com uma base de tempo.

Os diferentes modelos de biodigestores foram surgindo para suprir as necessidades de cada época e são elaborados de acordo com as características do local e da matéria-prima, bem como da sua disponibilidade e orçamento para a construção (ECKERT *et al.*, 2015). Tanto Shubeita *et al.* (2014) quanto Calza *et al.*, (2015) apresentam como mais bem conhecidos biodigestores de alimentação contínua os modelos indiano, chinês e canadense, e o biodigestor de alimentação intermitente modelo batelada.

2.4.1 Biodigestores de escala laboratorial

Os biodigestores de bancada podem reproduzir um modelo a ser implantado em escala real e dessa forma prever possíveis adversidades vinculadas a sua instalação e aos produtos utilizados na sua construção, podendo assim impedir a ocorrência dos mesmos problemas (ECKERT *et al.*, 2015). Contudo, Bavutti *et al.*,

(2013) alertam para a maior sensibilidade dos biodigestores de uma pequena planta em relação às questões biológicas devido à variabilidade de sua alimentação e susceptibilidade a alterações térmicas, sendo necessária uma maior atenção a esses fatores ao se trabalhar com biodigestores em escala laboratorial.

Os biodigestores batelada são considerados por autores como Raposo *et al.*, (2012), Xavier e Júnior (2010) modelos mais simples, menos trabalhosos e demorados quando comparado ao biodigestor contínuo, sendo então mais utilizados para a realização de testes devido a essas vantagens.

O princípio geral dos testes em biodigestores batelada é a incubação de um inóculo contendo uma variedade de microrganismos anaeróbios em meio adequado, pH neutro e temperatura normalmente mesofílica ou termofílica. O substrato adicionado a esse meio serve como fonte de carbono e energia para os microrganismos. Após a incubação, o grau de degradação do substrato é avaliado em intervalos de tempo pré-definidos para determinar a sua extensão e taxa de conversão (RAPOSO *et al.*, 2012).

2.5 Efeito dos catalisadores na produção de biogás

Um catalisador é uma substância que aumenta a taxa de uma reação sem modificar o seu balanço global de energia. São geralmente classificados em dois grupos: homogêneos, no qual apenas uma fase está envolvida e heterogêneos, quando a reação ocorre em ou perto de uma interface entre as fases (GHOLAMZADEH *et al.*, 2014; IUPAC, 2001).

Os catalisadores homogêneos têm tipicamente maior atividade catalítica do que os heterogêneos e são amplamente utilizados em processos industriais, mas apresentam algumas desvantagens como corrosividade e produção de resíduos tóxicos (GHOLAMZADEH *et al.*, 2014; RAZALI *et al.*, 2012).

Assim, os catalisadores heterogêneos foram preparados para resolver esses problemas e são preferíveis devido à simplificação no projeto, separação, manuseio, estabilidade e possibilidade de reutilização. Nesses catalisadores, o transporte dos reagentes para os locais ativos do catalisador é ilimitado, o que resulta em um efeito significativo sobre as taxas de reação (GHOLAMZADEH *et al.*, 2014; RAZALI *et al.*, 2012).

É relatado na literatura que a adição de carvão ativado em pó resulta em um aumento na produção de gás, devido a uma melhora da digestão. A superfície do carvão ativado fornece locais de adsorção onde o substrato pode se acumular, proporcionando assim alta concentração de substrato localizada. Essas áreas de adsorção fornecem um ambiente de crescimento mais favorável para sistemas de substrato bacteriano (MADAMWAR; MITHAL, 1986; PATEL; PATEL; MADAMWAR, 1992).

Patel, Patel e Madamwar (1992) investigaram, além dos efeitos do carvão ativado em pó, os efeitos da gelatina, pectina, talco em pó, álcool polivinílico, pó de alumínio, caulino, bentonite e da sílica gel como um meio para melhorar a digestão anaeróbia. Concluíram nos seus estudos que, embora não tenham claro o mecanismo da ação desses adsorventes, foi possível melhorar o desempenho da digestão ao incorporar essas substâncias nos reatores, com um melhor desempenho e estabilidade do processo.

A sílica é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre e o substrato mineral da maior parte das plantas (EPSTEIN, 1994). É encontrada na natureza nas formas de α -quartzo, sílica opalina e sílica amorfa, sob a qual a sílica gel está classificada (EHLICH *et al.*, 2012).

De acordo com Desai e Madamwar (1994), os adsorventes podem melhorar a eficiência da conversão de matéria orgânica em ácidos voláteis e depois em metano. Nos seus estudos, a matéria orgânica foi reduzida com o aumento da dose de adsorvente e a estabilidade do processo aumentou com o aumento da quantidade de sílica gel, indicando que os ácidos voláteis são consumidos em uma taxa mais rápida do que no experimento sem o uso da sílica.

O SiO_2 é amplamente aplicado em catalisadores devido ao seu baixo custo e à sua alta estabilidade, e atua como um bom catalisador para a produção de biogás, pois os efeitos catalíticos e de absorção da sílica gel são usados para a remoção de gases indesejados, como o CO_2 (AHAMED *et al.*, 2016).

2.5.1 Casca de arroz

O arroz, juntamente com trigo e leguminosas, é parte importante da dieta brasileira (OCDE; FAO, 2015). De acordo com o Sistema de Informação do Mercado Agrícola (AMIS), o Brasil é o oitavo maior produtor mundial de arroz, com 7,21

milhões de toneladas produzidas na safra 2016-2017. O estado Santa Catarina é o segundo maior produtor de arroz do país, produzindo 1,13 milhões de toneladas no ano de 2017.

A casca do arroz é um dos principais produtos secundários agroindustriais produzidos em todo o mundo (BARANA *et al.*, 2016). Muitos autores consideram que ela contribua para uma constituição de 20-23% do seu produto final (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005; FOLETTO *et al.*, 2005, CHAVES *et al.*, 2009; LIMA, 2010; TASHIMA *et al.*, 2011; FERREIRA, 2013; BARANA *et al.*, 2016; OLUPOT *et al.*, 2016; SHEN, 2017).

A casca de arroz é um material fibroso e tem como componentes orgânicos principais celulose, hemicelulose e lignina, cujas proporções variam com o tipo de arroz e as condições climáticas e geográficas em que se situa a plantação (DELLA; KÜHN, 2002; FERREIRA, 2013; HOTZA, 2005;). A Figura 3 mostra uma estimativa dos seus componentes.

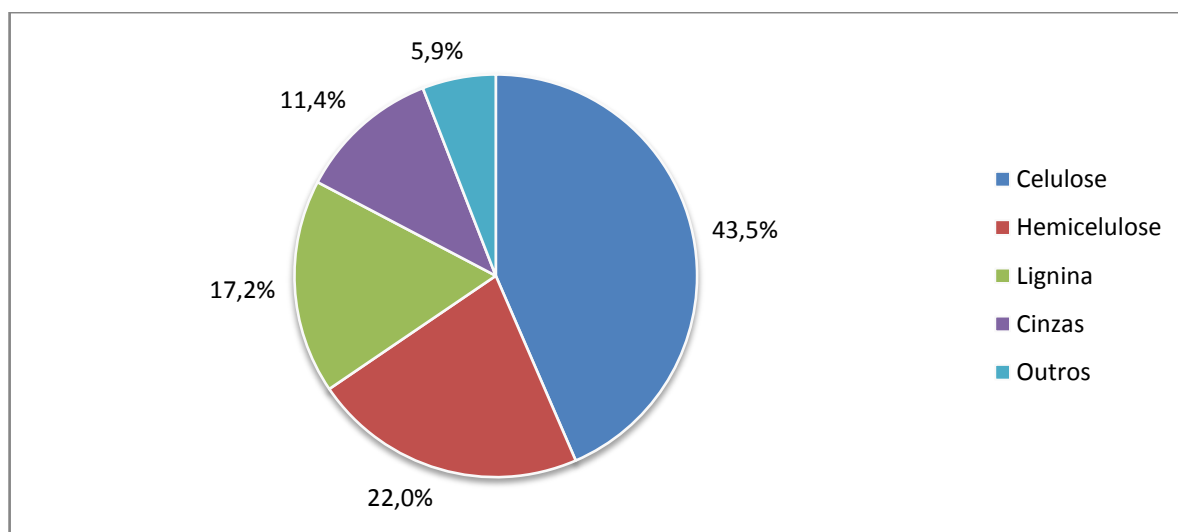


Figura 3 – Componentes da casca de arroz

Fonte: Mussatto e Roberto (2002).

Conforme a Associação Brasileira de Indústrias da Biomassa (ABIB), em 2010 foi produzido no Brasil 16.875.250 toneladas de resíduos de arroz. Considerando uma geração de cerca de 20% de resíduos de casca, apenas na safra 2016-2017 foram produzidos pelo país cerca de 1,4 milhões de toneladas de resíduos, tendo Santa Catarina contribuído com 0,2 milhões de toneladas dessa geração.

A casca de arroz já foi foco de pesquisas como biomassa para a produção de biogás. Porém, em seus estudos, tanto Sawazaki, Teixeira e Moraes (1985) quanto Haider *et al.* (2015) concluíram que esse não foi bom material para a produção de metano. Isso porque, de acordo com Li *et al.* (2013), os resíduos orgânicos que possuem um conteúdo relativamente alto de lignocelulose, como é o caso da casca de arroz, apresentam baixo potencial para a produção de biogás.

2.5.2 Sílica a partir das cinzas de casca de arroz

A valorização da casca de arroz é hoje em dia feita principalmente por meio da sua combustão, onde o calor gerado pela queima da casca é utilizado para a secagem e parboilização do grão, que é considerada por Foletto *et al.* (2005) uma alternativa praticável, viável e ética (DELLA; KÜHN, 2002; FERREIRA, 2013).

Porém, após a combustão da casca de arroz ainda resta sua cinza como resíduo, que contém como componente principal o silício, seguido de potássio, fósforo, ferro, cálcio e pequenas quantidades de magnésio, enxofre e sódio, geralmente nas proporções especificadas na Figura 4.

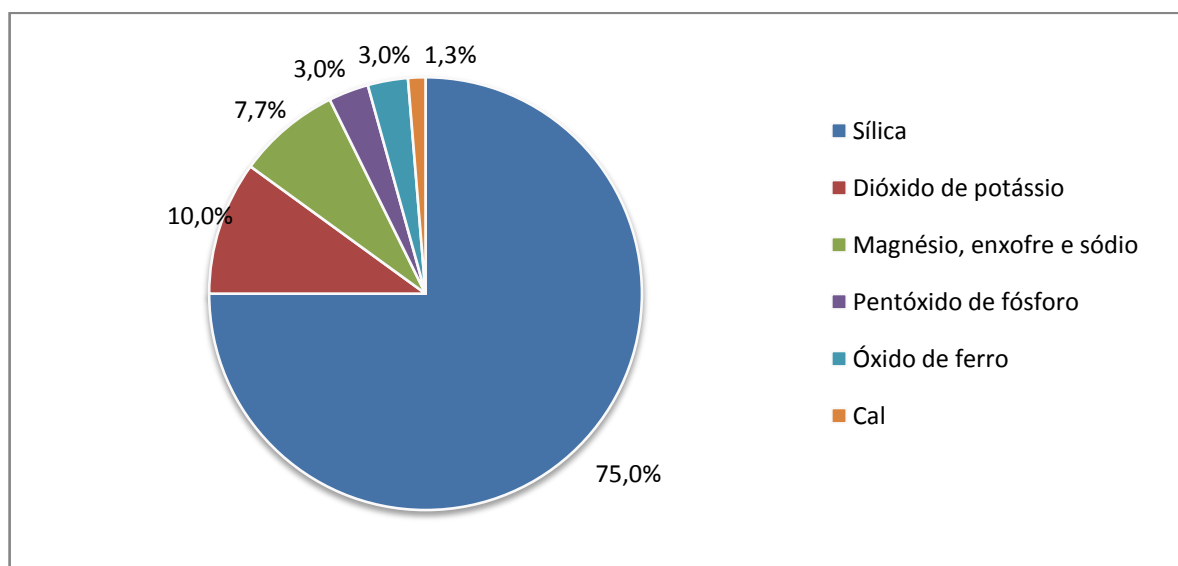


Figura 4 – Composição geral da cinza da casca de arroz
Fontes: Kadam, Forrest e Jacobson (2000) *apud* Finassi.

A cinza da casca de arroz (CCA) é um material de difícil degradação e com pouquíssimos nutrientes para o solo e, se descartado incorretamente, pode causar

danos ao meio ambiente e aos seres humanos (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005; CHAVES *et al.*, 2009). Porém, ao receber um tratamento correto, esse resíduo pode se tornar uma matéria-prima economicamente viável para a obtenção de produtos de valor agregado e com uma ampla gama de aplicações, entre elas, atuar como catalisador (PODE, 2016).

Os catalisadores derivados de resíduos sólidos foram desenvolvidos como uma nova abordagem para agregar valores à resíduos sólidos e reduzir os custos de preparação de catalisadores (GAO *et al.*, 2018).

Por ser rica em sílica, CCA possui uma alta capacidade de adsorção, sendo os meso e macro poros na superfície os responsáveis por ela. Além disso, a CCA possui uma alta área superficial, ideal para o papel de suporte no catalisador. Por meio de um tratamento térmico (700 °C por 6 horas), é possível transformar a cinza de casca de arroz em sílica ativa com alta área superficial (GHOLAMZADEH *et al.*, 2014).

2.6 Projeto de extensão para implantação de um biodigestor de baixo custo

O presente trabalho é correlacionado com o projeto de extensão universitária “Técnica Sem Fronteiras: estudo e implantação de um biodigestor de baixo custo em uma pequena propriedade rural no município de Araranguá/SC”. O referido projeto está em andamento e tem como objetivo principal a implantação de um biodigestor de baixo custo em uma pequena propriedade rural no município de Araranguá, para produção e uso de biogás e biofertilizante, utilizando dejetos de vaca como biomassa.

O projeto também se propõe a disseminar o uso de biodigestores entre os pequenos produtores da região, bem como a ampliação da integração entre o curso de Engenharia de Energia e a comunidade rural da região de Araranguá.

O biodigestor foi planejado e instalado por estudantes da Universidade Federal de Santa Catarina e colaboradores, com o apoio da própria universidade, da organização alemã *Technology Without Borders* (TwB) e da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri).

A propriedade selecionada para a implantação do biodigestor está localizada no bairro Sanga da Areia, a 14 km do centro da cidade. As principais atividades

desenvolvidas na propriedade são a criação de bovinos leiteiros, ordenha das vacas, fabricação de queijos e plantação de silagem e milho para alimentação dos animais.

A propriedade possui no total 25 vacas, com uma média de 350 kg cada uma. A alimentação dos animais corresponde a 10% do seu peso, ou seja, cerca de 30 kg de alimento por dia, sendo 5 kg de ração, 7 kg de feno ou pasto, conforme a disponibilidade e mais 18 kg de silagem.

De acordo com o proprietário, a cada 15 dias são coletados em média 35 carrinhos de dejetos (mistura de dejetos e água), que equivalem a 1.750 L (1,75 m³) (PEREIRA, 2018). Esses dejetos são coletados na sala de alimentação dos animais, durante o restante do período as vacas ficam soltas na propriedade, por esse motivo, o volume dos dejetos coletados não pode ser comparado ao volume de fato excretado pelos animais, pois grande parte dele fica espalhado no pasto.

Após a finalização da construção, uma carga de 1,75 m³ de dejetos e 1,75 m³ de água foi adicionada ao biodigestor. Passados 15 dias, uma nova carga de 1 m³ de dejetos e 1 m³ de água foi inserida no biodigestor foi acompanhada e avaliada (PEREIRA, 2018).

Como produtos da digestão, são obtidos biogás e biofertilizante. O biogás será utilizado pelos proprietários para substituição parcial do GLP, que é necessário para aquecer leite e água, e fazer higienização dos materiais. Já o biofertilizante, que é o dejetos já digerido, será utilizado como substrato para cultivos agrícolas.

O biogás produzido pelo biodigestor instalado foi medido e qualificado, sendo os parâmetros apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do biogás

Parâmetros	Valores
CH ₄ (%)	67,5
CO ₂ (%)	32,5
Poder calorífico superior (MJ/kg)	6,41
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	5,76
Densidade relativa	0,57

Fonte: Paim (2018).

Com o objetivo de aumentar o rendimento de gás do biodigestor instalado, procurou-se estudar e testar alternativas praticáveis, que fossem econômica e

ambientalmente viáveis para atingir uma maior eficiência na produção. Como proposta, surgiu o presente trabalho, com foco na caracterização da biomassa utilizada no biodigestor, bem como no estudo e testes laboratoriais de uso de cinzas de casca de arroz como catalisador para aumentar a produção de biogás.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta do material

Amostras de dejetos bovinos frescos e de biofertilizante foram coletadas nos meses de junho e outubro de 2018, na propriedade onde está instalado o biodigestor relacionado ao projeto “Técnica Sem Fronteiras: estudo e implantação de um biodigestor de baixo custo em uma pequena propriedade rural no município de Araranguá/SC”, conforme previamente descrito na Seção 2.6, localizada no bairro Sanga da Areia, no município de Araranguá/SC.

As amostras de dejetos foram coletadas na entrada do biodigestor em operação (mistura de esterco, urina e água) e foi utilizado como substrato para os experimentos. O biofertilizante (produto secundário da fermentação do dejetos no biodigestor instalado) serviu como inóculo para o experimento, por já possuir uma população de microrganismos típicos da digestão anaeróbia, tendo como objetivo acelerar o início do processo da digestão dos reatores em escala laboratorial (XAVIER; JÚNIOR, 2010; UNIVATES, 2015).

Após a coleta, as amostras foram embaladas em potes plásticos resistentes e acondicionadas no refrigerador a 4 °C até o momento da execução dos experimentos.

As cinzas de casca de arroz utilizadas nesses experimentos foram coletadas no município de Morro da Fumaça/SC e, posteriormente, moídas em moinho de bolas durante 20 minutos, com granulometria de 0,227 µm (FERRO, 2018). A sílica utilizada foi adquirida comercialmente, sendo Sílica Gel 60, com granulometria de 0,05-0,2 mm, da marca Vetec.

3.2 Caracterização do substrato e do inóculo

Para a caracterização do dejetos bovino e do inóculo, foram realizados ensaios para determinação dos sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis e medição do pH.

A determinação dos teores de sólidos totais, sólidos fixos, e sólidos voláteis foi realizada em uma das amostras de dejetos. Em uma segunda amostra de dejetos e de inóculo foram determinados apenas os sólidos totais.

Para os reatores R11, R12 e R13 (tal como descritos nos itens 3.3 e 3.4) foram também determinados seus teores de sólidos totais antes do início dos testes e novamente após a finalização do teste em cada reator para avaliação do percentual da matéria orgânica degradada após a digestão.

A medição do pH foi realizada duas vezes para cada reator, usando-se fita indicadora de pH, no início e ao final da sua operação.

3.2.1 Sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos

De acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1997), o ensaio da série de sólidos considera diferentes frações de sólidos, que diferem entre si em tamanho de partícula e volatilidade.

Por definição, Sólidos Totais (ST) é o termo utilizado para indicar o material remanescente após a evaporação da fração líquida de uma amostra líquida, sólida ou semi-sólida. Os Sólidos Fixos (SF) se referem ao resíduo dos ST, suspensos ou dissolvidos após a calcinação. E por fim, os Sólidos Voláteis (SV) se referem à perda de peso durante a calcinação (WILDER *et al.*, 1997).

É importante salientar que as determinações de SF e SV não define de forma precisa as quantidades de matéria orgânica e inorgânica da amostra, pois a perda pela combustão inclui também perdas devido à decomposição ou volatilização de alguns sais minerais (WILDER *et al.*, 1997).

O teor de ST é encontrado pela diferença entre o peso total da amostra e o seu conteúdo de umidade, indicando a quantidade de matéria mineral e orgânica presente na amostra (CASTRO; CORTEZ, 1998; PEREIRA, 2013).

Para sua determinação, uma amostra do material fresco foi adicionada a um cadinho e pesada em balança digital, levada à estufa em temperatura de 105 °C até atingir massa constante. Após o resfriamento, foi novamente pesada. O teste foi feito em duplicata, usando dois cadinhos para cada amostra. Os valores obtidos foram utilizados para calcular o teor de ST da amostra por meio da Equação (1) (WILDER *et al.*, 1997).

$$ST = \frac{(A-B) \times 100}{C-B} \quad (1)$$

Onde:

ST: Teor de Sólidos Totais (%)

A: Tara do cadinho + massa seca de amostra (g)

B: Tara do cadinho (g)

C: Tara do cadinho + massa úmida de amostra (g)

Os SF expressam a fração dos ST que permanece como cinza após sua calcinação, ou resíduo da calcinação, podendo ser determinado pela Equação 3, representando a diferença entre SV e ST (PEREIRA, 2013; WILDER *et al.*, 1997).

Para a determinação dos teores de SF e SV do dejetado, a amostra resultante do teste anterior foi levada a uma mufla a 800°C durante 2 horas e então calculado pela Equação 2 e pela Equação 3 (LAMIM *et al.*, 1996; WILDER *et al.*, 1997).

$$SF = \frac{(D-B) \times 100}{A-B} \quad (2)$$

Onde:

SF: Teor de Sólidos Fixos (%)

A: Tara do cadinho + massa seca de amostra (g)

B: Tara do cadinho (g)

D: Tara do cadinho + cinzas secas da amostra (g)

A fração de massa perdida durante a calcinação é chamada de SV (WILDER *et al.*, 1997). É o resultado da subtração entre os ST e os SF, utilizada para expressar a fração orgânica da biomassa, já que a matéria orgânica pode ser volatilizada (SPERLING, *apud* BUENO, 2010). Segundo Nishimura (2009), quanto maior a quantidade de SV na alimentação diária do biodigestor, maior será sua capacidade para a produção de biogás.

$$SV = \frac{(A-D) \times 100}{A-B} \quad (3)$$

Onde:

SV: Teor de Sólidos Voláteis (%)

A: Tara do cadinho + massa seca de amostra (g)

B: Tara do cadinho (g)

D: Tara do cadinho + cinzas secas da amostra (g)

Os testes para a obtenção dos valores de ST, SF e SV foram realizados em duplicata para cada amostra testada.

A Figura 5 apresenta, de forma geral, as etapas dos testes para a determinação de ST, SF e SV.

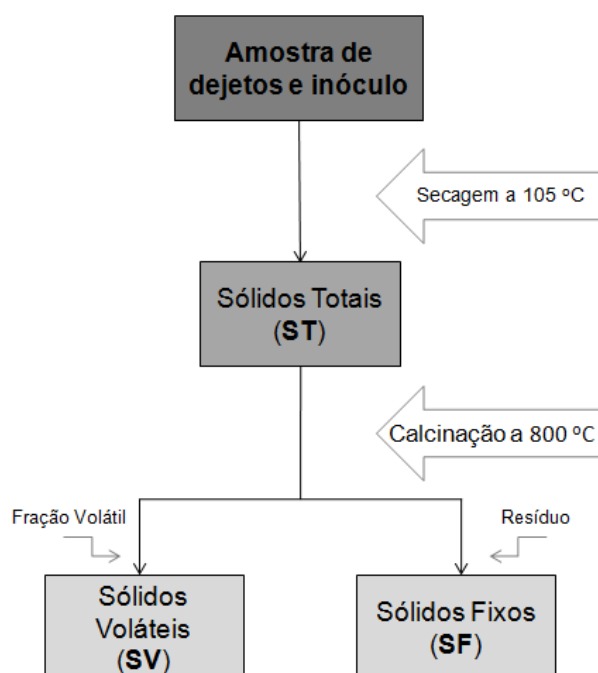


Figura 5 – Diagrama da determinação da série de sólidos

Fonte: Adaptado de <<http://www.c2o.pro.br/analise_agua/a1833.html>>.

3.2.2 pH

A acidez ou alcalinidade de uma solução é frequentemente expressa pelo seu pH (potencial hidrogeniônico). Quanto menor seu valor, maior a acidez (ROSENBERG; EPSTEIS, 2008). De acordo com Sperling (1996), os processos de oxidação biológica normalmente tendem a reduzir o pH.

Uma maneira comum de determinar o pH de uma solução é mediante o uso de indicadores, que são substâncias que mudam de cor de acordo com o pH. A mudança de cor ocorre em determinados intervalos de pH, denominados faixa ou intervalo de viragem. Quando o valor do pH é inferior ao intervalo de viragem, temos

uma cor, quando o valor é superior ao intervalo, temos outra cor, e na faixa de viragem temos uma cor intermediária às duas (USBERCO; SALVADOR, 2002).

Para testar a acidez ou alcalinidade da solução do reator foram utilizadas fitas de pH da marca MColorpHast™. Foram recolhidas duas amostras da mistura de água, dejetos, inóculo, cinza ou sílica gel para, uma antes do início do teste e outra após a sua finalização. A fita de identificação de pH foi mergulhada na amostra e após alguns segundos, observada sua mudança de cor e comparada com o gabarito de cores indicativas.

3.3 Montagem dos reatores

Biorreatores experimentais foram confeccionados utilizando-se frascos de vidro com capacidade de 250 ml cada um, que serviram como fermentadores. Os frascos foram tampados hermeticamente e tiveram um tubo fixado em sua tampa, pelo qual o biogás produzido foi recolhido e transferido para outro frasco, chamado de coletor de gás.

O coletor de gás consistiu em um frasco de vidro, também com capacidade de 250 ml, preenchido com água. Em sua tampa, foram conectadas duas mangueiras, uma para a entrada de biogás no coletor e outra para a saída de água. A Figura 6 apresenta o diagrama esquemático dos biorreatores confeccionados.

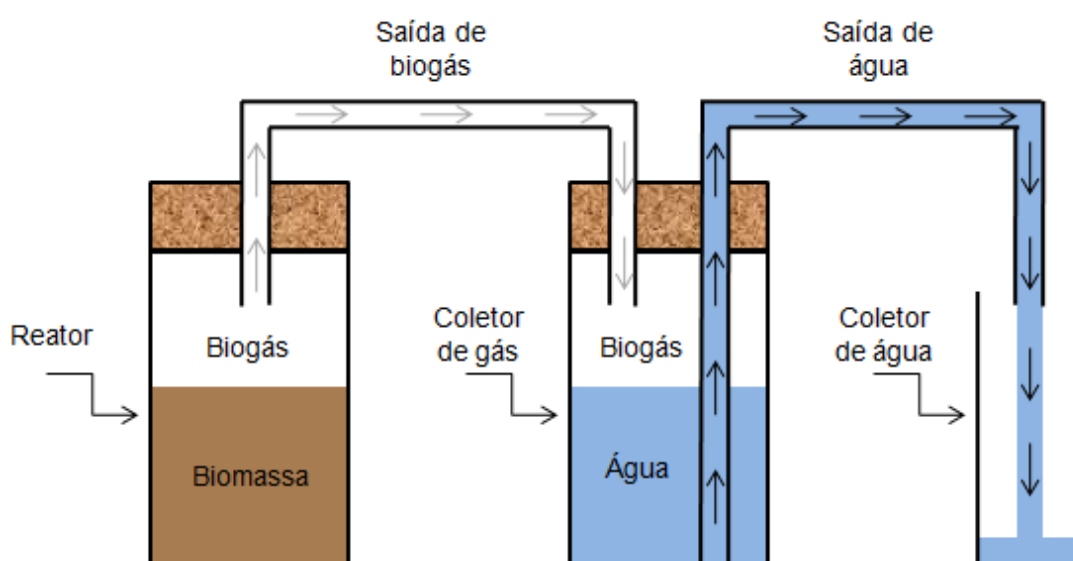


Figura 6 - Diagrama esquemático dos biorreatores confeccionados

Fonte: Baseado em Salam, Biswas e Rabbi (2015).

Quando o biogás começa a ser produzido no reator ele passa pela mangueira e entra no coletor de gás, então, a água que está armazenada nesse tanque é empurrada para fora dele e coletada em um frasco, que chamamos de coletor de água.

3.4 Operação dos reatores

No total, 13 (treze) reatores foram abastecidos com dejetos, inóculo, água, sílica comercial ou cinza de casca de arroz, sendo nomeadas sequencialmente R1 a R13.

Em razão de as duas amostras de dejetos terem sido coletadas em oportunidades diferentes (uma em junho e outra em outubro de 2018), seus teores de ST e de umidade também mudaram devido aos fatores como alimentação do animal, idade, manejo, etc. Para que a produção de biogás não sofresse influência devido a essas diferenças entre os materiais coletados, os volumes de água e dejetos foram ajustados para que esse teor pouco variasse entre os testes.

A quantidade de inóculo adotada foi de 40% (em volume) em todos os reatores devido aos estudos prévios de Xavier e Júnior (2010), que obtiveram em seus experimentos maior produção de biogás ao utilizar essa quantidade de material, que também foi obtido de um biodigestor indiano operado com dejetos de vacas leiteiras.

Todos os reatores tiveram um TRH de 10 dias, e operaram com volume de 200 ml e um *headspace* de 50 ml em cada reator. Dois testes foram realizados, conforme a descrição a seguir.

3.4.1 Primeiro teste

No primeiro teste, 10 (dez) reatores (R1 a R10) receberam uma mistura de dejetos, inóculo e água, conforme a necessidade, de forma que ao final do abastecimento tiveram um percentual de 6,0% de sólidos totais (em base mássica).

Os reatores R1 e R6 serviram como controle, de forma que não receberam adição de catalisador. Os reatores R2 e R7 receberam, adicionalmente, 1 g de sílica comercial. Os reatores R3 e R8 receberam 1g de CCA, R4 e R9 receberam 1,25g de CCA, e R5 e R10 receberam de CCA.

Os reatores R1, R2, R3, R4 e R5 foram operados a temperatura ambiente, com máxima de 30 °C e mínima de 8 °C. Os reatores R6, R7, R8, R9 e R10 foram operados a temperatura controlada a 40 °C, por meio de banho-maria, para investigar também a influência da temperatura na produção de biogás.

Os detalhes do abastecimento e parâmetros de operação dos reatores avaliados no primeiro teste foram descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de operação e composição dos reatores durante o primeiro teste

Reator	Temperatura	ST (%)	Sílica comercial	CCA (g)	Volume (ml)
R1	Ambiente (25 °C)	6,0	-	-	200
R2	Ambiente (25 °C)	6,0	4,0g/L	-	200
R3	Ambiente (25 °C)	6,0	-	4,0g/L	200
R4	Ambiente (25 °C)	6,0	-	5,0g/L	200
R5	Ambiente (25 °C)	6,0	-	6,0g/L	200
R6	40 °C	6,0	-	-	200
R7	40 °C	6,0	4,0g/L	-	200
R8	40 °C	6,0	-	4,0g/L	200
R9	40 °C	6,0	-	5,0g/L	200
R10	40 °C	6,0	-	6,0g/L	200

Fonte: A autora.

Desai e Madamwar (1994) realizaram estudos sobre o efeito da adição de sílica sobre a produção de biogás. Esses autores obtiveram um aumento máximo na produção de biogás ao adicionar aos seus digestores 4 g/L de sílica gel. Portanto, essa foi a quantidade de sílica comercial adicionada aos reatores R2 e R7.

Aos reatores R4 e R9 foram adicionados 1,25 g de CCA com o objetivo de manter uma quantidade final de 1g de sílica. Já que a cinza de casca de arroz, sem qualquer tipo de tratamento (apenas moída) é composta de 75% em massa sílica (KADAM; FORREST; JACOBSON, 2000).

As concentrações de CCA foram alteradas para os reatores R3 e R8, que receberam 1,0 g cada um, e para os reatores R5 e R10, que receberam 1,5 g cada. Essa alteração teve o objetivo de avaliar a influência de uma menor e maior concentração de CCA na produção de biogás.

Desse modo, os reatores com adição de sílica comercial foram operados para fins comparativos, juntamente aos reatores sem adição de nenhum catalisador, para servirem como controle negativo dos experimentos.

3.4.3 Segundo teste

No segundo teste foram operados 3 (três) reatores (R11, R12 e R13). Estes reatores foram operados nas mesmas condições do reator R8.

A finalidade desse teste foi repetir os parâmetros utilizados no reator R8, que mostrou melhor produção de biogás no primeiro teste, tendo-se como objetivo diminuir os erros relacionados ao experimento e obter um resultado mais confiável.

Todos os reatores foram abastecidos com dejetos, inóculo, água e CCA de modo que tivessem 6,0% de sólidos totais. Os mesmos operaram a 40 °C com a temperatura controlada por banho-maria.

Os detalhes do abastecimento e os parâmetros de operação dos reatores avaliados no segundo teste foram descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de operação e composição dos reatores durante o segundo teste

Reator	Temperatura (°C)	ST (%)	CCA (g)	Volume (ml)
R11	40	6,0	4,0g/L	200
R12	40	6,0	4,0g/L	200
R13	40	6,0	4,0g/L	200

Nota: Os teores de ST foram estimados a partir dos dados de ST indicados na Tabela 7.

Fonte: A autora.

3.5 Medição do biogás gerado

Durante os 10 (dez) dias de operação dos reatores, o volume de biogás gerado por cada reator foi medido por meio do método de deslocamento de água dado que o volume do biogás que entra no coletor de gás é equivalente ao volume de água recolhida no coletor de água. Conseqüentemente, determinou-se a produção diária de biogás.

O volume da água deslocada foi medido uma vez ao dia com o auxílio de uma proveta quando o volume de gás gerado deslocava mais que 20 ml de água, ou com

o auxílio de uma pipeta quando o volume era menor que 20 ml, podendo ter assim um resultado mais preciso. Os resultados foram anotados e apresentados graficamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do substrato e do inóculo

4.1.1 Sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis

A Tabela 7 apresenta os teores dos ST, SF e SV de cada amostra de dejetos e inóculo coletada na propriedade rural.

Tabela 7 – Teores de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis das amostras de dejetos e inóculo coletada

Fração do sólido	Amostra 1 de dejetos	Amostra 2 de dejetos	Amostra de Inóculo
ST (%)	17,67	8,66	1,97
SV (%)	58,67	-	-
SF (%)	41,33	-	-

Nota 1: O percentual da fração dos sólidos é dado em base mássica (g/g)

Nota 2: Os testes foram realizados em duplicata

Fonte: A autora.

De acordo com Junqueira (2014), quanto maior a concentração de SV da biomassa, maior será a produção de biogás já que essa será a fração fermentada. A redução da concentração de SV é indicativa da fração orgânica da biomassa degradada durante a digestão, possibilitando avaliar o potencial da produção de biogás.

O teor de ST da Amostra 1 de dejetos, de 17,67%, está acima dos padrões encontrados na literatura, que varia entre 12,90% para uma vaca em período de lactação e 8,21% para uma vaca em período seco, de acordo com Lemos da Silva e Costa (2018). Já a Amostra 2, com 8,66%, apresentou um valor mais próximo dos encontrados em dejetos de vacas secas.

Essa variação na quantidade de ST entre as duas amostras pode ocorrer devido a fatores como idade e alimentação dos animais, e nesse caso, principalmente devido ao manejo dos dejetos (SANTOS; NOGUEIRA, 2012). O fato de que os dejetos foram coletados na entrada do biodigestor e terem sofrido uma prévia diluição em água, é um fator importante para a variação na quantidade de

sólidos totais entre as duas amostras coletadas, já que uma amostra pode ter recebido uma maior quantidade de água que a outra.

Os teores de SV da Amostra 1 de dejetos bovinos representaram 58,67% em relação aos teores de sólidos totais, antes de passarem pelo processo de digestão. Esse valor está abaixo do comumente encontrado na literatura, que é cerca de 80% (ALVAREZ; LIDÉN, 2009; AMARAL *et al.*, 2004), porém é justificado devido a esses valores estarem referenciando amostras de esterco (fração sólida), sendo assim, espera-se um valor menor ao avaliar uma amostra de dejetos (misturada com urina) e diluída em água.

As informações apresentadas na Tabela 7 foram necessárias para estabelecer as quantidades de dejetos, água e inóculo necessárias para manter um mesmo percentual de ST em todos os reatores e condições testadas (primeiro e segundo teste).

4.1.2 Variação do pH

Os valores de pH iniciais e finais em todos os reatores medidos apresentaram valores próximos a 8. Como realizou-se análise quantitativa por meio da fita de pH, seus resultados são aproximados, já que o resultado depende da observação e comparação visual com as escalas fornecidas pelo fabricante. Para um valor mais preciso seria ideal utilizar um pHmetro.

Khalid *et al.* (2011) concluíram em seus estudos sobre a digestão anaeróbia que o pH ótimo para a metanogênese está em torno de 7,0. Considerando isso, pode-se dizer que os resultados podem ser melhorados se for feita a correção do pH nos biorreatores.

4.2 Efeito da adição de sílica e CCA sobre a produção de biogás

Na Figura 7 foram representados os volumes cumulativos de biogás produzidos a temperatura ambiente nos reatores R1 a R5, acompanhados por um período de período de 10 dias.

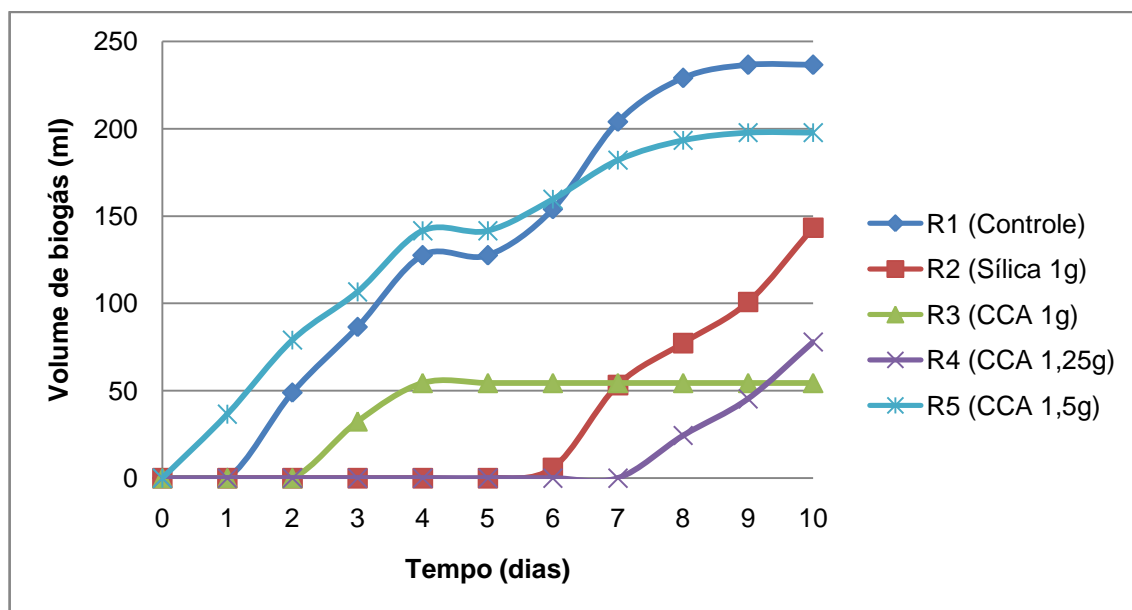


Figura 7 - Produção de biogás a temperatura ambiente.

Fonte: A autora.

Observou-se que o reator R1, sem adição de catalisador, foi o que produziu o maior volume de gás (236,5 ml). Sendo assim, em relação à quantidade de gás gerado e dentre as quantidades de sílica e CCA testadas, não é perceptível a necessidade do uso de catalisador ao operar um biodigestor a temperatura ambiente.

Em relação à concentração de CCA, observa-se que quanto maior a concentração, maior a quantidade de gás gerado. O reator R5 (1,5 g) foi o que apresentou uma maior produção de gás, seguido de R4 (1,25 g) e R3 (1 g). Mesmo que a adição da CCA não tenha apresentado a melhor produção absoluta, com esse resultado, abre-se a possibilidade para uma investigação quanto à adição de uma concentração maior que 1,5 g de CCA.

Por outro lado, a adição de 1,5 g de CCA diminuiu o tempo de início de produção de biogás em relação aos outros reatores, que foi imediato para R5, 1 (um) dia para R1, 2 (dois) dias para R3, 6 (seis) dias para R2 e 7 (sete) dias para R4. Mostrando que apesar de não ter apresentado uma maior quantidade de gás gerada, o reator R5, com adição de 1,5 g de CCA, permitiu uma produção de gás mais rápida quando comparada a todos os demais reatores.

Na Figura 8 estão representados os volumes cumulativos de biogás produzidos pelos reatores R6 a R10 operados a 40 °C, acompanhados por um período de 10 dias.

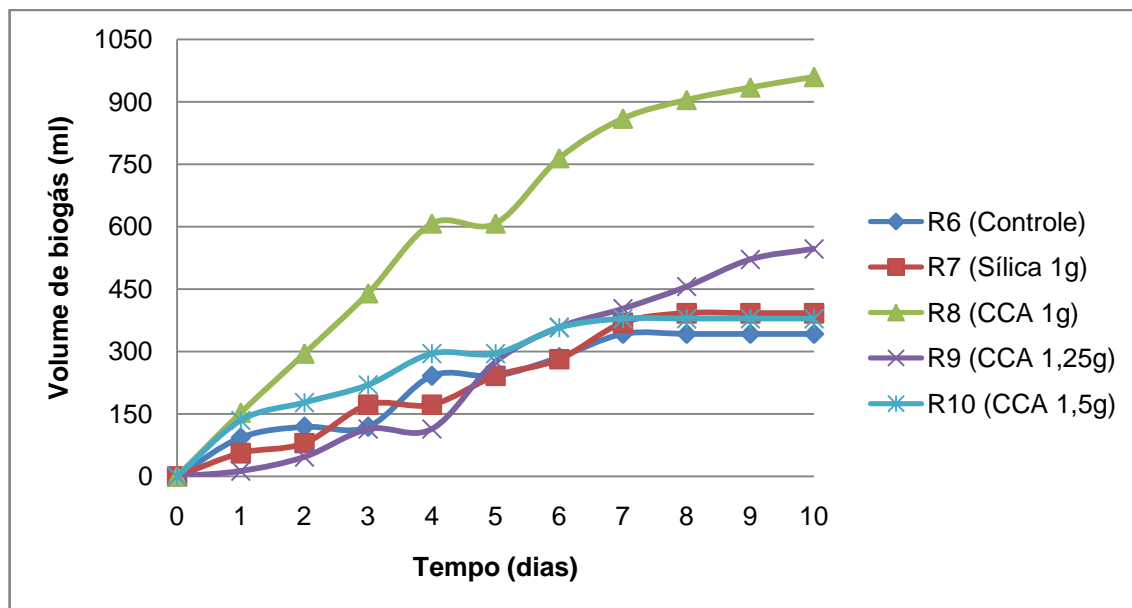


Figura 8 - Produção de biogás a temperatura de 40 °C

Fonte: A autora.

Nesses ensaios observou-se que o reator R8, com adição de 1 g de cinza de casca de arroz, foi o que atingiu a maior produção de biogás (959,5 ml), que foi 305,7% maior que o valor alcançado no reator R1 (melhor produção a 25 °C).

Os reatores operados à 40 °C tiveram o tempo de início de produção de biogás menor quando comparados aos reatores operados em temperatura ambiente, exceto ao R5, que também produziu biogás imediatamente.

Por outro lado, é possível observar que o aumento da concentração de CCA resultou na diminuição da produção de biogás. Ou seja, considerando apenas os reatores que receberam a adição de CCA, o reator R8 (1 g de CCA) apresentou maior produção, seguido de R9 (1,25 g de CCA) e R10 (1,5 g de CCA).

Considerando que entre os nutrientes mais importantes para a vida dos microrganismos estão alguns elementos como nitrogênio, enxofre, fósforo e ferro, os quais fazem parte da composição da CCA, é possível relacionar o aumento da produção de biogás ao atendimento nutricional das bactérias (KADAM; FORREST; JACOBSON, 2000; TORTORA; FUNKE; CASE, 2012).

Esse resultado abre espaço para uma investigação mais detalhada quanto à adição de uma menor concentração de CCA, para constatar a possibilidade de uma produção maior do que quando adicionado 1g de CCA.

Conforme descrito no item 3.4.3, foram repetidos testes utilizando os reatores contendo 1 g de CCA a 40 °C (reatores R11, R12 e R13), para obtenção de um valor

mais preciso, com menor erro experimental. Os resultados demonstram que, dos três reatores operados, a produção média de biogás foi de $591,0 \pm 75,1$ ml (Figura 9).

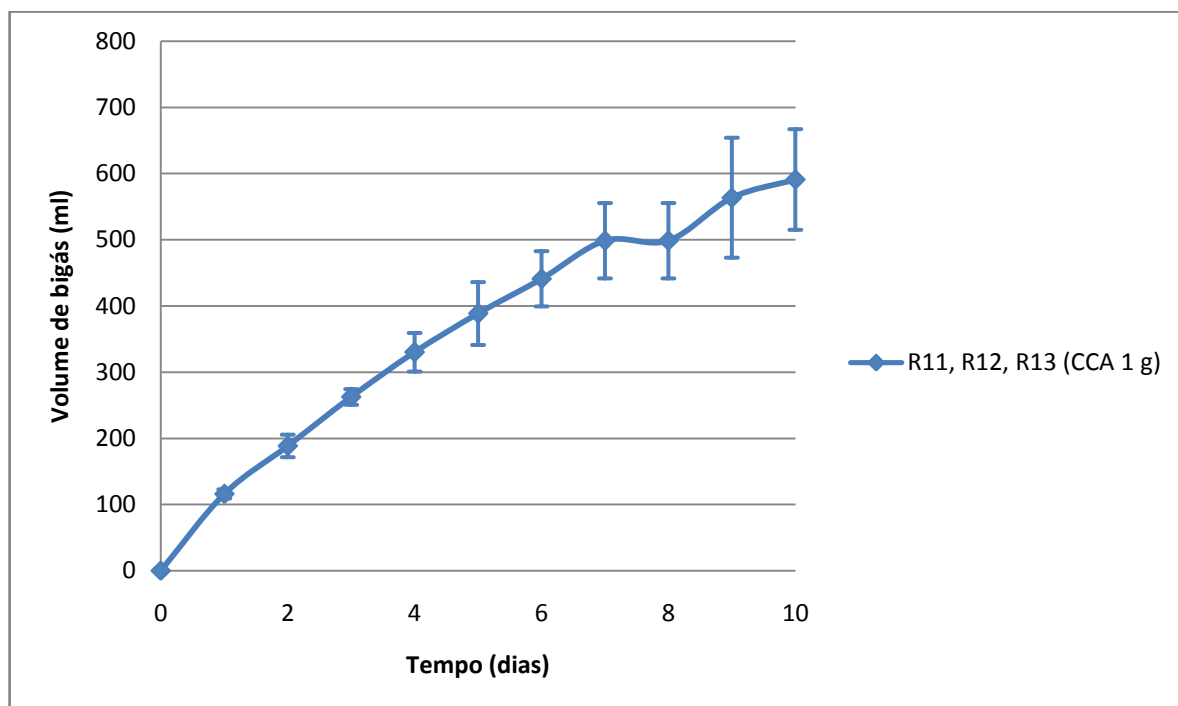


Figura 9 - Produção de biogás a temperatura de 40 °C

Fonte: A autora.

O volume de biogás produzido pelos reatores R11, R12 e R13 (representados na Figura 9) é menor que o volume produzido pelo reator R8 (representado na Figura 8). Embora tenha sido tomado o cuidado de manter o teor de sólidos totais o mais próximo possível em todos os reatores testados (6% em base mássica), o uso de um substrato (dejeito) diferente nos dois testes pode ser um fator que influenciou na diferença de produção de biogás entre os reatores.

A Tabela 9 mostra, numericamente, a produção de biogás para todos os reatores testados, nas suas respectivas temperaturas.

Tabela 9 - Produção total de biogás das diferentes amostras após 10 dias de digestão a temperatura ambiente e a 40 °C

Amostra	Produção de biogás (ml)	
	Temperatura ambiente	Temperatura de 40 °C
Controle	236,5	342,5
Sílica comercial 1,0 g	143,3	392,0
Cinza casca arroz 1,0 g	54,5	593,7±214,0*
Cinza casca arroz 1,25 g	77,9	546,6
Cinza casca arroz 1,5 g	197,7	378,8

* Produção média de biogás nos reatores R8, R11, R12 e R13 (Média ± Desvio Padrão)

Fonte: A autora.

Com base na Tabela 9, é possível observar que o aumento da temperatura provocou o aumento na produção de biogás em todos os reatores, quando comparado à temperatura ambiente.

Na temperatura de 40 °C, a melhor produção de gás se deu ao utilizar uma concentração de 1 g de cinza de casca de arroz. Nessa condição, houve uma produção 151,06% maior, quando comparada à melhor produção na temperatura ambiente, que ocorreu sem catalisador. Ao se comparar com a mesma concentração de CCA na temperatura ambiente, o aquecimento dos reatores proporcionou um aumento 989,45% na produção.

Esses resultados permitem sugerir que o uso de CCA como catalisador na produção de biogás se mostra promissor ao utilizar reatores a temperatura controlada em 40 °C, pois além de aumentar a produção de biogás se está valorando um resíduo.

Sendo assim, seria possível obter uma maior produção de biogás com a adição CCA e aquecimento do biodigestor instalado em campo. Esse aquecimento pode ser feito utilizando o próprio biogás gerado pelo biodigestor, porém, é necessário avaliar se a parcela de gás empregada no aquecimento justificaria o aumento da produção de biogás.

Sugere-se uma investigação mais detalhada quanto às melhores concentrações de catalisador e temperaturas para tirar vantagem do uso de CCA como catalisador para tal finalidade.

Por exemplo, um aumento da concentração de CCA a temperatura ambiente, já que a produção de biogás ao utilizar 1,5 g de CCA ficou apenas 19,62% abaixo da

melhor produção (sem catalisador). Outra possibilidade seria o uso de uma concentração de CCA menor que 1 g a temperatura de 40 °C dado que com o aumento da concentração houve uma diminuição da produção de biogás.

5. CONCLUSÃO

Os biodigestores em escala laboratorial são capazes de reproduzir, em partes, um modelo a ser implantado em escala real, ajudando na previsão de possíveis adversidades vinculadas a sua instalação e operação. Adicionalmente viabilizam a investigação da produção de biogás utilizando diferentes tipos de substratos, catalisadores ou variadas temperaturas, com maior facilidade de controle e operação. No entanto, demandam atenção devido a um aumento da sensibilidade quando comparado a uma escala maior. Um pequeno vazamento, por exemplo, pode influenciar de maneira brusca os resultados finais dos experimentos.

Com os resultados dos experimentos para avaliação da produção de biogás a partir de dejetos de vaca leiteira como substrato e uso de cinzas de casca de arroz como catalisador, conclui-se que a adição do catalisador ao digestor se mostrou como uma alternativa viável para aumentar a produção de biogás na temperatura de 40°C.

A operação a temperatura de 40°C não só aumentou a produção de biogás em 151,06% quando comparada à melhor produção na temperatura ambiente, como também diminuiu o tempo de partida dos biodigestores, sendo esse um fator importante por permitir uma produção de biogás mais rápida, além de um aumento direto no volume de biogás produzido.

Com os resultados obtidos é perceptível o potencial de utilização dos dejetos para fins energéticos, permitindo incorporar ainda mais valor às atividades agropecuárias em função da possibilidade de redução de custos na propriedade, no que se refere aos gastos com gás para operação de cocção normalmente mantidas com GLP e manejo de dejetos. Além da promoção do uso da cinza de casca de arroz, tratada como um resíduo da rizicultura, possibilitando também vantagens econômicas e ambientais no gerenciamento desse material.

REFERÊNCIAS

- ABUBAKAR, B.; ISMAIL, N. Anaerobic digestion of cow dung for biogas production. v. 7, n. 2, p. 169–172, 2012.
- AHAMED, J. U. et al. Production of biogas from anaerobic digestion of poultry droppings and domestic waste using catalytic effect of silica gel. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, v. 13, n. 2, p. 3503–3517, 2016.
- ALFA, I. M. et al. Comparative evaluation of biogas production from Poultry droppings, Cow dung and Lemon grass. **Bioresource Technology**, v. 157, p. 270–277, 2014.
- ALVARENGA, R. C. Cultivo do Milho. p. 4–9, 2011.
- ALVAREZ, R.; LIDÉN, G. Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 527–533, 2009.
- AMARAL, C. M. C. DO et al. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Ciência Rural**, v. 34, n. 6, p. 1897–1902, 2004.
- ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. p. 153 p.: il., 2002.
- BARANA, D. et al. Biorefinery process for the simultaneous recovery of lignin, hemicelluloses, cellulose nanocrystals and silica from rice husk and *Arundo donax*. **Industrial Crops and Products**, v. 86, p. 31–39, 2016.
- BARROS, R. M. et al. Estudo da produção de biogás da digestão anaeróbia de esterco bovino em um biodigestor. **Revista Brasileira de Energia**, v. 15, n. 2, p. 95–116, 2009.
- BAVUTTI, M. et al. Thermal stabilization of digesters of biogas plants by means of optimization of the surface radiative properties of the gasometer domes. **Energy Procedia**, v. 45, p. 1344–1353, 2013.
- BUENO, R. DE F. Comparação entre biodigestores operados em escala piloto para produção de biogás alimentado com estrume bovino. **Holos Environment**, v. 10, n. 1, p. 111–125, 2010.
- CALZA, L. F. et al. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, v. 4430, p. 990–997, 2015.
- CARNEIRO, D. R. C. **Viabilidade técnica e económica de uma unidade centralizada de co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos**. [s.l.] Universidade do Porto, 2009.
- CASTRO, L. R. DE; CORTEZ, L. A. B. Influência da temperatura no desempenho de biodigestores com esterco bovino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. v.2, n. n.1, p. 97–102, 1998.

CHAVES, T. F. et al. Uso da cinza da casca do arroz (CCA) obtida da geração de energia térmica como adsorvente de zn(II) em soluções aquosas. **Química Nova**, v. 36, n. 6, p. 1378–1383, 2009.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para Energia**. [s.l: s.n.].

CÔTÉ, C.; MASSÉ, D. I.; QUESSY, S. Reduction of indicator and pathogenic microorganisms by psychrophilic anaerobic digestion in swine slurries. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 4, p. 686–691, 2006.

DELLA, V. P.; KÜHN, I. **Obtenção de sílica de alta pureza a partir do tratamento da cinza de casca de arroz**. João Pessoa - PB: II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2002

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de resíduos agro-industriais: Cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n. 2, p. 22–25, 2005.

DESAI, M.; MADAMWAR, D. Anaerobic digestion of a mixture of cheese whey, poultry waste and cattle dung: A study of the use of adsorbents to improve digester performance. **Environmental Pollution**, v. 86, n. 3, p. 337–340, 1994.

DOTTO, R. B.; WOLFF, D. B. Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos. **Disciplinarum Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas**, v. 13, n. 1, p. 13–26, 2012.

ECKERT, C. T. et al. Construção de biodigestores de batelada para escala laboratorial. n. 2, p. 65–82, 2015.

EHRlich, H. et al. Modern views on desilicification: biosilica and abiotic silica dissolution in natural and artificial environments. **Chemical Review**, v. 110, p. 4656–4689, 2012.

EMBRAPA; INTELECTUS. Indicadores Leite e Derivados. **Indicadores Leite e derivados**, v. 72, n. 81, p. 19, 2017.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 91, n. 1, p. 11–17, 1994.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. DA. **Manual prático para a compostagem de biossólido** Universidade Estadual de Londrina, , 1999.

FERREIRA, M. J. **Obtenção de silicato de sódio por lixívia alcalina a partir da cinza da casca de arroz para uso como defloculante**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

FERRO, J. K. C. **Indigo Carmine Removed Using Geopolymers From Rice Husk Ash as Adsorbent**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

FOLETTTO, E. L. et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, v. 28, n. 6, p. 1055–1060, 2005.

GAO, Y. et al. A review of recent developments in hydrogen production via

biogas dry reforming. **Energy Conversion and Management**, v. 171, n. April, p. 133–155, 2018.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

GHOLAMZADEH, P. et al. Silica functionalized propyl sulfonic acid (SiO₂-Pr-SO₃H): An efficient catalyst in organic reactions. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**, v. 391, p. 208–222, 2014.

GUARINO, G. et al. Does the C/N ratio really affect the Bio-methane Yield ? A three years investigation of Buffalo Manure Digestion. **Chemical Engineering Transactions**, v. 49, p. 463–468, 2016.

HAIDER, M. R. et al. Effect of mixing ratio of food waste and rice husk co-digestion and substrate to inoculum ratio on biogas production. **Bioresource Technology**, v. 190, p. 451–457, 2015.

HILLS, D. J. Effects of carbon: Nitrogen ratio on anaerobic digestion of dairy manure. **Agricultural Wastes**, p. 267–278, 1979.

HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 22, p. 5478–5484, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Produção da pecuária municipal. v. 43, p. 1–49, 2015.

IUPAC Compendium of Chemical Terminology. **Chemical Engineer**, v. 2291, n. 721, p. 2, 2001.

JIANG, A. et al. Evaluation of an integrated ammonia stripping, recovery, and biogas scrubbing system for use with anaerobically digested dairy manure. **Biosystems Engineering**, v. 119, p. 117–126, 2014.

JÚNIOR, M. A. P. O.; ORRICO, A. C. A.; JÚNIOR, J. DE L. Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 546–554, 2010.

JUNQUEIRA, S. L. C. D. **Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

KADAM, K. L.; FORREST, L. H.; JACOBSON, W. A. Rice straw as a lignocellulosic resource: Collection, processing, transportation, and environmental aspects. **Biomass and Bioenergy**, v. 18, n. 5, p. 369–389, 2000.

KARLSSON, T. et al. **Manual Básico de Biogás**. 1a Edição ed. Lajeado: Editora Univates, 2014.

KHALID, A. et al. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, v. 31, n. 8, p. 1737–1744, 2011.

LAMIM, S. S. M. et al. Caracterização química e físico-química de vermicomposto de esterco bovino e avaliação da adsorção competitiva por cádmio e chumbo. n. Abril 1996, 1996.

LEMOS DA SILVA, K.; COSTA, R. P. **Tecnologias de produção mais limpa e aproveitamento econômico dos resíduos da produção de bovinos de corte e leite em sistemas confinados.** [s.l: s.n.].

LI, Y. et al. Evaluating methane production from anaerobic mono- and co-digestion of kitchen waste, corn stover, and chicken manure. **Energy and Fuels**, v. 27, n. 4, p. 2085–2091, 2013.

LI, Y.; PARK, S. Y.; ZHU, J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 821–826, 2011.

LIMA, R. B. **Processo para a produção de carvão ativo a partir do subproduto resultante da lixívia alcalina da cinza da casca do arroz.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

MAAMRI, S.; AMRANI, M. Biogas production from waste activated sludge using cattle dung inoculums: Effect of total solid contents and kinetics study. **Energy Procedia**, v. 50, p. 352–359, 2014.

MADAMWAR, D. B.; MITHAL, B. M. Effect of pectin on anaerobic digestion of cattle dung. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 28, n. 4, p. 624–626, 1986.

MARTINS, O. S. Aproveitamento da Biomassa para a Geração de Energia Elétrica. n. February 2017, p. 0–31, 2004.

MENDONÇA, E. F. **Tratamento anaeróbio de efluentes oriundos da bovinocultura de leite em biodigestor tubular.** [s.l.] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2009.

METZ, H. L. **Biofertilizante em escolas situadas em meios urbanos.** [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2013.

MUSSATTO, S. I.; ROBERTO, I. C. Produção biotecnológica de xilitol a partir da palha de arroz. **Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento**, v. 28, n. Abril 2014, p. 34–39, 2002.

NI, M. et al. An overview of hydrogen production from biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 87, n. 5, p. 461–472, 2006.

NISHIMURA, R. Análise de balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suínos: implementação de aplicativo computacional. p. 97, 2009.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003. v. 2

NWAUKWU IA, O. I. Generation of Biogas from Cow Dung. **Journal of Bioremediation & Biodegradation**, v. 5, n. 2, p. 2–4, 2014.

OCDE; FAO. Brazilian agriculture: prospects and challenges. **OECD-FAO**

Agricultural Outlook 2015, p. 61–108, 2015.

OLIVEIRA, R. D. E. Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbica de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono. **trabalho de conclusao de curso .Universidade sao paulo**, p. 13–35, 2009.

OLIVEIRA, F. S. DE. **Ganhos ambientais e energéticos com a utilização da biomassa residual de gado leiteiro em Lagoa da Prata - MG**. [s.l.] Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2010.

OLUPOT, P. W. et al. Characterization of rice husk varieties in Uganda for biofuels and their techno-economic feasibility in gasification. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 107, p. 63–72, 2016.

OTARAKU, I. J.; OGEDENGBE, E. V. Biogas Production from Sawdust Waste, Cow Dung and Water Hyacinth-Effect of Sawdust Concentration. **International Journal of Application of Innovation in Engineering & Management**, v. 2, n. 6, p. 91–93, 2013.

PAIM, J. **Aplicação do biogás produzido a partir de dejetos de gado leiteiro como fonte alternativa de energia em uma queijaria**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

PÁSCOA, A. G. **Padrões de desintegração das placas de fezes de bovinos da raça Nelore em dois sistemas intensivos de pastejo rotacionado**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2001.

PATEL, V.; PATEL, A.; MADAMWAR, D. Effects of Adsorbents on Anaerobic Digestion of Water Hyacinth-Cattle Dung - Short Communication. v. 40, p. 179–181, 1992.

PEREIRA, A. I. C. **Co-digestão anaeróbia de resíduos verdes e lamas de ETAR para produção de biogás**. [s.l.] Universidade Nova de Lisboa, 2013.

PEREIRA, G. S. **Implantação de um biodigestor de baixo custo em uma propriedade com criação de gado leiteiro**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia da Vinhaça e desenvolvimento sustentável**. [s.l.: s.n.].

PODE, R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1468–1485, 2016.

POHLMANN, A. M. Levantamento de técnicas de manejo de resíduos da bovinocultura leiteira no estado de São Paulo. **Dissertação De Mestrado**, 2000.

PRATI, L. Geração De Energia Elétrica a Partir Do Biogás Gerado Por Biodigestores. **Monografia Para Conclusao De Curso De Graduacao , Universidade Federal Do Parana**, p. 1–83, 2010.

RAPOSO, F. et al. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch

mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 861–877, 2012.

RAZALI, N. A. M. et al. Heterogeneous catalysts for production of chemicals using carbon dioxide as raw material: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 4951–4964, 2012.

RIZZONI, L. B. et al. Biodigestão anaeróbia no tratamento de dejetos de suínos. 2013.

RODRIGUES, A. A. L. DE S. Co-digestão anaeróbia de resíduos de natureza orgânica. p. 164, 2005.

ROSENBERG, J. L.; EPSTEIS, L. M. **Schaum's Outline of Theory and Problems of College Chemistry**. 8 ed ed. [s.l: s.n.]. v. 39

ROZZI, A.; REMIGI, E. Methods of assessing microbial activity and inhibition under anaerobic conditions: A literature review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 3, n. 2, p. 93–115, 2004.

SALAM, B.; BISWAS, S.; RABBI, M. S. Biogas from mesophilic anaerobic digestion of cow dung using silica gel as catalyst. **Procedia Engineering**, v. 105, p. 652–657, 2015.

SANTOS, I. A. DOS; NOGUEIRA, L. A. H. Estudo energético do esterco bovino: seu valor de substituição e impacto da biodigestão anaeróbia. **Revista Agrogeoambiental**, v. 4, n. 1, p. 41–49, 2012.

SANTOS, O. V. DOS; MARCONDES, T.; CORDEIRO, J. L. F. Estudo da Cadeia do Leite em Santa Catarina - Prospecção e demandas (Versão preliminar). p. 56, 2006.

SAWAZAKI, H. E.; TEIXEIRA, J. P. F.; MORAES, R. M. DE. O pH e a temperatura na produção de biogás a partir de casca de arroz. **Bragantia**, v. 44, p. 715–721, 1985.

SCHLUNKE, K. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar. 2011.

SHEN, Y. Rice husk silica derived nanomaterials for sustainable applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 453–466, 2017.

SHUBEITA, F. D. M. et al. **Um estudo sobre monitoramento e controle de biodigestores de pequena escala**. Porto Alegre: [s.n.].

SOUZA, K. C. G. DE. **Modelo de simulação para análise da viabilidade de geração de energia a partir da utilização de biodigestores**. [s.l.] Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2010.

SPERLING, M. VON. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Segunda ed. Belo Horizonte: UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

TASHIMA, M. M. et al. Reaproveitamento da cinza de casca de arroz na

construção civil. **Holos Environment**, v. 11, n. 1, p. 81–89, 2011.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 10. ed. [s.l: s.n.].

USBERCO, J.; SALVADOR, E. **Química - Volume Único**. 5 ed ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2002.

UTEMBERGUE, B. L. et al. **Considerações sobre a composição e o uso de dejetos bovinos confinados** III Simpósio de Sustentabilidade e Ciência Animal. [s.l: s.n.].

WERNER, U.; STÖHR, U.; HEES, N. Biogas plants in animal husbandry. **A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien**, p. 1–55, 1989.

WILDER, B. H. et al. 2540 SOLIDS. In: **Standard methods for the examination of water and wastewater**. [s.l: s.n.]. p. 55–61.

XAVIER, C.; JÚNIOR, J. DE L. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 2, p. 212–223, 2010.

YAMASHIRO, T. et al. Anaerobic co-digestion of dairy cow manure and high concentrated food processing waste. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 15, n. 4, p. 539–547, 2013.

ZENNAKI-BENSOUDA, Z. et al. **Methane fermentation of cattle manure: Effects of hydraulic retention time, temperature and substrate concentration** Tropicultura, 1996.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui minha gratidão a Deus, por todas as possibilidades concedidas nesses anos de graduação. Pelas oportunidades para desenvolvimento educacional, profissional e interpessoal.

Agradeço a minha família, especialmente aos meus pais, Vilmar e Cida, por todos os esforços para tornar possível a minha formação e apoio para a realização dos meus sonhos. Vocês fazem e sempre farão parte de cada conquista minha. Ao meu irmão Lucas, por sua doçura e companheirismo. E ao meu querido esposo Hegel, minha fonte infinita de inspiração, por me incentivar diariamente na busca da minha melhor versão. Sou infinitamente grata a vocês, por todo amor e carinho, pela compreensão, paciência e principalmente por acreditarem no meu potencial.

Agradeço aos meus professores, em especial às minhas orientadoras Regina e Kátia, e ao professor Reginaldo, a quem dedico este trabalho. Agradeço também à professora Tatiana, por fornecer a cinza de casca de arroz utilizada nesse trabalho.

Agradeço aos colegas da graduação e companheiros de curso, em particular as monitoras Simone e Taiana, as quais me marcaram profundamente com sua atenção e boa vontade.

Por fim, agradeço as amigas apresentadas pela universidade e que vou levar pra vida: Hanna, Karin, Tamara, Kamille, Djéssica, Pâmela, Giorgia, Juliana e Nathália. Responsáveis, cada uma da sua maneira, por tornar esses anos ainda mais especiais.

Gostaria também de agradecer a Universidade Federal de Santa Catarina e Pró-Bolsas, pela concessão de uma bolsa de estudos para a realização do projeto a partir do qual surgiu este trabalho, e à Associação Técnica Sem Fronteiras.