



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA



Produção de biogás a partir de lodo de carcinicultura

Autor: Arthur Barbosa de Castro Friedrich

Orientador: Caroline Borges Agustini

Coorientador: Luis Henrique da Silva Poersch

Porto Alegre, 30 de Novembro de 2018

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas e Siglas	vii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	2
2.1 Aquacultura e Carcinicultura	2
2.2 Panorama da Carcinicultura Brasileira	2
2.3 Lodo de Bioflocos	3
2.4 Biogás a partir de lodo	4
2.5 Histórico do Biogás no Brasil	7
2.6 Matriz energética brasileira e o potencial do biogás	10
3 Materiais e Métodos	13
3.1 Biorreatores e Soluções	13
3.2 Medições	14
3.2.1 Volume de Biogás	14
3.2.2 Composição do Biogás	15
3.2.3 Sólidos Voláteis (VS)	15
4 Resultados	17
4.1 Produção de biogás	17
4.2 Composição de Biogás	18
4.3 Produção de Metano	20
4.4 Redução de Sólidos Totais Voláteis (VS)	23
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	26
6 Referências	27

Agradecimentos

Aos meus pais Etienne e Denise que sempre estiveram presentes nos momentos mais felizes e difíceis da minha vida e que foram os maiores estimuladores dessa conquista. Obrigado por tudo.

Ao meu irmão Thiago por sua companhia ao longo desses anos e por sempre me ouvir com paciência e com um bom conselho.

À Renata por sempre acreditar em mim e me ensinar o valor das coisas simples da vida.

À minha tia Lúcia por ter me acolhido em sua casa nos primeiros anos da graduação. Seu apoio e consideração foram fundamentais para realização dessa conquista.

As minhas avós Helena e Terezinha por todo o carinho e apoio desde a infância e por sempre me incentivarem a ler e a estudar.

Aos meu avôs Humberto e Wilson por me ensinarem sobre as beleza da natureza e toda sua poesia.

À tia Lica por sempre me ouvir e me apoiar durante os inúmeros pretinhos no Cassino.

À todos os meus professores que dedicaram anos de suas vidas se especializando para me transmitir grande parte do que sei agora.

À Prof. Caroline Agustini que me orientou de forma impecável durante toda a realização desse trabalho.

À Prof. Mariliz Gutterres que oportunizou a realização desse trabalho no LACOURO.

Ao Prof. Luis Poersch por me coorientar e por fornecer todo apoio necessário para a realização desse projeto.

À todos da gestão 2018/19 do Diretório Acadêmico da Engenharia Química (DAENQ) que resgataram em mim o senso de comunidade e pertencimento.

Ao programa Ciência Sem Fronteiras do governo federal e à University of Strathclyde por permitirem meu desenvolvimento pessoal e profissional em uma das melhores instituições da Escócia.

Ao Prof. Jorge Trierweiler por oportunizar um intercâmbio à TU-Dortmund contribuindo para minha formação.

Finalmente, agradeço à toda a comunidade da Universidade Federal do Rio Grande do Sul que oportunizou essa conquista e faz de tudo para que um ambiente de excelência acadêmica funcione da melhor maneira possível sempre.

Resumo

Devido ao crescimento da população mundial, a necessidade por proteína animal vem aumentando ao longo dos anos. Uma das principais fontes desse recurso é o pescado que ao longo das últimas décadas vem sendo extraído dos oceanos de forma exaustiva, a chamada pesca predatória. Com a constante pressão sobre o estoque natural de pescado e sua consequente diminuição, a aquicultura, criação em cativeiro de animais aquáticos, tem importância como alternativa à pesca extrativa. A aquicultura precisa de soluções ambientalmente corretas para realizar um crescimento sustentável. Entre as áreas da aquicultura, a carcinicultura (criação de camarão em cativeiro), tem crescido e desenvolvido soluções para o aumento de produtividade. Entre elas, o sistema de criação em bioflocos (Biofloc Technology System - BFT) se destaca, pois permite altas densidades de camarão por área. O sistema BFT diminui a necessidade por trocas de água durante o cultivo, o que é sustentável e economicamente vantajoso, entretanto gera lodo em seus sistemas filtrantes. O lodo precisa ser descartado corretamente por possuir altos níveis de matéria orgânica, nitratos e fosfatos. Observando o teor de matéria orgânica presente no lodo, esse estudo tem o objetivo de avaliar a digestão anaeróbia (DA) como forma de tratamento e aproveitamento energético do lodo de carcinicultura. Para avaliar o comportamento do lodo durante a DA, diferentes condições com volumes de lodo variando de 25 a 50 mL e com e sem adição de solução de nutrientes foram incubadas. Durante os 93 dias de experimento, foram avaliados o volume de biogás gerado (3 vezes por semana) e seu teor de metano (2 vezes por mês). Ao final desse tempo, foi realizada uma análise dos sólidos totais voláteis (VS) para avaliar a redução de matéria orgânica após os ensaios. Os resultados permitiram concluir que o lodo de carcinicultura pode ser tratado por DA já que todas as condições analisadas geraram metano. A melhor fração de metano obtida no biogás produzido foi de 35%, valor abaixo da média encontrada na literatura de 60%. Todas as condições apresentaram uma redução de VS satisfatória, maior ou igual a 62%. Dessa forma, o lodo de carcinicultura proveniente de sistemas de bioflocos pode ser tratado via DA minimizando custos de descarte e tem potencial como possível fonte de energia.

Lista de Figuras

Figura 1. Aquacultura de camarão na América Latina (ANDERSON; VALDERRAMA; JORY, 2018).....	3
Figura 2. Etapas da digestão anaeróbia (SILVEIRA, 2007).....	5
Figura 3. Utilização do biogás conforme grau de pureza de metano (EBERT, 2018).....	7
Figura 4. Histórico da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2017).....	9
Figura 5. Histórico da legislação brasileira a respeito do biogás (ABIOGAS, 2018).	10
Figura 6. Oferta interna de energia (EPE, 2016).....	11
Figura 10. Evolução do percentual de metano nas amostras.	18
Figura 11. Produção acumulada de metano.	20
Figura 12. Aproximação linear das fases Log para amostras sem nutrientes.	21
Figura 14. Redução percentual de sólidos totais voláteis (VS).....	23
Figura 15. Conversão de VS em CH ₄	24

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Condições experimentais.....	14
Tabela 2 - Composição da solução de nutrientes.....	14

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
BFT	Biofloc Technology System
C/N	Carbono / Nitrogênio
DA	Digestão Anaeróbia
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DOU	Diário Oficial da União
STS	Sólidos Totais Suspensos
TCD	Diferença de condutividade térmica
VS	Sólidos Voláteis

1 Introdução

O alto crescimento da população mundial aumenta a pressão sobre os recursos naturais renováveis e não renováveis. Estima-se que a população mundial atingirá a marca de 9 bilhões de pessoas em 2050 e a necessidade por alimento acompanhará essa tendência. Se o ritmo de crescimento populacional for mantido, em 2050 será necessário 60% a mais de alimento (FAO, 2018).

A crescente demanda por alimentos, principalmente por proteína animal, vem aumentando o consumo de peixes e crustáceos globalmente. A pesca predatória tem causado efeitos irreversíveis na população de espécies alvo, aquelas que são o objetivo dos pescadores, e também em espécies capturadas por *bycatch*, ou seja, de forma acidental. Acredita-se que cerca de 40% do pescado mundial é capturado acidentalmente e devolvido ao mar já sem vida ou gravemente ferido (WWF, 2018).

A constante necessidade por pescado de qualidade promoveu o desenvolvimento da aquicultura, que pode ser uma alternativa para reduzir a pressão sobre os oceanos. Entretanto, a atividade de criação de animais aquáticos em cativeiro é geradora de resíduos devido à necessidade por trocas parciais de água, limpeza de tanques, geração de lodo e evisceramento dos animais.

A produção de crustáceos é uma das subáreas da aquicultura e tem como espécime mais utilizado o camarão branco do equador *Penaeus vannamei*. Desde 1980, o uso de novas técnicas de cultivo tem sido desenvolvidas com o intuito de reduzir o impacto da carcinicultura (criação de camarão) no meio ambiente. O sistema de bioflocos (Biofloc Technology System - BFT) é uma alternativa, pois é possível aumentar a densidade de camarões por área permitindo um aumento considerável na produtividade em comparação à sistemas extensivos. Sendo um sistema fechado, utilizando apenas a recirculação da água do cultivo e intensa oxigenação, o sistema BFT reduz a praticamente zero a necessidade por trocas de água, o que torna o cultivo mais sustentável. A recirculação da água, contudo, acumula lodo nos sistemas filtrantes, que deve ser tratado e pode ser aproveitado energeticamente por conter altas concentrações de matéria orgânica, possível presença de antibióticos, nitratos e fósforo (GAONA et al., 2016).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de geração de biogás a partir do lodo de carcinicultura em sistemas de bioflocos, verificando a quantidade de biogás que pode ser gerado, a fração de metano contida nele e a redução de sólidos totais voláteis.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Aquacultura e Carcinicultura

A aquacultura é a área que engloba a criação em cativeiro de animais aquáticos, entre eles, peixes, crustáceos e moluscos. A produção mundial de animais aquáticos em cativeiro atingiu 80 milhões de toneladas em 2016, gerando uma receita de U\$S 232 Bi. Em 1961 foram consumidos ao ano cerca de 9 kg de pescado per capita. Em 2015 esse número atingiu a marca de 20,2 kg. Com a crescente redução dos estoques naturais de pescado, a produção via aquacultura vem se desenvolvendo e acredita-se que ultrapasse a produção por captura nos próximos anos (FAO, 2018).

Os seres vivos criados em cativeiro podem ser divididos nos seguintes grupos: peixes, crustáceos e moluscos. Majoritariamente, a produção é dominada pela criação de peixes, que deteve 92,5% de toda a produção da aquicultura terrestre em 2016. Nos anos 2000, entretanto, esse índice correspondia a 97,2% (FAO, 2018). Essa redução pode ser explicada pelo papel de destaque que vêm assumindo os dois outros grupos, crustáceos e moluscos.

Entre os crustáceos, destaca-se a criação de camarão, que recebe o nome de carcinicultura. Os camarões marinhos são os principais seres cultivados entre os crustáceos na aquicultura mundial, sendo o camarão branco (*Penaeus vannamei*) responsável por 52,9% do volume total produzido (FAO, 2018).

2.2 Panorama da Carcinicultura Brasileira

A carcinicultura brasileira vem se desenvolvendo nas últimas três décadas de forma acelerada. Em 1997, a produção era de 3.600 t e cresceu para 90.190 t em 2003. Em paralelo, a exportação teve papel de destaque no mesmo período, chegando a representar U\$S 226 milhões em 2003. Após 2003, entretanto, com a desvalorização cambial e a ação *antidumping* dos EUA, a exportação do camarão deixou de ser interessante financeiramente e os produtores nacionais passaram a dirigir seus esforços para atender a demanda interna pelo crustáceo (P. ROCHA, 2014).

Entre 2005 e 2011, a produção se manteve estagnada em cerca de 65.000 t. Apenas no ano de 2014, após continuado esforço por parte dos produtores na promoção e adequação de seus produtos, que novamente 90.000 t de camarão foram produzidas para abastecer quase que exclusivamente o mercado interno. Em parte, o sucesso da carcinicultura brasileira se deve também à política desenvolvida pelo Ministério da Agricultura, que estabeleceu barreiras sanitárias para a importação de crustáceos visando à preservação da biodiversidade local e da indústria nacional (P. ROCHA, 2014).

O forte desempenho do mercado interno, com receitas em toda a cadeia produtiva de R\$ 1,8 Bilhões em 2014, contribuiu para que novamente o setor se fortalecesse e atraísse mais investimentos públicos e privados. Com a retomada do setor, a produção em cativeiro de camarão assumiu um importante caráter social, principalmente na região nordeste, sendo responsável por mais de 70 mil empregos diretos e indiretos (P. ROCHA, 2014).

No âmbito internacional (Figura 1), a expectativa é que a produção de camarão na América Latina aumente de 670.000 t em 2015 e atinja 1.000.000 t em 2020, evidenciando um crescimento anual de 8,3 %. O maior representante atual é o Equador e a previsão é

que forneça mais de 50 % de todo camarão produzido na região até o fim da década, cerca de 570.000 t. Acredita-se que o Brasil será responsável por 100.000 t nesse período, atingindo essa marca pela primeira vez na história (ANDERSON; VALDERRAMA; JORY, 2018).

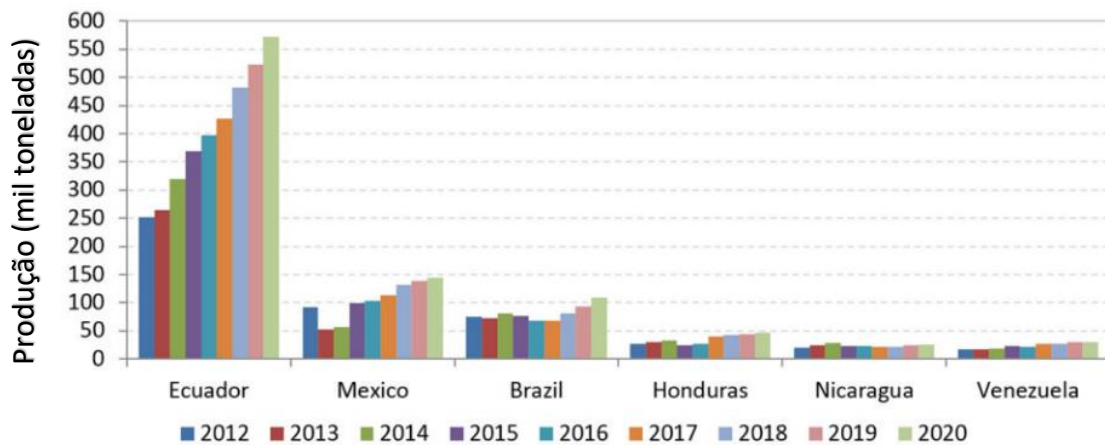


Figura 1. Aquacultura de camarão na América Latina (ANDERSON; VALDERRAMA; JORY, 2018).

2.3 Lodo de Bioflocos

O sistema de bioflocos (Biofloc Technology System - BFT) foi desenvolvido inicialmente para o tratamento de efluentes domésticos. Porém, a partir de 1980, começou a ser aplicado na aquicultura. A utilização dessa tecnologia ganhou destaque por permitir altas densidades de organismos por área com maior biossegurança, o que potencializa o retorno sobre o investimento para os criadores. Nos últimos anos, quatro universidades brasileiras vêm se destacando no aprimoramento do cultivo de camarões em BFT: a FURG, UFSC, UFC e UFRPE (WASIELESKY et al., 2013). Diversos produtores podem ser beneficiados com o uso do BFT, entretanto, esse cultivo exige mão-de-obra qualificada e controle preciso dos parâmetros físico-químicos do processo. Devido à superpopulação de seres vivos, alterações nos parâmetros da água podem atingir níveis prejudiciais em poucas horas, podendo ocasionar perdas na safra (GAONA et al., 2016).

O sistema de bioflocos na criação de camarão ganhou destaque principalmente por ser uma alternativa lucrativa para tratamento *in situ* da água utilizada na cultura, sem afetar a produção. Estabelece-se, através do acréscimo de fontes de carbono (açucars, trigo etc), uma razão ótima de C:N de cerca de 15-20:1, o que permite o desenvolvimento de microrganismos heterotróficos que convertem nitrogênio inorgânico em agregados nutritivos chamados bioflocos. Os camarões conseguem suplementar a alimentação com os bioflocos, reduzindo assim a quantidade de ração necessária para o ganho de peso. A qualidade da água se mantém elevada durante o ciclo, o que permite a criação intensiva em um regime sem renovação de água (SANTHANA KUMAR et al., 2018).

A utilização do sistema de bioflocos permite a criação de camarão com reduzido volume de água comparado com criações em regime extensivo. O acréscimo contínuo de fontes de carbono, entretanto, e o conseqüente excesso de bioflocos gerados (biomassa) faz com que esses se depositem em bacias de sedimentação, gerando lodo (ARANTES et al., 2017).

2.3.1 Tratamento e disposição

O lodo de bioflocos é composto basicamente pela biomassa das bactérias heterotróficas mortas, resíduos das fontes de carbono adicionadas e restos de ração e outros compostos utilizados durante o cultivo. Para ser descartado diretamente nos cursos d'água, é necessário que, além de níveis aceitáveis de nitrato, o resíduo tenha os sólidos totais suspensos (STS) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) dentro dos padrões exigidos pela legislação (ARANTES et al., 2017).

Atualmente, as normas que dispõem sobre o lançamento de efluentes em cursos hídricos são rígidas e definem padrões mínimos para o descarte de lodos. Entre eles, pH entre 7 e 9, temperatura inferior a 40° C, redução mínima de 60% de DBO e amônia total inferior a 20,0 mg/L (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2011).

O desenvolvimento sustentável da aquicultura depende diretamente da correta disposição de seus resíduos. O sistema de bioflocos é vantajoso por reduzir drasticamente a necessidade de renovação da água de cultivo, entretanto acaba gerando lodo que deve ser tratado corretamente. O lodo oriundo da criação de camarão contém diversos minerais, entre eles: sódio, potássio, enxofre, ferro, manganês, fósforo e cloro em concentrações em torno de 100 mg/L (BOOPATHY, 2009).

Em geral, o tratamento de lodos consiste basicamente em aumentar a concentração de sólidos totais por desidratação, facilitando o manejo do resíduo, ou realizar a estabilização da fração de matéria orgânica para compostagem. Reduzindo o volume, os custos de transporte e disposição tendem a ser minimizados, mas, para isso, operações unitárias como filtração, evaporação e centrifugação são necessárias, o que necessariamente envolve custos (UGGETTI et al., 2010). Algumas soluções de menor custo como *wetlands* construídos são possibilidades mais acessíveis, entretanto exigem grandes áreas para suas instalações. Assim, a biodigestão anaeróbia do lodo da carcinicultura com geração de biogás, que pode ser convertido em energia térmica ou elétrica, é uma alternativa para reduzir os custos de tratamento do lodo.

2.4 Biogás a partir de lodo

O descarte de lodo diretamente nos cursos d'água sem atingir os parâmetros exigidos é proibido devido ao alto teor de matéria orgânica e sais. Além de *wetlands*, lagoas de estabilização são também utilizadas para o tratamento de lodos onde estima-se que cerca de 30% do carbono é transformado em metano, um dos gases contribuintes para o aquecimento global quando liberado para a atmosfera. Em grandes áreas, como nas das lagoas de estabilização, a efetiva recuperação do metano gerado é cara ou ineficaz (MIRZOYAN; TAL; GROSS, 2010). Dessa forma, o uso de biorreatores, onde o resíduo é tratado de forma confinada, é mais eficiente nessa recuperação.

A geração do metano, que compõe o biogás, ocorre pelo processo de quebra anaeróbia da matéria orgânica contida no lodo realizada por microrganismos que, através de reações bioquímicas sinérgicas, produzem energia (ATP). A digestão anaeróbia (DA) ocorre em 4 fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 2). Na hidrólise, moléculas complexas são quebradas em monômeros (ex.: carboidratos são convertidos em glicose, proteínas em aminoácidos e lipídeos em ácidos graxos) por exoenzimas; na

acidogênese, os produtos da hidrólise são convertidos em ácido orgânicos, etanol, CO_2 e H_2 ; na acetogênese, ácidos graxos são convertidos em ácido acético, H_2 e CO_2 para na metanogênese serem convertidos em CH_4 e CO_2 (HANS; KUMAR, 2018).

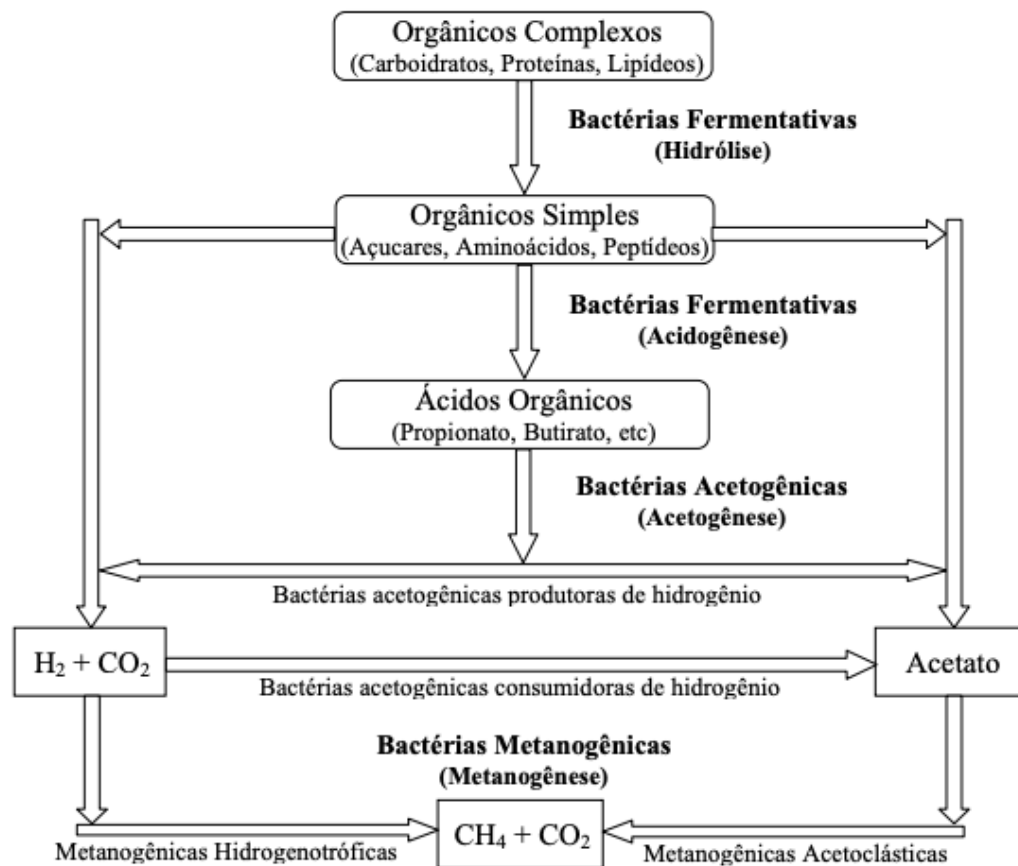


Figura 2. Etapas da digestão anaeróbia (SILVEIRA, 2007).

O biogás (biometano) é chamado assim, pois é uma alternativa ao metano extraído de fontes não renováveis. No processo de extração do petróleo existe a produção de gás natural (aproximadamente 90 % de metano) que pode ser utilizado para diversos fins econômicos (ZANETTE, 2009). Sendo o gás natural um recurso não renovável, é interessante o fomento de processos que utilizem o biometano como substituto para aliviar a pressão pelo recurso oriundo das reservas petrolíferas e para reaproveitar os compostos orgânicos, como o lodo, que normalmente são descartados por não possuírem valor comercial.

O grande poder calorífico do metano, que varia entre 50,1 MJ/kg, é uma de suas mais valiosas características, sendo utilizado para geração de energia para indústrias, veículos e até mesmo residências (ZANETTE A. L., 2009).

Para a maioria do biogás produzido, o custo é maior quando comparado às energias que ele substitui (GNV). Apesar de ser uma fonte renovável, é um poluidor mais potente que o dióxido de carbono, por isso recomenda-se sua queima (LEE, 2017).

Na queima de biometano, o dióxido de carbono emitido é neutro no balanço de emissões, ou seja, todo carbono liberado em sua queima é novamente aprisionado na forma de matéria orgânica, não contribuindo para o aumento das alterações climáticas, pois o carbono contido na matéria-prima faz parte do ciclo recente do carbono. Acredita-

se que a utilização do biometano como combustível pode reduzir em média até 68% das emissões de carbono de origem fóssil se substituir os combustíveis oriundos do petróleo (LEE, 2017).

A obtenção de biogás pode ocorrer em aterros sanitários, lodo de esgoto, lodo de curtumes e algumas plantas agrícolas e industriais (AGUSTINI; DA COSTA; GUTTERRES, 2018). A composição do biogás dependerá do substrato e das condições de temperatura e de pressão que influenciam a DA. O biogás em média apresenta a seguinte faixa de composição de componentes:

- 53 a 70% de metano;
- 30 a 47% de dióxido de carbono;
- 0,2% de nitrogênio gasoso;
- Em torno de 1000 ppm de gás sulfídrico;
- Em torno de 100 ppm de amônia;

Além disso, o biogás pode conter gás hidrogênio, compostos halogenados e compostos orgânicos de silícios, entre outros, dependendo da composição da matéria-prima e das condições do processo (PERSSON *et al.*, 2006).

Alguns subprodutos do processo de obtenção do biogás podem causar problemas durante o uso final do produto caso não sejam tratados corretamente. O gás sulfídrico, por exemplo, é reativo com metais e a reatividade aumenta com a pressão, temperatura e concentrações elevadas. A presença de água, que reage com ácido sulfídrico, também reage com o gás sulfídrico produzindo ácido sulfúrico. Os compostos halogenados, apesar de raros no biogás, tornam-se corrosivos após combustão, principalmente na presença de água. Siloxanos se incrustam facilmente nas paredes de equipamentos, causando erosão. A umidade, por sua vez, durante o processo de combustão do gás, absorve calor, atingindo estados termodinâmicos de superaquecimento, diminuindo o poder calorífico do biogás (ZANETTE A. L., 2009). Esses subprodutos devem ser tratados antes de se utilizar o biogás para algum fim comercial.

As formas de uso do biogás dependerão da porcentagem de metano na mistura, uma vez que é o componente que confere a característica inflamável à mistura. A Figura 3 apresenta as formas de utilização desse combustível.

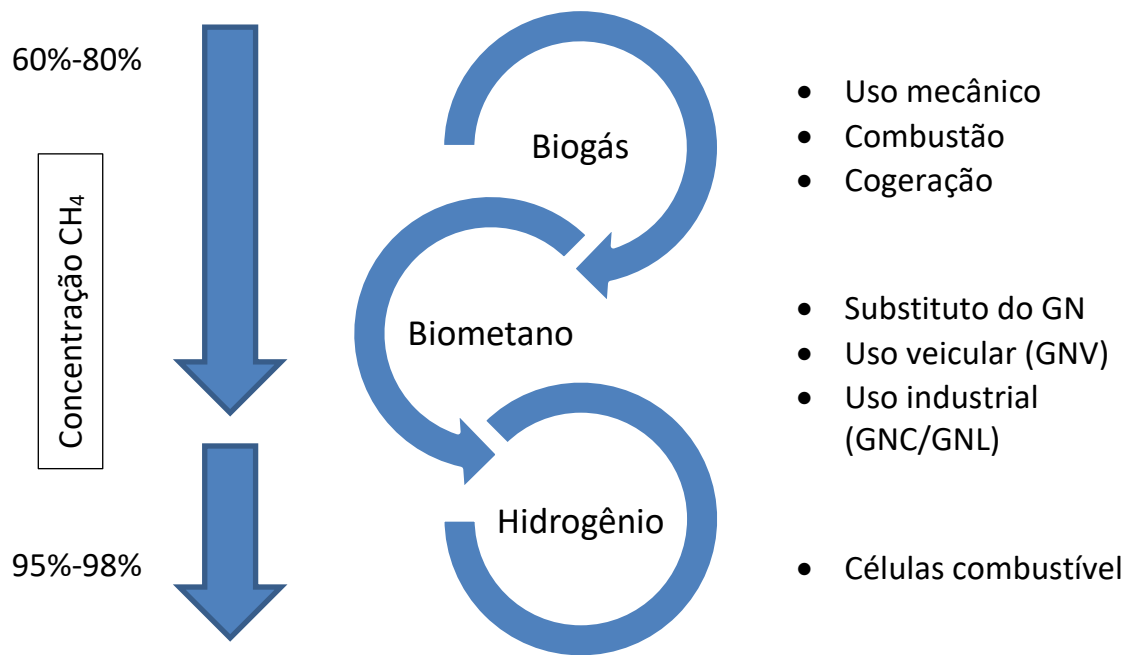


Figura 3. Utilização do biogás conforme grau de pureza de metano (EBERT, 2018).

2.5 Histórico do Biogás no Brasil

No Brasil, o interesse pelos biodigestores começou com a crise do petróleo da década de 70. Em novembro de 1979, na Granja do Torto em Brasília, foi construído um dos primeiros biodigestores do país. O projeto na sede do governo demonstrou ser possível instalar uma unidade produtora de biogás com a utilização de materiais simples e de baixo custo e incentivou o governo no início da década de 80, no contexto do Programa de Mobilização Energética (PME), a estimular a sua instalação em propriedades rurais. Na época, foram instalados cerca de 7 mil biodigestores nas regiões sul, sudeste e centro-oeste. No entanto, problemas operacionais relacionados em especial a falta de informações e treinamento tornaram o sistema de baixa eficiência, fazendo com que muitos produtores rurais abandonassem a tecnologia. Este foi primeiro ciclo da utilização do biogás no Brasil (EBERT, 2018).

O segundo ciclo dos biodigestores no Brasil teve início em meados dos anos 2000 com o advento do mercado de créditos de carbono que mobilizou recursos para a construção de biodigestores, em especial em propriedades rurais com criação de suínos de médio e grande porte, visando à coleta e combustão do biogás. No contexto do mercado de créditos de carbono, os gases gerados pelos dejetos expostos, em geral em lagoas ou esterqueiras abertas, e não coletados, quando emitidos para atmosfera contribuíram negativamente para o aumento do efeito estufa ou aumento da temperatura global. Neste caso, os recursos dos créditos de carbono são aplicados em projetos capazes de minimizar este efeito, sendo o biodigestor uma destas tecnologias. Estima-se que entre 2005 e 2013 foram instalados no Brasil cerca de 1.000 biodigestores, considerando os incentivos financeiros dos créditos de carbono (EBERT, 2018).

Observa-se durante este segundo ciclo do biogás no Brasil, quando comparado ao primeiro, um grande avanço tecnológico, e, não diferente do primeiro ciclo, um grande potencial desta fonte energética. Este entendimento é compartilhado pelo governo

brasileiro, que, para além dos incentivos dos créditos de carbono que não são aplicáveis a todos os produtores rurais, tem disponibilizado incentivos especiais para a construção e aquisição de biodigestores, como o Programa Agricultura de Baixo Carbono, ou Programa ABC, e o Pronaf ECO, para agricultura familiar (SOARES; SILVA, 2010).

Impulsionado por inovações tecnológicas e investimentos na cadeia de valor, o biogás está entre as fontes de energia que mais cresceram no Brasil em 2016. Houve um salto de quase 30% na capacidade instalada, que atingiu 118,6 MW em fevereiro de 2017, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Existem hoje 15 usinas operando no país a partir de resíduos sólidos urbanos, 11 com resíduos animais e três com rejeitos da agroindústria (EBERT, 2018).

A participação do biogás na matriz elétrica é de apenas 0,0813 % (ANEEL, 2018). Há, porém, potencial para produção de 78 milhões de m³ diários, equivalentes a 25 % da disponibilidade de energia do país, segundo a Associação de Biogás e Biometano (ABiogás). A organização estima que até 2025 será possível atingir uma produção diária de 10,7 milhões de m³, 13 % do volume que é hoje desperdiçado (EBERT, 2018). No médio prazo, acredita-se que o processamento de lodo pode tornar competitiva a indústria do biogás no Brasil (VERAS, 2017).

Em 2014, foi inserido no mercado brasileiro, um ônibus da marca Scania abastecido tanto com GNV quanto com biometano. Importado da Suécia, o ônibus foi testado em diferentes locais, projetos e feiras envolvendo biogás. Após os eventos, foi trazida para o Brasil a linha de montagem desses ônibus. A média de consumo do biometano é ligeiramente inferior à do diesel (2,02 km/m³ contra 2,2 km/L), mas tem custo aproximadamente 30% menor. O preço por quilometro do biometano é 56% menor em comparação com um veículo similar a diesel (ITAIPU, 2017).

Recentemente, a New Holland apresentou, em Itaipu, um trator movido a biometano, que também passou por testes e avaliação de produtores agrícolas potencialmente interessados em gerar biometano nas fazendas e, com ele, abastecer seus tratores e outros veículos (ITAIPU, 2017).

Em relação à legislação brasileira, o histórico da regulamentação e exploração dos combustíveis fósseis e dos biocombustíveis é apresentado na Figura 4. As principais leis

com relação à exploração do petróleo e incentivo e regulamentação dos combustíveis renováveis são listados a seguir.

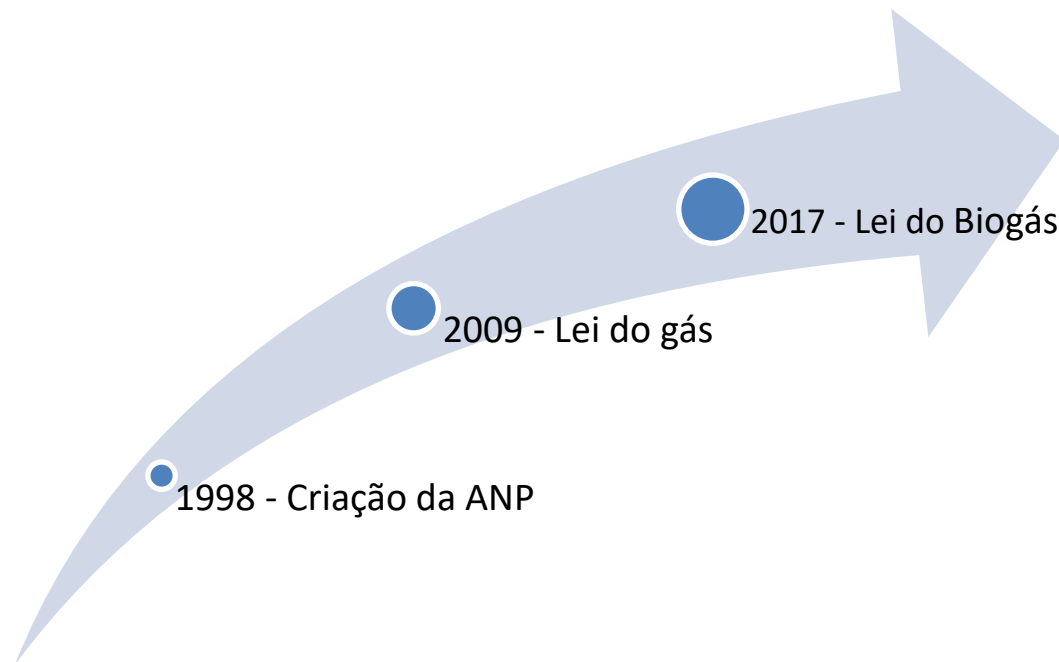


Figura 4. Histórico da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2017).

- LEI Nº 9.478, DE 6.8.1997 - DOU 7.8.1997: Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2017);
- DECRETO Nº 2.455, DE 14.1.1998 - DOU 15.1.1998: Implanta a Agência Nacional do Petróleo - ANP, autarquia sob regime especial e aprova sua estrutura regimental. Localização: Escritório-Sede em Brasília e Escritório Central no Rio de Janeiro;
- Rodada Zero: Contrato de concessão para exploração, desenvolvimento e produção de petróleo e gás natural celebrado entre Agência Nacional do Petróleo – ANP e Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras (ANP, 2017);
- PORTARIA ANP Nº 41, DE 15.4.1998 - DOU 17.4.1998: Aprova o Regulamento Técnico ANP nº 001/98, que estabelece normas para especificação do gás natural, de origem interna ou externa, a ser comercializado no País (ANP, 2017);
- RESOLUÇÃO ANP Nº 685, DE 29.6.2017 - DOU 30.6.2017: Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional (ANP, 2017).

A evolução da legislação brasileira em relação ao biogás é apresentada na Figura 5. O primeiro Estado a criar um programa exclusivamente destinado ao biogás foi São Paulo, em 2012, ao incentivar a ampliação das matrizes energéticas renováveis no Estado e estabelecer um percentual mínimo de biometano ao gás canalizado do Estado. No mesmo ano, as concessionárias de gás natural do Estado do Rio de Janeiro foram obrigadas a adquirir gás natural renovável (biogás) até o limite de 10 % do volume comercializado por elas. Em 2015, o biometano proveniente de resíduos agrícolas foi especificado enquanto

biocombustível e foram definidas as regras no intercâmbio entre GNV e biometano para veículos automotores (ABILOGAS, 2018; ANP, 2017).

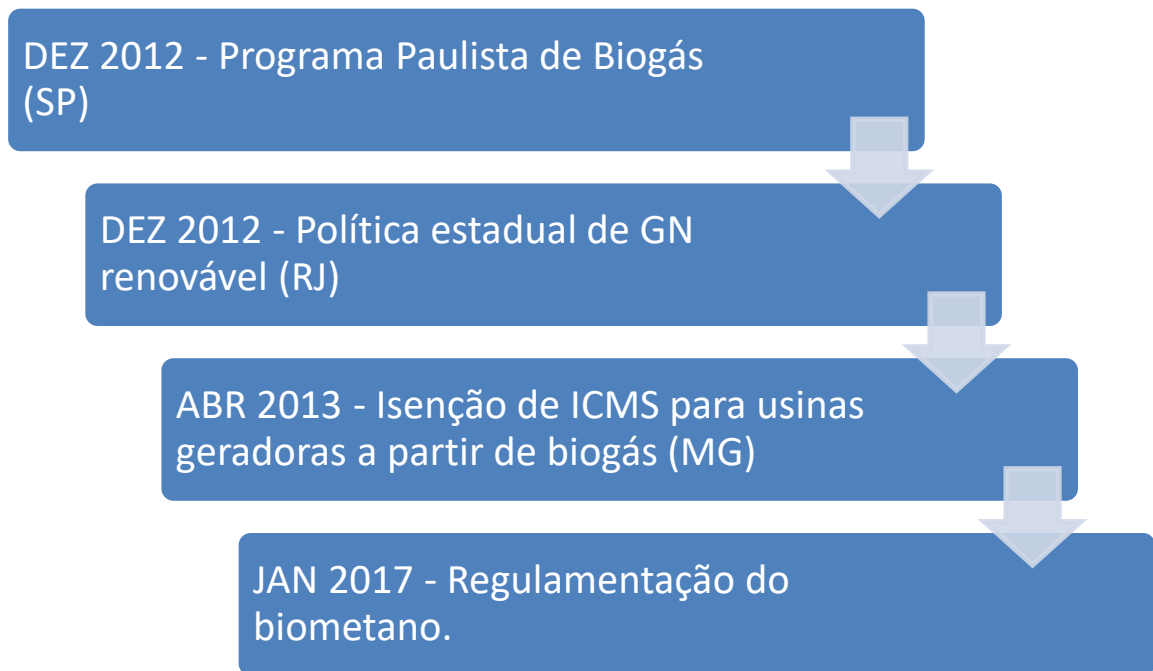


Figura 5. Histórico da legislação brasileira a respeito do biogás (ABILOGAS, 2018).

2.6 Matriz energética brasileira e o potencial do biogás

Analisando a matriz energética brasileira (Figura 6), o gás natural tem papel de destaque ocupando a quarta posição entre as fontes de energias ofertadas internamente (EPE, 2016). A maior parte do gás comercializado é consumida pela indústria (41%) e na geração de energia elétrica (40%) (ABEGÁS, 2017). Com o desenvolvimento da indústria brasileira, a tendência é que a necessidade por energia aumente, criando mais espaço para inserção das energias renováveis.

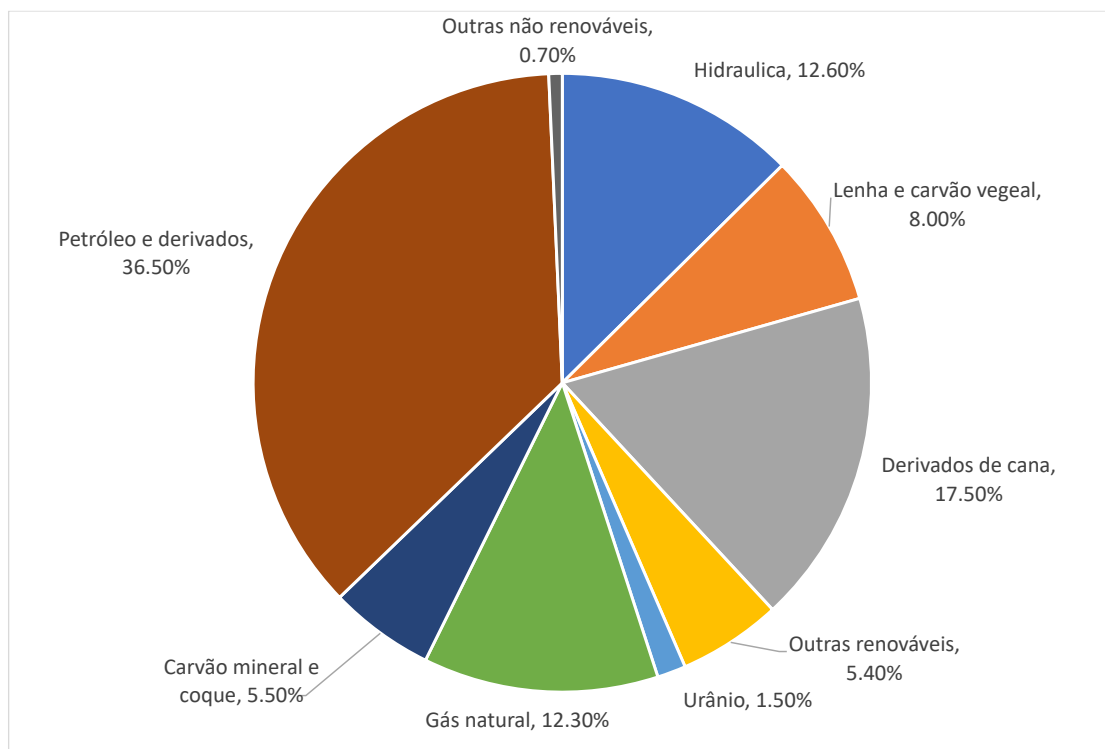


Figura 6. Oferta interna de energia (EPE, 2016).

Devido a crescente necessidade por energia, o biogás no Brasil pode ser utilizado como substituto verde ao gás natural, minimizando o impacto causado pelo uso de combustíveis não renováveis.

Apesar de poder ser usado como substituto ao gás natural, após purificação, o biogás é melhor aproveitado se for utilizado diretamente na queima. Em caldeiras à gás, o biogás deve conter pelo menos 50% de metano, pois abaixo dessa concentração a mistura apresentará baixa inflamabilidade. Normalmente essas caldeiras possuem queimadores duplos, além do biogás, podem queimar outros gases e óleos. Assim, quando há pouca oferta de biogás a caldeira pode permanecer em operação. A eficiência dessas caldeiras é superior à 90%. O poder calorífico inferior do biogás é menor quando comparado ao do gás natural, por isso é necessário alterar os sistemas de alimentação e de queima, a fim de compensar o teor energético menor, quando essa caldeira a gás utilizar apenas biogás como principal combustível (COLORADO et al., 2010).

Além da queima direta para geração de energia térmica o biogás pode ser utilizado na cogeração de energia. Em conjunto com outros combustíveis, sua queima é utilizada para aquecer vapor d'água e gerar energia elétrica e térmica. Em sistemas convencionais, a energia elétrica gerada aproveita entre 30-40 % da energia do combustível. Em sistemas de cogeração a eficiência global pode atingir até 90% (Figura 7).

A obtenção de biogás varia de acordo com a quantidade de lodo disponível e da capacidade de tratamento. Não há impedimento para a construção de uma planta de cogeração de biogás em regiões sem infraestrutura de gasodutos, já que a mesma pode ser utilizada como fonte de energia para a microrregião ao seu redor, o que permite uma maior flexibilidade no uso desse recurso (BARROS, 2015; SOUZA; LUCAS JÚNIOR; FERREIRA, 2005).

A utilização de biogás como substituto do GNV exige um grau de purificação de pelo menos 80 % o que exige operações unitárias diversas e geram um custo maior até a obtenção do biometano. Dessa forma a geração de energia térmica ou cogeração se tornam alternativas mais eficientes e menos custosas na utilização do biogás (EBERT, 2018).

3 Materiais e Métodos

O objetivo desse estudo foi determinar o potencial de geração de biogás a partir da biodegradação de lodo proveniente da carcinicultura intensiva em sistema de bioflocos. O lodo analisado foi coletado na Estação Marinha de Aquicultura (EMA) da Universidade Federal de Rio Grande (FURG) na Praia do Cassino-RS em dois galões de 5 L e transportado, sem refrigeração, para Porto Alegre. O lodo foi utilizado para montagem dos experimentos no laboratório de estudos em couro e meio ambiente (LACOURO) após dois dias da coleta na FURG.

Para analisar a produção de biogás, parte do lodo foi distribuída em biorreatores hermeticamente fechados e armazenados em estufa à 35 °C para possibilitar a digestão anaeróbia (DA). Durante 93 dias foram realizadas medições periódicas para avaliar o volume de gás produzido. Em paralelo foram realizadas análises cromatográficas para verificar a evolução da composição do biogás gerado e determinar a porcentagem de metano (CH₄) presente no gás. A montagem dos experimentos seguiu a metodologia estabelecida em estudos anteriores (AGUSTINI; DA COSTA; GUTTERRES, 2018).

3.1 Biorreatores e Soluções

Os biorreatores utilizados têm capacidade total de 300 ml e possuem duas saídas para coleta de gases, uma ao topo por onde se conecta o dispositivo utilizado para medição de volume de gases e outra lateral que permite a coleta de amostras para análise cromatográfica da composição do biogás.

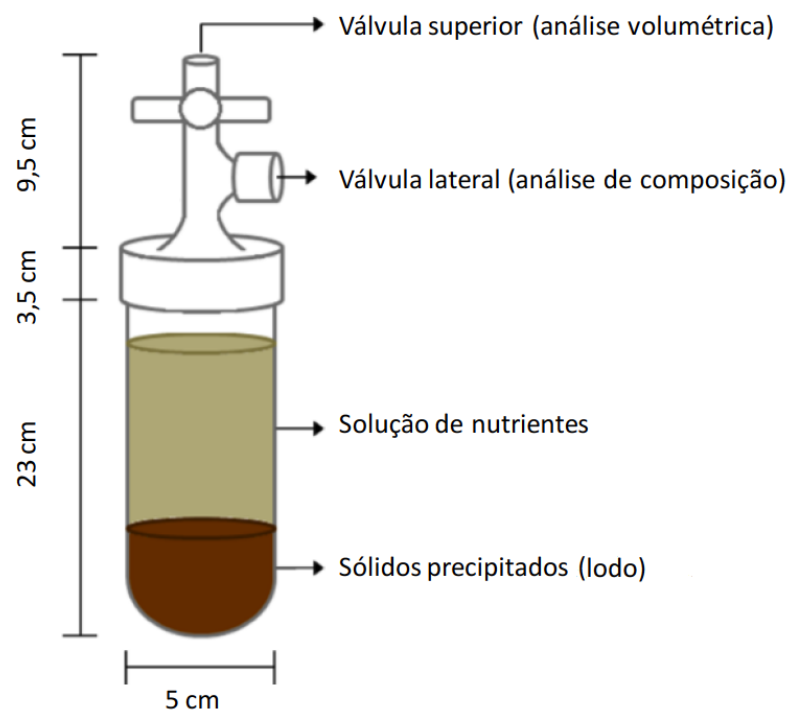


Figura 7. Modelo de biorreator utilizado (AGUSTINI; DA COSTA; GUTTERRES, 2018).

Quatro tipos de condições foram realizadas, em duplicata, divididas em dois grupos: com e sem a adição de nutrientes. A Tabela 1 estabelece as diferenças entre cada tipo de amostra. A composição da solução de nutrientes é mostrada na Tabela 2.

Tabela 1. Condições experimentais.

Condição	Volume de Lodo	Solução de Nutrientes
I	25 ml	200 ml ÁGUA
II	50 ml	200 ml ÁGUA
III	25 ml	200 ml NUTRIENTES
IV	50 ml	200 ml NUTRIENTES

Tabela 2. Composição da solução de nutrientes.

Componente	Concentração (g/L)
Extrato de Levedura	2
Peptona	1
K ₂ HPO ₄	7
KH ₂ PO ₄	3

A adição de nutrientes foi realizada para garantir condições propícias para o desenvolvimento inicial dos microrganismos (AGUSTINI, 2014). Água foi adicionada em substituição, para diluição apenas, a fim de se analisar a economia com o preparo da solução de nutrientes. Dois diferentes volumes de lodo, 25 ml e 50 ml, foram estudados, com o intuito de comparar a velocidade e rendimento da DA na presença de uma maior concentração de sólidos seguindo experimentos prévios que validaram o aumento da velocidade de DA em concentrações maiores (AGUSTINI; DA COSTA; GUTTERRES, 2018).

3.2 Medições

3.2.1 Volume de Biogás

A medição de volume do biogás gerado foi realizada durante 93 dias em periodicidade constante de três vezes por semana. O aparato utilizado para medição é mostrado na Figura 8. A medição consistia em ligar a saída superior do biorreator através de uma mangueira de borracha até o instrumento, confeccionado em vidro e preenchido com água que, baseado no princípio de *Mariotte*, por diferença de pressão, expel um volume de água equivalente ao volume de biogás gerado no biorreator com pressão acima da

atmosférica. A água presente no aparato é acidificada para evitar que parte do CO_2 presente no biogás se dissolva na água minimizando uma possível fonte de erro.

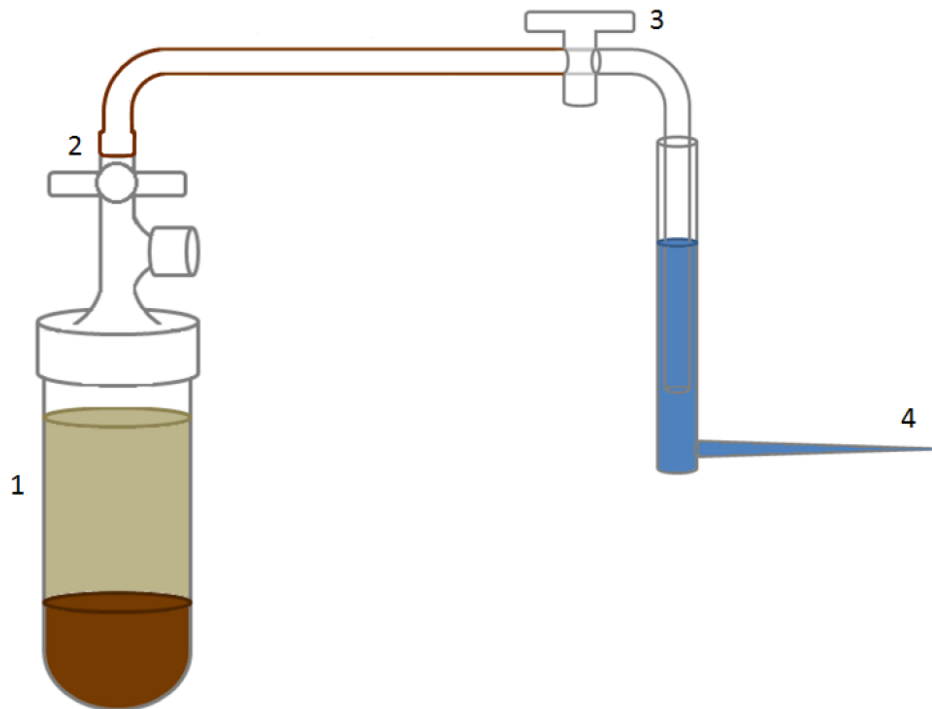


Figura 8. Aparato utilizado para medir volume de biogás – 1. Biodigestor; 2. Válvula do biorreator; 3. Válvula do aparato de medida; 4. Saída para a atmosfera (AGUSTINI, 2014).

3.2.2 Composição do Biogás

Para determinar a composição do biogás em relação a presença de O_2 , N_2 , CO_2 e CH_4 , amostras dos biorreatores foram analisadas em um cromatógrafo gasoso GC-2014 Shimadzu equipado com um detector de condutividade térmica (TCD). A coluna empacotada presente é do modelo sSCal e foi utilizada com Hélio (White Martins 5.0) como gás de arraste. Em relação as temperaturas de operação, o injetor foi mantido à 200 °C e o detector a 250 °C, o forno iniciou a operação em 40 °C e foi aquecido à 15 °C/min até 150 °C permanecendo nessa temperatura por 0,67 min.

3.2.3 Sólidos Voláteis (VS)

A avaliação dos sólidos foi realizada através de análise gravimétrica. Para determinar a quantidade de sólidos totais no lodo, foi realizada a pesagem de uma amostra de 10 ml após realização de secagem à 100 °C por 24 horas em estufa (P_1). Para o cálculo de sólidos fixos, foi realizada a calcinação à 600 °C por 1 hora da amostra oriunda da estufa sendo essa novamente pesada (P_2). Após o calculo de sólidos totais e fixos, a quantidade de sólidos voláteis é calculada pela diferença entre ambos ($P_1 - P_2$).

O mesmo procedimento para avaliação dos sólidos voláteis foi realizada com a solução de nutrientes e com as fases dissolvidas e precipitadas dos biorreatores após a realização

dos experimentos. Dessa forma foi possível avaliar a redução de sólidos totais voláteis em cada biorreator ao final do processo da DA.

4 Resultados

4.1 Produção de biogás

A produção de biogás ao longo dos 93 dias de experimento nas quatro condições testadas (Tabela 1) pode ser verificada na Figura 9. Tanto para amostras com ou sem nutrientes, o volume acumulado de biogás foi maior nos biorreatores com maior quantidade inicial de lodo (50 mL), conforme o esperado, já que os mesmos possuem maior massa de sólidos voláteis em relação aos seus pares de 25 mL.

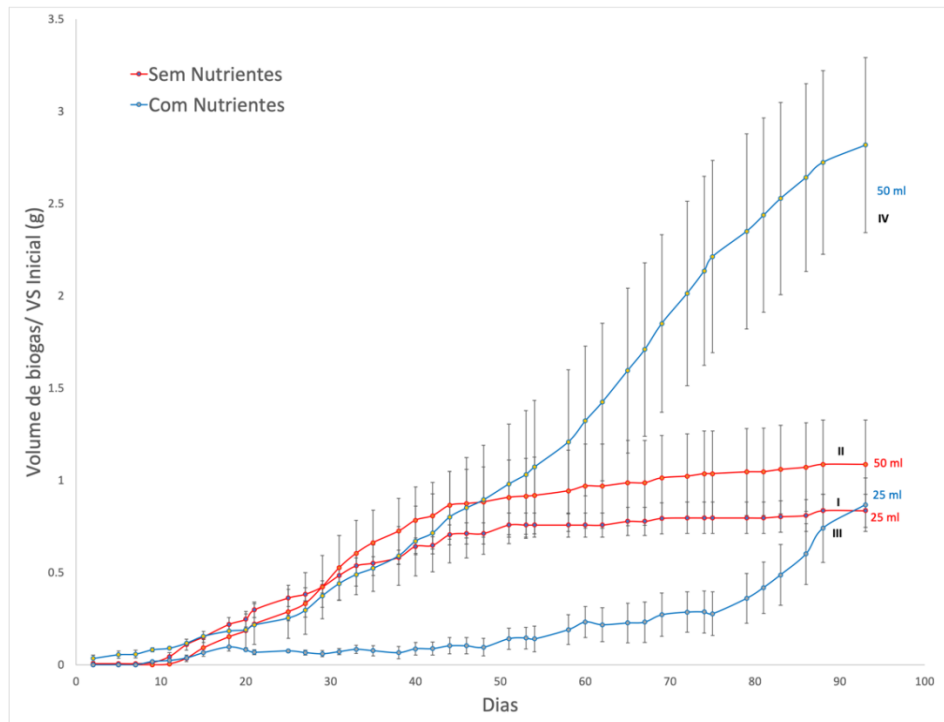


Figura 9. Produção de biogás a partir de lodo de carcinicultura.

Analisando a diferença entre amostras de mesmo volume, as curvas com nutrientes obtiveram maior produção de biogás (III e IV). No período de 93 dias, ambas superaram a produção acumulada de biogás de seus pares sem adição de nutrientes (I e II, respectivamente) de mesmo volume. Entretanto, a curva IV ultrapassou a curva II depois do 48º dia e a condição III superou a condição I após 90 dias. Maior investigação é necessária para avaliar o motivo da extensão do tempo na fase lag ocorrida em III. Acredita-se que o principal motivo foi a proporção C:N não estar adequada, uma vez que a solução de nutrientes foi baseada em trabalhos sobre degradação anaeróbia de lodo de curtume, não de carcinicultura (AGUSTINI, 2014). Além disso, o fato de não haver agitação nos biorreatores pode ter contribuído para essa extensão da fase lag, pois como ocorreu a deposição do lodo no fundo, parte dele pode não ter sido adequadamente exposto à solução de nutrientes e portanto não foi capaz de consumi-la.

As condições sem nutrientes (I e II) atingiram o estado estacionário de produção de biogás a partir do 42º dia, enquanto as curvas III e IV ainda permaneceram na fase de crescimento exponencial. Devido ao tempo limitado para realização dos experimentos não foi possível atingir o estado estacionário nas curvas III e IV (com nutrientes).

Os grandes desvios padrão se devem provavelmente a heterogeneidade do lodo. Nos extremos de seus desvios padrão as curvas I e II acabam se sobrepondo, de forma que não houve diferença estatística entre essas condições. A curva III pode ser considerada independente em relação às outras (I, II e IV), pois seus desvios padrão não se sobrepueram aos demais na maior parte dos pontos, apenas a partir do 86º ponto o seu comportamento se assemelhou ao da curva I. A curva IV se diferencia a partir do dia 67º no qual passa a ter comportamento independente. Apesar dessa diferença, não foi observado diferença estatística dessas duas condições (III e IV), provavelmente devido ao erro experimental.

4.2 Composição de Biogás

Avaliando a composição do biogás para os gases O_2 , N_2 , CH_4 e CO_2 , foi possível avaliar a pureza de metano no biogás frente a outros lodos estudados anteriormente pela literatura (Figura 10). A composição comum para lodos é de 60 % de metano (ACHINAS; ACHINAS; EUVERINK, 2017; VALENTE, 2015).

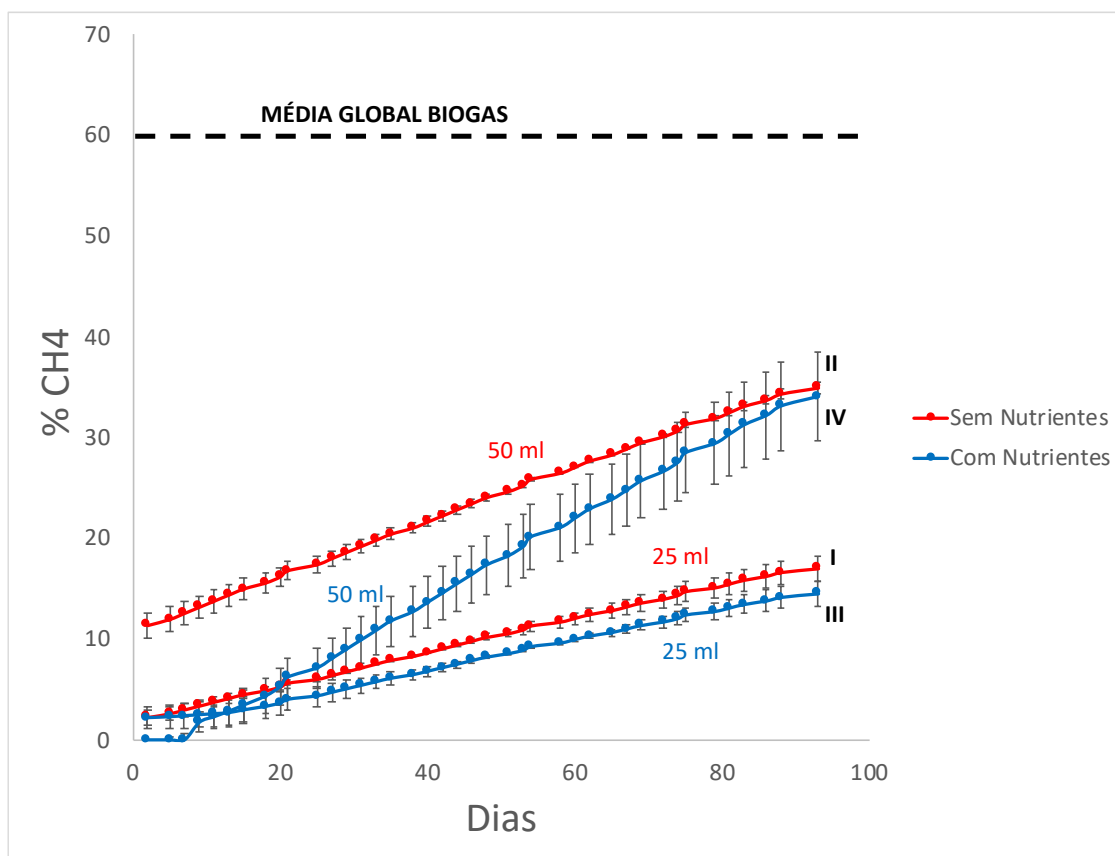


Figura 70. Evolução do percentual de metano nas amostras.

Foi realizada uma aproximação linear nos dias em que não foi realizada análise cromatográfica e assim determinou-se a evolução da composição de metano no biogás. Analisando a evolução do percentual de metano presente no biogás gerado ao longo dos dias (Figura 10), podemos verificar o comportamento de cada solução.

A condição II (50 mL – sem nutrientes) apresentou o maior percentual durante todo o experimento, partindo de 11,38 % até atingir o máximo percentual entre as quatro curvas

de (34,99 %). A condição IV (50 mL – com nutrientes) foi a segunda com maior percentual geral de metano no biogás, 34,11 %, atingindo esse valor também no 93º dia. Nota-se que no 21º dia a curva IV ultrapassou as curvas I e III passando a apresentar maior percentual de metano no biogás até o fim dos experimentos. Antes desse período, as curvas I, III e IV apresentaram percentuais de metano semelhantes. A curva I (25 mL – sem nutrientes) partiu de um percentual inicial de metano de 2,28 % até atingir 17,02 %. No início, obteve valores maiores que as condições III e IV até se estabelecer como terceira curva com maior percentual. A curva III (25 mL – com nutrientes) apresentou o menor percentual de metano no biogás durante praticamente a totalidade dos dias, foi ultrapassada pela curva IV no início e a partir do 15º dia se manteve com os menores percentuais até o final dos 93 dias de biodigestão.

Ao analisar a produção acumulada de biogás (Figura 9), observa-se que as condições de maior volume inicial de lodo III (25 ml) e IV (50 ml) produziram mais biogás que seus pares I (25 ml) e II (50 ml), respectivamente, sem nutrientes. Entretanto, ao analisar a Figura 10 as curvas I e II obtiveram uma fração maior de metano no biogás em comparação com III e IV. Pode-se inferir que, na escala apresentada, os biorreatores sem solução nutricional produziram um biogás mais puro em relação aos seus pares de mesmo volume (com nutrientes). Para 50 ml iniciais de lodo, a condição II (sem nutrientes) apresentou 34,99% de CH₄ no 93º dia e a condição IV (com nutrientes) 34,11%. Para 25 ml iniciais de lodo, a condição I (sem nutrientes) apresentou 17,02% e a condição III (com nutrientes) 14,54%.

Nenhuma das curvas atingiu 60 % de metano em sua composição durante o período do experimento. Acredita-se que algum fator inibidor tenha colaborado para a menor fração de metano no biogás.

A proporção C/N ideal para a metanogênese varia de 20 a 30 (GUERI; SOUZA; KUCZMAN, 2018). O lodo oriundo da carcinicultura foi obtido em um cultivo onde a proporção C/N é mantida em 15. O menor valor que o ideal pode ter sido o fator responsável pela baixa fração de metano presente no biogás.

Além disso, os cultivos de camarão apresentam elevada carga orgânica e níveis de fosfatos relativamente altos devido ao acúmulo de restos de ração e excretas. O excesso de carga orgânica como o de fosfatos pode inibir a digestão anaeróbia, sendo fatores limitantes e possíveis causas para a menor fração de metano presente no biogás gerado. Outra causa provável para a baixa geração de biogás é o possível uso de antibióticos durante o cultivo de camarões. Dependendo da formulação do antibiótico pode haver interferência no meio diminuindo a produção de biogás.

4.3 Produção de Metano

A produção acumulada de metano para cada amostra ao longo dos dias de experimento é mostrada na Figura 11. O maior volume de CH₄ foi gerado na condição IV (50 mL – com nutrientes) e o menor volume produzido ocorreu na condição I (25 mL – sem nutrientes).

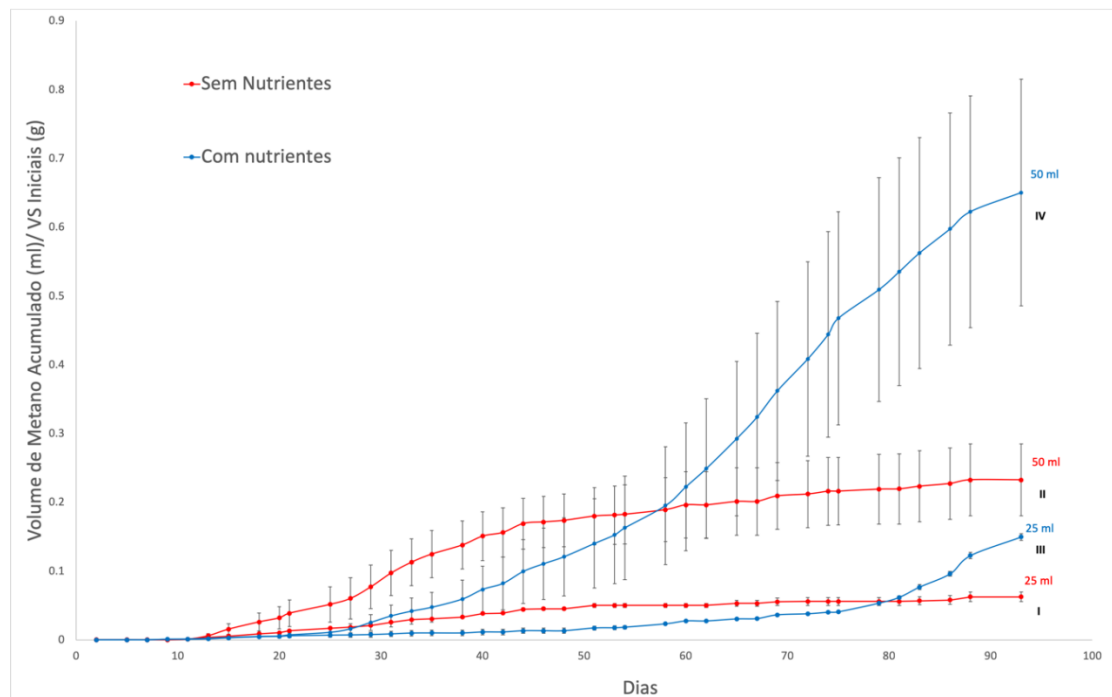


Figura 8. Produção acumulada de metano.

Em relação ao volume acumulado de metano, as soluções com nutrientes obtiveram melhores resultados em comparação àquelas sem adição nutricional. A condição IV, com adição de nutrientes foi superior a curva II, também de 50 mL, mas sem nutrientes. Nas amostras de 25 mL, a condição III, com nutrientes, obteve resultado final de 0,1496 mL de metano/g de VS enquanto a curva I registrou apenas 0,0625 mL de metano/g de VS.

Para a produção de metano, as curvas I e II também atingiram o estado estacionário e as curvas III e IV apresentaram comportamento ainda correspondente a fase de crescimento exponencial. Mesmo com fase lag mais extensa, as curvas com adição de nutrientes obtiveram maior produção acumulada de CH₄ ao fim dos 93 dias do experimento.

Foi confirmada estatisticamente, para as amostras de volume inicial de lodo de 25 mL (ANOVA; valor-*p* = 0,03), que a presença da solução de nutrientes obteve maior produção de metano. Apesar da solução de nutrientes ter sido desenvolvida para lodos oriundos de curtume a mesma obteve um bom desempenho para esse cenário.

De forma geral o padrão do volume acumulado de biogás se repetiu para o volume acumulado de metano. Assim, a melhor condição de DA, com objetivo de geração de metano, foi apresentada pela curva IV, seguida da condição II, III e I respectivamente. Entretanto, na literatura, os lodos normalmente apresentam produção semelhante de

metano, apresentando diferenças apenas nas velocidades de produção para volumes iniciais maiores de lodo em relação à volumes menores (escalonamento) (AGUSTINI; DA COSTA; GUTTERRES, 2018).

Como não houve diferenças estatísticas significativas, considera-se que as soluções com maior volume inicial de lodo (50 mL) apresentaram o mesmo volume de metano por massa de sólidos voláteis em relação àquelas de 25 mL. O mesmo foi observado em trabalhos anteriores (AGUSTINI; DA COSTA; GUTTERRES, 2018).

Todas as amostras produziram biogás, o que indica ser possível a biodegradação do lodo por digestão anaeróbica. A geração de metano aconteceu de forma mais eficiente na condição IV, seguida de II, III e I.

7.3.1 Análise de Escalonamento

O escalonamento foi analisado avaliando as curvas de produção acumulada de metano (Figura 11) durante a fase log da produção. Os pontos correspondentes à fase log de cada condição foram aproximados linearmente.

A inclinação das curvas I, II, III e IV durante a fase log indica as taxas de geração de metano. Respectivamente, cada condição apresentou os seguintes valores de inclinação, 0,0013; 0,0057; 0,0029 e 0,0056 (mL de metano/(g de VS)*t). O proposto em trabalhos anteriores (AGUSTINI; DA COSTA; GUTTERRES, 2018) é que a taxa de produção de metano seja proporcional ao volume inicial de lodo.

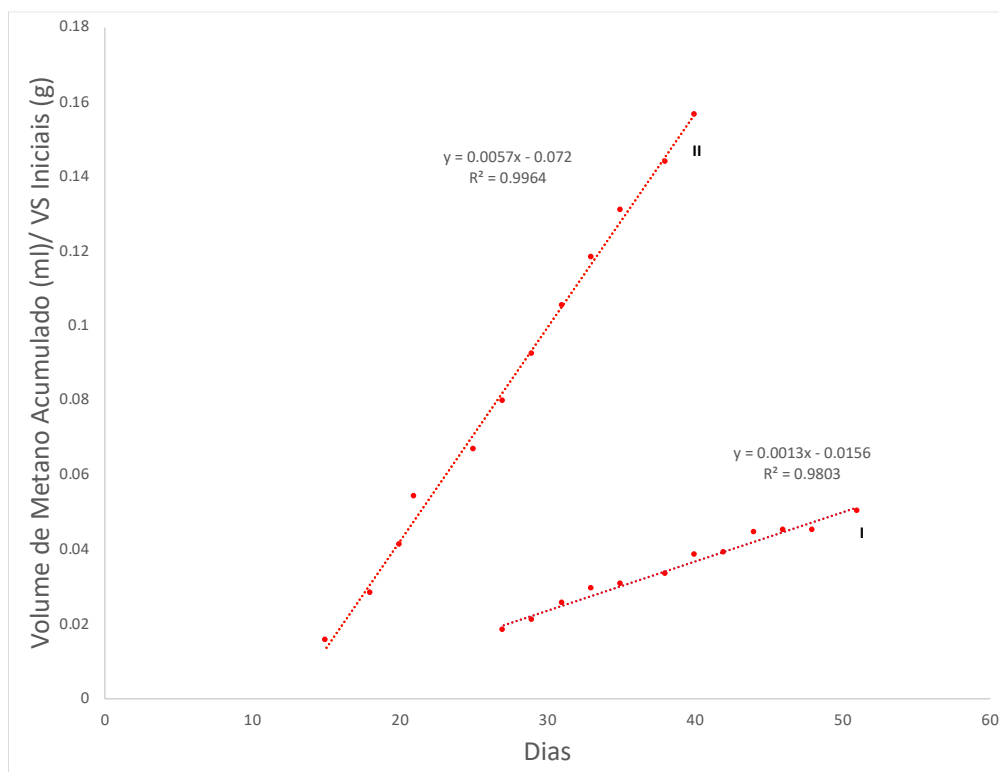


Figura 9. Aproximação linear das fases Log para amostras sem nutrientes.

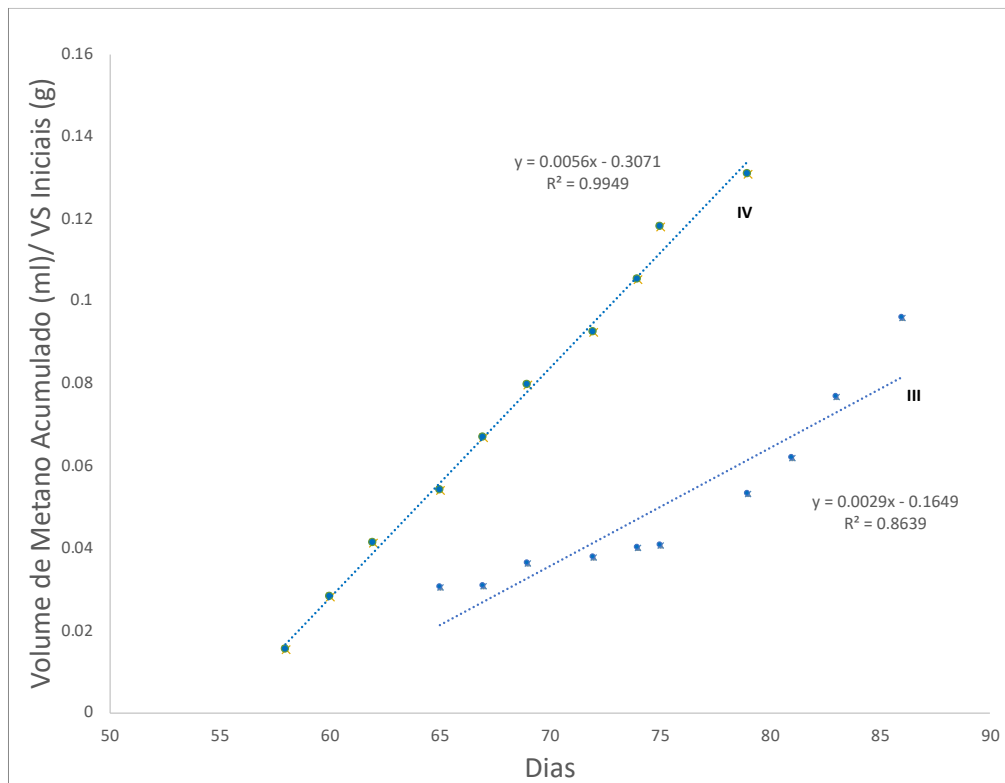


Figura 13. Aproximação linear da fase Log amostras com nutrientes.

Nas condições sem adição de nutrientes I e II (Figura 12), as velocidades de geração de metano são representadas pela inclinação das retas; I – $0,0013$ (ml de metano/(g de VS)*t) e II – $0,0057$ (ml de metano/(g de VS)*t). A razão entre elas indica que a condição II (50 mL) tem velocidade 5,37 vezes maior de geração de metano do que a curva I (25 mL). Acredita-se que essa diferença elevada é devido ao fato da condição I não ter apresentado bons resultados na produção de metano sendo provavelmente dominada por outra reação que não a metanogênese. Entretanto, a diferença nas velocidades, mesmo que acima do esperado, confirma que o aumento da escala inicial favorece a velocidade de reação.

Comparando as curvas com nutrientes III e IV (Figura 13), a velocidade da condição IV (50 ml) foi 1,93 vezes maior para os pontos selecionados. Portanto, para o lodo de carcinicultura tratado com solução de nutrientes, uma escala maior acelera a velocidade de produção de metano de forma proporcional à diferença no volume inicial de lodo.

4.4 Redução de Sólidos Totais Voláteis (VS)

A porcentagem de redução de sólidos totais voláteis (VS) se manteve acima de 60% para todas as amostras. A Figura 14 apresenta a média percentual das duplicatas para os quatro cenários apresentados.

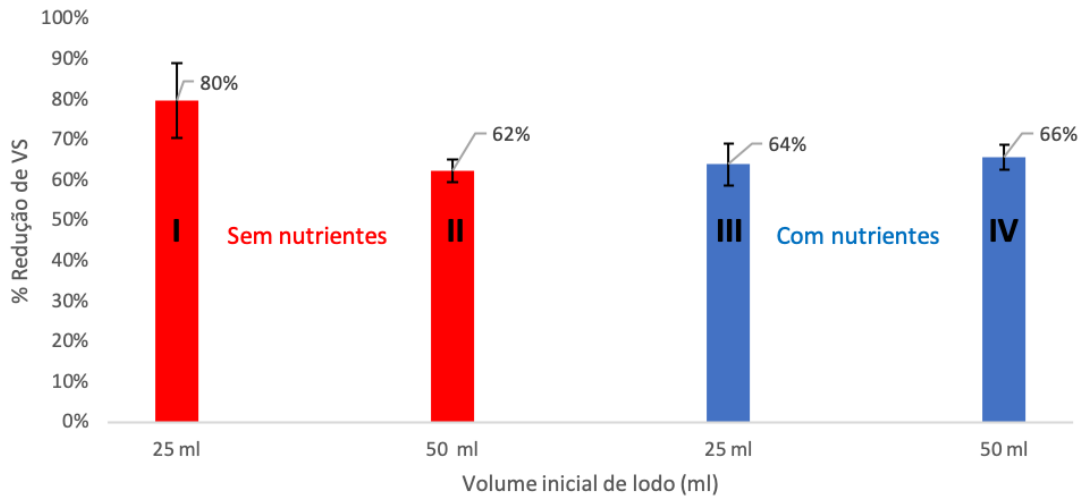


Figura 10. Redução percentual de sólidos totais voláteis (VS)

As condições IV, III e II (Figura 14) apresentaram percentual de redução de VS de 66 %, 64 % e 62 %, respectivamente, e foram, nessa ordem, as três maiores produtoras de metano. Dessa forma, a metanogênese provavelmente foi a reação dominante durante a digestão anaeróbia ocorrida nessas amostras.

Nenhuma das condições se mostrou estatisticamente melhor em relação ao volume acumulado de metano, salvo a diferença entre as amostras de 25 mL (I e III) em que a condição com a presença de nutrientes obteve melhores resultados.

A condição I, entretanto, que obteve a maior redução percentual de sólidos totais voláteis (80 %), foi a que produziu a menor quantidade de metano, o que pode indicar que a metanogênese não foi a principal reação durante a DA. Acredita-se que outras reações, como a sulfatogênese, por exemplo, foram predominantes, ocasionando boa redução de sólidos totais voláteis, porém sem produção de metano elevada em comparação com as outras amostras.

Para se determinar qual lodo obteve melhor desempenho de conversão de matéria-prima em metano, o percentual total de conversão de metano ao final do experimento (Figura 15), ou seja, o volume final acumulado de metano sobre a redução de VS, foi avaliado.

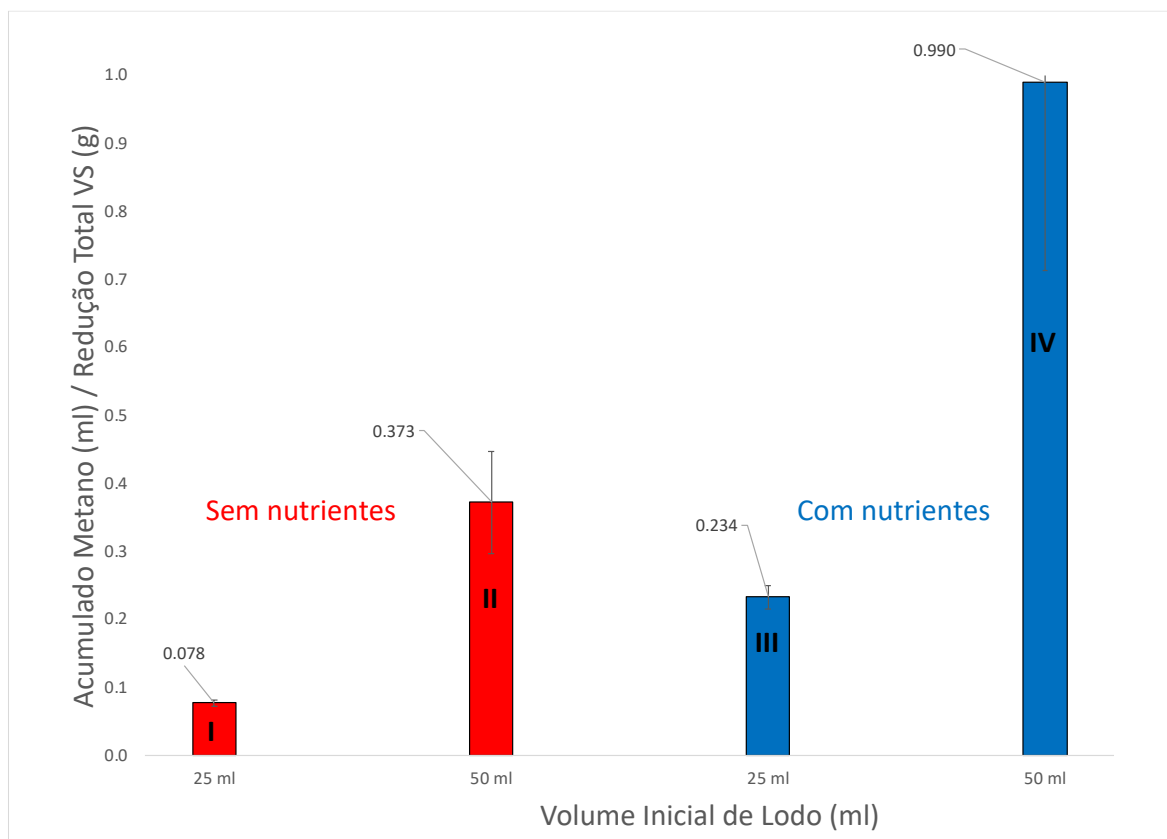


Figura 11. Conversão de VS em CH₄.

Analisando o desempenho das condições I, II, III e IV, que apresentaram no último dia de experimento conversão total de VS em metano de 0,078 mL/g, 0,373 mL/g, 0,234 mL/g e 0,990 mL/g, respectivamente, evidencia-se quais condições iniciais obtiveram melhores resultados. As amostras com maior volume inicial de lodo (50 mL) converteram VS em metano de forma mais eficiente (II e IV) que seus pares de 25 mL. Em relação à adição nutricional, para um mesmo volume inicial de lodo, aquelas amostras com presença de nutrientes obtiveram resultados superiores, com maiores taxas de conversão ao final do experimento.

Avaliando as amostras individualmente, a melhor conversão de VS em metano foi obtida nas condições IV, seguidas de II, III e I, respectivamente, reforçando que a condição IV foi a melhor entre as apresentadas pois também apresentou maior volume de biogás e metano acumulado.

Para a amostra III (25 mL), mesmo com a adição de nutrientes, a conversão final não foi maior que para II (50 ml e sem nutrientes), o que indica que um maior volume de lodo inicial disponível pode desempenhar papel mais importante na produção de metano do que apenas a adição de nutrientes.

Na condição II, a conversão atingiu 0,373 mL/g sendo superior as amostras I e III. Foi o segundo melhor desempenho entre os quatro cenários e reforça a ideia de que um maior volume de lodo inicial colabora para a metanogênese.

A condição I apresentou o pior desempenho, convertendo apenas 0,078 mL/g dos sólidos voláteis em metano. A baixa conversão reforça que a metanogênese não foi a

principal reação durante a anaerobiose e provavelmente foi substituída por outra, como por exemplo, a sulfatogênese.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

A digestão anaeróbia com produção de metano se estabeleceu nas condições testadas e pode ser considerada uma alternativa viável para o tratamento do lodo de carcinicultura de sistemas BFT. Houve produção de metano em todas as condições propostas o que permite que o lodo seja reaproveitado como fonte de energia ao invés de ser destinado como um resíduo sem utilidade.

A produção de biogás ocorreu seguindo o comportamento padrão de crescimento para cultivo fechado. Nas condições sem nutrientes, foi atingido o estado estacionário da produção de biogás. As condições com nutrientes desenvolveram fase de crescimento exponencial no final do cultivo e foram interrompidas devido a restrição do tempo disponível para realização dos experimentos.

O biogás gerado apresentou fração de metano abaixo da média encontrada na literatura de 60 %. As causas para um rendimento menor que o esperado estão na heterogeneidade do lodo e em sua proporção C:N menor que a ideal para a digestão anaeróbia. A possível presença de antibióticos no lodo, provenientes do cultivo de camarão pode ter influenciado no menor teor de metano no biogás.

Em relação ao escalonamento, as soluções com maior volume inicial de lodo apresentaram maior velocidade de geração de metano durante a fase log, o que confirmou que quanto maior a quantidade de lodo mais rápida será a digestão anaeróbia.

Quanto à redução total de sólidos voláteis, todas as condições apresentaram mais de 60 % de redução. A condição sem nutrientes de 25 ml obteve redução de 80 % mas como obteve o menor volume acumulado de metano acredita-se que outra reação dominou a digestão anaeróbia.

Trabalhos futuros podem ser realizados para complementar o que foi discutido, entre eles:

- Determinar uma solução de nutrientes mais adequada ao lodo da carcinicultura, uma vez que a utilizada foi baseada em lodos de curtume.
- Definir outros resíduos ricos em carbono que podem ser adicionados ao lodo para corrigir a proporção C:N e as concentrações de matérias orgânica e fosfatos para que a digestão anaeróbia aconteça em melhores condições.
- Dimensionamento de um biodigestor em escala real para processar o lodo de uma fazenda de criação de camarões.
- Análise para avaliar o potencial de economia gerado pela utilização do biogás como fonte de energia. Considerando o custo para instalação do biodigestor e a economia gerada ao reduzir os gastos com destinação do lodo.

6 Referências

- ABEGÁS. **Levantamento estatístico da Associação Brasileira das Empresas distribuidoras de Gás Canalizado (Abegás)**. 2017. Disponível em: <<https://www.abegas.org.br/Site/?p=65991>>. Acesso em: 13 abr. 2018.
- ABIOGAS. **Associação Brasileira de Biogás e de Biometano**. 2018. Disponível em: <<https://www.abiogas.org.br/setor-no-brasil>>.
- ACHINAS, S.; ACHINAS, V.; EUVERINK, G. J. W. A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. **Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 299–307, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.002>>
- AGUSTINI, C. **Isolamento Microbiano Na Biodegradação De Resíduos De Curtumes**. 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2014.
- AGUSTINI, C.; DA COSTA, M.; GUTTERRES, M. Biogas production from tannery solid wastes – Scale-up and cost saving analysis. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 187, p. 158–164, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.185>>
- ANDERSON, B. J. L.; VALDERRAMA, D.; JORY, D. E. **Global shrimp production review and forecast : Steady growth ahead** **Global Aquaculture Alliance**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.aquaculturealliance.org/advocate/global-shrimp-production-review-and-forecast-steady-growth-ahead/>>.
- ANEEL. **Matriz de Energia Elétrica**. 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>> . Acesso em: 28 nov. 2018.
- ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. [s.l: s.n.].
- ARANTES, R. et al. Nutrient discharge, sludge quantity and characteristics in biofloc shrimp culture using two methods of carbohydrate fertilization. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 76, p. 1–8, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.11.002>>
- BARROS, D. Cogeração de Energia com Biogás a partir de Lodo Biológico. [s. l.], 2015.
- BOOPATHY, R. Biological treatment of shrimp production wastewater. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, [s. l.], v. 36, n. 7, p. 989–992, 2009.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução N° 430**, 2011.
- EBERT, R. M. Biometano produzido a partir de biogás de ETEs e seu uso como combustível veicular. **Revista DAE**, [s. l.], v. 66, n. 209, p. 6–16, 2018.
- EPE. **Balanco energético nacional - BEN**. [s.l: s.n.].
- FAO. **The State of World Fisheries and Aquaculture - Meeting the sustainable development goals**. Roma. v. 35 Disponível em: <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0250e/i0250e.pdf>>
- GAONA, C. A. P. et al. Effect of different total suspended solids concentrations on the

growth performance of *Litopenaeus vannamei* in a BFT system. **Aquacultural Engineering**, [s. l.], v. 72–73, p. 65–69, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.03.004>>

GUERI, M. V. D.; SOUZA, S. N. M. De; KUCZMAN, O. Parâmetros operacionais do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares: uma revisão. **Biofix Scientific Journal**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 17–25, 2018.

HANS, M.; KUMAR, S. Biohythane production in two-stage anaerobic digestion system. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], 2018.

ITAIPU. **Brasil já testa carros abastecidos com gases de esgoto _ JIE - Jornal de Itaipu Eletrônico**. 2017. Disponível em: <<http://jie.itaipu.gov.br/conteúdo/brasil-já-testa-carros-abastecidos-com-gases-de-esgoto>>.

LEE, D. H. Evaluation the financial feasibility of biogas upgrading to biomethane, heat, CHP and AwR. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], 2017.

MIRZOYAN, N.; TAL, Y.; GROSS, A. Anaerobic digestion of sludge from intensive recirculating aquaculture systems : Review. [s. l.], v. 306, p. 1–6, 2010.

P. ROCHA, I. **Cultivo do Camarão Marinho: Atividade Socialmente Justa, Ambientalmente Responsável e, Economicamente Importante, de Forma Especial para o Meio Rural da Região Nordeste**. [s.l: s.n.].

SANTHANA KUMAR, V. et al. Biofloc improves water, effluent quality and growth parameters of *Penaeus vannamei* in an intensive culture system. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 215, p. 206–215, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.015>>

SILVEIRA, D. A. Da. **PRÉ-TRATAMENTO DO EXCESSO DE LODO ATIVADO VISANDO POSTERIOR ESTABILIZAÇÃO ANAERÓBIA Estudo de caso: Efluente da produção de gelatina**. 2007. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2007.

SOARES, R. da C.; SILVA, S. R. C. de M. Da. Evolução histórica do uso do biogás como como combustível. [s. l.], v. 02, n. 1, p. 1–6, 2010.

SOUZA, C. F.; LUCAS JÚNIOR, J. De; FERREIRA, W. P. M. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato: considerações sobre a partida. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 530–539, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162005000200027&lng=pt&tlng=pt>

UGGETTI, E. et al. Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 101, n. 9, p. 2905–2912, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.102>>

VALENTE, V. B. Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso de biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil. [s. l.], p. 182, 2015. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/bustani.pdf>>

VERAS, D. Biogás avança com inovações tecnológicas. [s. l.], 2017.

WASIELESKY, W. et al. Cultivo de camarões em sistema de biofiltros : realidades e perspectivas. [s. l.], p. 30–36, 2013.

WWF. **Capturas Acessórias (Bycatch) - Um tema lamentável**. 2018. Disponível em: <<https://www.fishforward.eu/pt-pt/project/by-catch/>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

ZANETTE, A. L. Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil. [s. l.], 2009.