

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA EM DIFERENTES RAZÕES INÓCULO/SUBSTRATO DE BIOPLÁSTICO COMERCIAL POLI (B-HIDROXIBUTIRATO) (PHB)

DOI: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e02020288-310>



Luiz Antonio Marafon Bacca¹
Joel Gustavo Teleken²

RESUMO

A crescente preocupação com o meio ambiente nas últimas décadas vem mobilizando vários pesquisadores pelo mundo a buscar soluções para os problemas causados pela ação humana. A utilização de polímeros biodegradáveis proveniente de fontes renováveis vem ganhando destaque pela possibilidade de substituir quase que a totalidade dos polímeros de fontes fósseis. O presente trabalho visa avaliar o processo de degradação e potencial produção de biogás do polímero PHB através do processo de biodigestão anaeróbia com operação em modo batelada. Durante o processo os parâmetros avaliados foram: pH, AV, AT, ST, SV e a composição do biogás produzido. Os resultados obtidos demonstraram que o PHB pode ser utilizado para a produção de embalagens devido a ser altamente biodegradável e produzir uma grande quantidade de biogás.

Palavras chaves: Embalagens. Biodigestão Anaeróbia. Biogás. Biopolímero. PHB.

¹ Graduando em Engenharia de Energia pela Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina. E-mail: luizmarafon@outlook.com

² Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina, Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina e Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é professor do Departamento de Engenharias e Exatas da Universidade Federal do Paraná (UFPR) - Setor Palotina. E-mail: joel.teleken@ufpr.br

Evaluation of biogas production through anaerobic biodigestion in different ratios inoculum/substrate of commercial bioplastic poly (β -hydroxybutyrate) (PHB)

ABSTRACT

The growing concern for the environment in recent decades has mobilizing several researchers around the world to seek solutions to the problems caused by human action. The use of biodegradable polymers from renewable sources has been highlighted by the possibility of replacing almost all polymers of fossil sources. The present work aims to evaluate the degradation process and potential biogas production of the polymer PHB through the anaerobic biodigestion process with batch mode operation. During the process, the parameters evaluated were: pH, AV, AT, ST, SV and the composition of the biogas produced. The results showed that the PHB can be used for packaging production due to being highly biodegradable and producing a large amount of biogas.

Key words: Packaging. Anaerobic biodigestion. Biogas. Biopolímero. PHB.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e aumento constante da produção industrial, efeitos imediatos e de longo prazo sobre o meio ambiente são constatados devido ao aumento de emissões de CO₂ na atmosfera e ao destino incorreto dos resíduos proveniente de indústrias e residências. Dentre esses resíduos, encontra-se os polímeros provenientes de combustíveis fósseis que possuem um tempo de decomposição extremamente longo se comparado a polímeros biodegradáveis, causando assim, diversos problemas pelo mundo.

É por isso que nos últimos anos, o interesse na síntese de materiais capazes de substituir os polímeros convencionais, mas com altas taxas de biodegradação e baixa toxicidade tem crescido (RAMOS, 2018). Alguns biopolímeros apresentam grande potencial para substituição, em determinadas aplicações, de polímeros provenientes de fontes fósseis (BRITO *et al.*, 2011).

Dentre os biopolímeros, um que vem se destacando é o Poli (β -hidroxibutirato) (PHB). O PHB é um polímero biocompatível, biodegradável, muito estudado para aplicações médicas e suas propriedades ainda podem ser adequadas para outras diversas aplicações (HUANG; SHETTY; WANG, 1990; SOUSA *et al.*, 2017).

Estudos de biodegradação são importantes tanto para minimizar os efeitos de resíduos plásticos sintéticos descartados no meio ambiente, como para verificar a aplicabilidade de polímeros biodegradáveis no setor de embalagens (SCHLEMMER; ANDREANI; VALADARES, 2014).

Desta forma, são necessários estudos que visem determinar o tempo que estes polímeros levam para se decompor e assim deixar de causar problemas ao meio ambiente. O presente trabalho teve por objetivo realizar a degradação do polímero PHB através do processo de biodigestão anaeróbia utilizando-se inóculo suíno.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Descarte de embalagens

A criação da embalagem surgiu dos esforços do homem em adaptar os recursos provenientes da natureza às suas necessidades vitais (LAUTENSCHLÄGER, 2001). As principais funções das embalagens são realizar a proteção e auxiliar no transporte dos alimentos (MARIANO, 2004).

Com o passar dos anos novos materiais foram sendo desenvolvidos para substituir os antigos devido a sua praticidade. O plástico convencional possui, aliada às suas propriedades de leveza, e resistência, características de durabilidade que o fazem um excelente material para diversas aplicações (AMARAL; BORSCHIVER; MORGADO, 2019).

Porém segundo Rosa *et al.* (2001), esses materiais apresentam um tempo de degradação aproximado de 100 anos, e conseqüentemente, provocam sérios problemas ambientais.

Como uma solução para este problema, surgem os polímeros biodegradáveis, que quando entram em contato com diversos tipos de microrganismos, incidência solar ou umidade se degradam em um curto período de tempo (ROSA *et al.*, 2001).

Segundo Paoli (2008), a produção de polímeros biodegradáveis sintéticos para embalagens descartáveis implica em obter um material que reúna simultaneamente as seguintes propriedades: biodegradável, processável e preço competitivo.

2.2 Biopolímeros

Biopolímeros são polímeros manufaturados a partir de uma fonte de carbono renovável, geralmente um carboidrato derivado de plantios comerciais de larga escala como cana de açúcar, milho e batata (MARINHO *et al.*, 2018).

No Brasil, em meados da década de 90, deu-se início ao desenvolvimento de tecnologia para a produção de plásticos biodegradáveis e biocompatíveis empregando matéria-prima renovável, em especial derivados da cana-de-açúcar (COUTINHO *et al.*, 2004).

Os polímeros biodegradáveis são polímeros que podem ser degradados por organismos biológicos, como por exemplo fungos e bactérias (BRITO, 2011; MARINHO *et al.*, 2018).

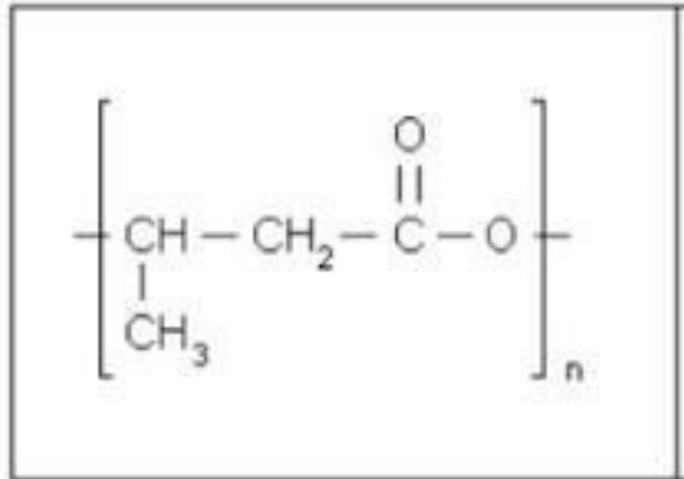
Dentre os setores em que são aplicados, destaca-se os da medicina, horticultura, agricultura, produção de materiais eletrônicos, e em especial, o setor de produção de embalagens alimentícias (ROSS; ROSS; TIGHE, 2017).

Uma boa utilidade para tais matérias é a substituição dos atuais copos de Polipropileno por copos utilizando amidos ou outros materiais biodegradáveis. Carr (2007) utilizou polímeros a partir da fécula de mandioca para construir bandejas que servem para substituir as atuais de poliestireno no armazenamento de alimentos.

2.3 Polihidroxibutirato

PHB é um homopolímero composto por unidades monoméricas de quatro átomos de carbono (SILVA *et al.*, 2007). O qual está representado na Figura 1. Este possui peso molecular relativamente alto e propriedades mecânicas similares aos plásticos convencionais, como o polipropileno (BUCCI, 2003).

Figura 1. Polihidroxibutirato



Fonte: Fonseca (2014)

Ele é um poliéster termoplástico da família dos polihidroxicanoatos produzidos por diferentes microrganismos. Tem muitas características mecânicas e físico-químicas interessantes que permitem que seja usado para várias aplicações (RAMOS *et al.*, 2018).

Materiais preparados com este biopolímero apresentam propriedades tais como biocompatibilidade e biodegradação completa quando expostos a microrganismos. Além disso, suas propriedades os fazem altamente competitivos com polímeros não biodegradáveis (POSADA *et al.*, 2011).

Segundo Fonseca (2014) a cana-de-açúcar que é uma cultura largamente cultivada em várias regiões do Brasil, pode servir de matéria prima para a sua produção.

Resíduos da indústria de alimentos e da produção de biocombustíveis tem sido os mais explorados, pela grande geração de subprodutos que se encaixam nas características necessárias para utilização nos processos fermentativos (DENADAE, 2018).

De acordo com Nascimento (2001) a produção deste bioplástico é realizada em duas etapas. Uma etapa fermentativa, onde o microrganismo metaboliza o açúcar disponível no meio e acumula o PHB no interior da célula, como fonte de reserva; e uma segunda etapa, onde o polímero acumulado é extraído e purificado até a obtenção do produto.

Este polímero apresenta a particularidade de ser altamente biodegradável quando exposto a ambientes biologicamente ativos, o que o torna muito atraente

como substituto de plásticos tradicionais em situações de descarte no meio ambiente (NASCIMENTO, 2001).

2.4 Biodigestão anaeróbia

Dentre as formas alternativas de energia renováveis, pode-se citar a de conversão da biomassa em energia secundária, destacando-se a biodigestão anaeróbia de resíduos (agroindustriais, domésticos, rurais), o que permite o seu aproveitamento sob a forma de biogás (metano) (BIPERS, 2002).

A digestão anaeróbia é um processo metabólico complexo que requer condições anaeróbias e depende da atividade conjunta de uma associação de microrganismos para transformar material orgânico em dióxido de carbono e metano (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

O processo de biodigestão anaeróbia pode ser dividido em quatro fases: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese.

Na hidrólise ocorre a quebra de partículas de carboidratos, proteínas e lipídios da matéria orgânica e a transformação em monossacarídeos, aminoácidos e ácidos de cadeia longa (OLIVEIRA, 2019).

Na Acidogênese os compostos gerados anteriormente são convertidos pelas bactérias fermentativas em uma mistura de ácidos graxos voláteis e álcoois (CAMPOS *et al.*, 1999; PATIL *et al.*, 2016). Na terceira etapa do processo temos a acetogênese, onde as bactérias acetogênicas transformam os ácidos orgânicos em acetato, dióxido de carbono e nitrogênio. E por fim a metanogênese, onde várias bactérias metanogênicas consomem acetato, dióxido de carbono e hidrogênio para produção de metano (JAIN *et al.*, 2015).

O tratamento biológico do resíduo orgânico mediante a digestão anaeróbia pode vir a ser extremamente viável, visto que segundo a caracterização nacional de resíduos, os resíduos orgânicos correspondem a mais de 50% do total de resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil (CRUZ *et al.*, 2019).

Portanto, a biodigestão anaeróbia representa uma alternativa para o tratamento de resíduos, pois além de permitir a redução do potencial poluidor, promove a geração do biogás, utilizado como fonte de energia e permite a reciclagem do efluente, podendo ser utilizado como biofertilizante (AMARAL, 2004).

2.5 Biogás

O biogás é um dos produtos da biodigestão anaeróbia. Ele é composto por uma mistura de gases sendo majoritariamente o metano (50 - 70%) e dióxido de carbono (30 – 50%), podendo ter traços de alguns outros gases como amônia, sulfeto de hidrogênio, oxigênio, hidrogênio e azoto (ANGELIDAKI *et al.*, 2018). Segundo Moço (2012) A sua caracterização é importante porque permite definir o sistema de purificação adequado, em particular para eliminar o sulfeto de hidrogênio, e para diminuir a quantidade de vapor de água.

Atualmente, existem diferentes tratamentos visando removendo os compostos indesejáveis do biogás expandindo sua gama de aplicações. Sendo algumas delas: Separação por membrana, lavagem com água a alta pressão e adsorção química (ANGELIDAKI *et al.*, 2018).

De acordo com Karlsson *et al.* (2014) o biogás após passar por um processo de purificação pode ser utilizado tanto para a produção de calor como ser utilizado em sistema de cogeração produzindo energia elétrica.

2.6 Fatores que afetam a biodigestão

O processo de biodigestão anaeróbia como pode ser afetado tanto por variações de condições operacionais, como por temperatura, pH, agitação e Tempo de Retenção Hidráulica (TRH), quanto pela estrutura e característica dos materiais orgânicos submetidos a esse processo (CREMONEZ, 2019).

A composição do substrato é importante para a quantificação e a qualidade do biogás, o que está diretamente ligado à quantidade de nutrientes e contaminantes potenciais (KARLSSON *et al.*, 2014).

Para o processo global de biodigestão, tem-se que a faixa ótima de pH situa-se entre 6,8-7,4 (MAO *et al.*, 2015). Em meio ácido, a atividade enzimática das bactérias é anulada.

A alcalinidade total e a acidez volátil podem ser relacionadas para verificar se substrato está conseguindo realizar o tamponamento e se ele não está acidificando durante o processo. Para isso se estabelece uma relação entre AV/AT que segundo Luna *et al* (2009) deve ser próxima a 0,5.

As cinéticas das reações de crescimento dos microrganismos e das reações de oxirredução durante a conversão da matéria orgânica à metano são

fortemente influenciadas pela temperatura (LEITE, 2015). As temperaturas de 35 a 40 °C são mais indicadas para a produção de biogás e diminuição da fase de partida dos biodigestores, sendo assim, consideradas importantes por permitir mais rápido início de cargas contínuas em biodigestores (MIRANDA *et al.*, 2006; SOUZA *et al.*, 2005).

3 METODOLOGIA

As atividades relacionadas a este projeto foram realizadas no Laboratório de Produção de Biocombustíveis – LPB, da Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina.

3.1 Substrato e Inóculo

O polímero utilizado como substrato para produção de biogás foi obtido de indústria especializada na produção dos mais diversos compostos de polihidroxialcanoatos (PHA), com finalidade de produção de bioplásticos. Este substrato sólido foi dissolvido diretamente no inóculo.

Como inóculo foi empregado o efluente de um biodigestor modelo canadense utilizado para tratamento de água residuária de suinocultura obtida de uma propriedade rural da cidade de Palotina –PR.

3.2 Biodigestor utilizado para realização dos experimentos

Para a condução do processo de digestão anaeróbia, empregou-se um reator com operação batelada de escala laboratorial construído em aço inoxidável, com um volume total de aproximadamente 3,8 litros. Podendo ser visualizado na Figura 2.

Figura 2. Reator e aquecedor



Fonte: Os autores.

Esta câmara de fermentação comportou a mistura do material orgânico em anaerobiose, onde as bactérias atuaram na produção de biogás. O abastecimento do biodigestor foi realizado de forma batelada no início do processo.

3.3 Delineamento experimental para avaliar a degradação do biopolímero e produção de biogás

Foram realizados dois testes separadamente. Um contendo apenas inóculo suíno proveniente de granjas de manejo intensivo. E um contendo inóculo suíno juntamente com Polihidroxiabutirato com concentração de 15 g/L. O tempo de retenção utilizado foi determinado como sendo o tempo necessário para que o processo pare de produzir biogás.

3.4 Sistema de Controle da Temperatura das Estufas

O reator foi mantido em incubadora com um aquecedor mantendo uma temperatura média de 35 °C em testes mesofílicos. A incubadora foi confeccionada com casco térmico e termostato digital para o controle da temperatura e definição de set-point, juntamente com um segundo controlador digital independente com objetivo de garantir e manter a temperatura desejada durante o processo de biodigestão. Todo o sistema de coleta do biogás foi realizado externamente à incubadora.

3.5 Parâmetros de Controle dos Reatores

Por se tratar de um experimento em batelada, as análises foram feitas anteriormente ao início do processo e após o término da produção de biogás, o que indica o final do processo de biodigestão. Com exceção a quantificação da produção de biogás que foi realizada diariamente durante o processo de biodigestão.

Avaliou-se o potencial hidrogeniônico (pH), sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV) e sólidos totais fixos (STF), acidez volátil (AV), alcalinidade total (AT), alcalinidade parcial (AP) e alcalinidade intermediária (AI) e temperatura do efluente dos reatores. As metodologias empregadas nas análises podem ser visualizadas na Tabela 1.

A análise da composição do biogás foi realizada na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Cascavel. Os constituintes do biogás (nitrogênio, dióxido de carbono e metano) foram determinados por cromatografia gasosa em sistema Shimadzu® 2010, equipado com coluna capilar Carboxen® 1010 plot (30 m x 0,53 mm x 0,30 µm). O argônio com vazão de ar de *make-up* de 8 ml/min foi utilizado como gás de arraste. Foram injetados 500 µL de amostra e a temperatura do injetor foi ajustada para 200 °C. A detecção foi realizada em detector de condutividade térmica (TCD) à temperatura de 230 °C. O forno foi programado para operar à temperatura inicial de 130 °C e aquecido para 135 °C a uma taxa de 46 °C/min durante seis minutos.

Tabela 1. Parâmetros e metodologias empregadas no experimento.

Parâmetro	Método
pH	Potenciométrico (4500-H* / APHA, 1995)
Temperatura	Leitura Direta
ST	Gravimétrico (2540-B / APHA, 1995)
STV	Gravimétrico (2540-E / APHA, 1995)
STF	Gravimétrico (2540-E / APHA, 1995)
AV	Volumétrico (SILVA, 1977)
AT	Volumétrico (SILVA, 1977)
AP	Volumétrico (SILVA, 1977)
AI	Volumétrico (SILVA, 1977)
Metano	Cromatográfico (PENTEADO et al., 2013).

Adaptado de ZENATTI, 2011.

3.6 Avaliação da Produção de Biogás

A quantificação de biogás foi realizada com gasômetro confeccionado em PVC (Figura 3) imerso em recipiente contendo solução salina acidificada de forma que a partir do deslocamento da tubulação de PVC determina-se o volume ocupado pelo biogás. A solução contendo 25% (v/v) de cloreto de sódio e 3% (v/v) de ácido sulfúrico tem a função de evitar o escape do biogás e impedir a dissolução do CO₂ presente no gás (LARSEN, 2009). A partir disso, converteu-se esse volume para condições normais de temperatura e pressão (CNTP) obtendo-se o valor final produzido de biogás.

Figura 3. Sistema de coleta e quantificação de biogás



Fonte: Os autores

4 RESULTADOS e DISCUSSÕES

Inicialmente, o substrato e inóculo foram avaliados para garantir que os parâmetros estavam de acordo com o que especifica a literatura para que haja uma boa degradação do mesmo pelo processo de biodigestão. Após tais análises, foram adicionados ao reator para que ocorresse o processo de digestão anaeróbia.

Nos primeiros 15 dias de digestão do substrato que continha apenas inóculo, notou-se que não houve produção de biogás, optou-se por interromper o processo e realizar a análise do pH do substrato. Com isso pode-se perceber que houve uma acidificação do reator.

Devido a isso, foi necessário um novo processo com um novo inóculo. Estes foi avaliado antes do início do processo e após o final do mesmo. Além disto, juntamente com o substrato adicionou-se 3 g/L de bicarbonato de sódio para servir como tampão e evitar que o pH baixe muito durante a etapa de acidogênese (CREMONEZ, 2019).

Tabela 2. Resultados obtidos a partir da totalidade das análises

Inóculo + PHB							
Tratamentos	pH	AT (mg/L NaHCO ₃)	AV (mg/L NaHCO ₃)	AV/AT	ST (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)
Afluente	8,33	13594,17	3129,12	0,23	17373,33	5450	11923,33
Efluente	8,03	6841,77	1124,71	0,16	11090	5315	5775
Inóculo							
Tratamentos	pH	AT (mg/L NaHCO ₃)	AV (mg/L NaHCO ₃)	AV/AT	ST (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)
Afluente	7,44	2999,8	1884,51	0,63	7962,5	3710	4252,5
Efluente	7,72	1687,39	1480,95	0,88	5925	3392,5	2532,5

Fonte: Os autores

4.1 Perfil dos valores de pH durante o processo de biodigestão

Em um processo de biodigestão, a faixa de pH sugerida é entre 6 e 8. Pode-se perceber que tanto o valor do afluente como o do efluente na presença de PHB se encontram acima dos valores recomendados. No entanto o valor do efluente é inferior ao do afluente. Isso se deve ao fato da atividade de bactérias acidogênicas durante o processo que acabam por diminuir o pH do reator.

Apesar do valor do afluente ser superior ao recomendado pela literatura optou-se por não corrigir tal parâmetro, assim como fez Luna *et al* (2009) ao realizar a biodegradação anaeróbia de resíduos orgânicos e obtendo bons resultados. Rosa *et al* (2002) chegou a valores próximos após realizar a degradação do polímero PHB.

Com relação a biodegradação do inóculo puro, pode-se perceber que ambos os valores se encontram dentro do que sugere a literatura. Nota-se também que houve um aumento no valor medido do efluente com relação ao afluente. Acredita-se que isso ocorreu devido a adição de bicarbonato que tinha como função impedir a acidificação do reator.

4.2 Perfil de Alcalinidade e Acidez durante a biodigestão

Alcalinidade é a capacidade que a amostra possui de neutralizar ácidos, enquanto que acidez é a capacidade quantitativa de um ácido reagir com uma base forte num determinado pH (BARANA, 2000).

Mais importante que os valores em si é a relação estabelecida entre eles, que segundo Luna *et al* (2009) deve ser próxima a 0,5 para que o reator esteja em equilíbrio. Pode-se perceber que os valores se encontram abaixo de 0,5 tanto no afluente como no efluente quando o substrato continha PHB, sendo menor o valor do efluente devido a uma maior queda da acidez volátil. Já com relação a avaliação apenas de inóculo ambos os valores se encontram um pouco acima, sendo o valor do efluente superior ao do afluente devido a adição de bicarbonato de sódio.

4.3 Eficiência na Remoção de Sólidos pelo processo de biodigestão

A remoção de sólidos é uma avaliação de suma importância pois somente com ela pode-se determinar se o efluente do biodigestor está dentro das normativas regulatórias e se o processo está ocorrendo de maneira eficiente.

Pode-se perceber pela tabela 2 que houve uma significativa remoção de ST e STV do substrato que continha PHB. Obtendo uma remoção de 36 e 52% respectivamente. Com relação a degradação de inóculo apenas houve uma remoção de 25 e 40% de ST e STV respectivamente. Tais valores são inferiores aos encontrados por Cremonez (2019) ao realizar a biodigestão anaeróbia de polímero obtido a partir da fécula de mandioca, sendo utilizado inóculo suíno para o processo.

Com isso podemos perceber que com a adição de PHB além de existir uma maior remoção de sólidos, o biopolímero possui uma alta biodegradabilidade, podendo ser utilizado como embalagens que irão se degradar em um curto espaço de tempo.

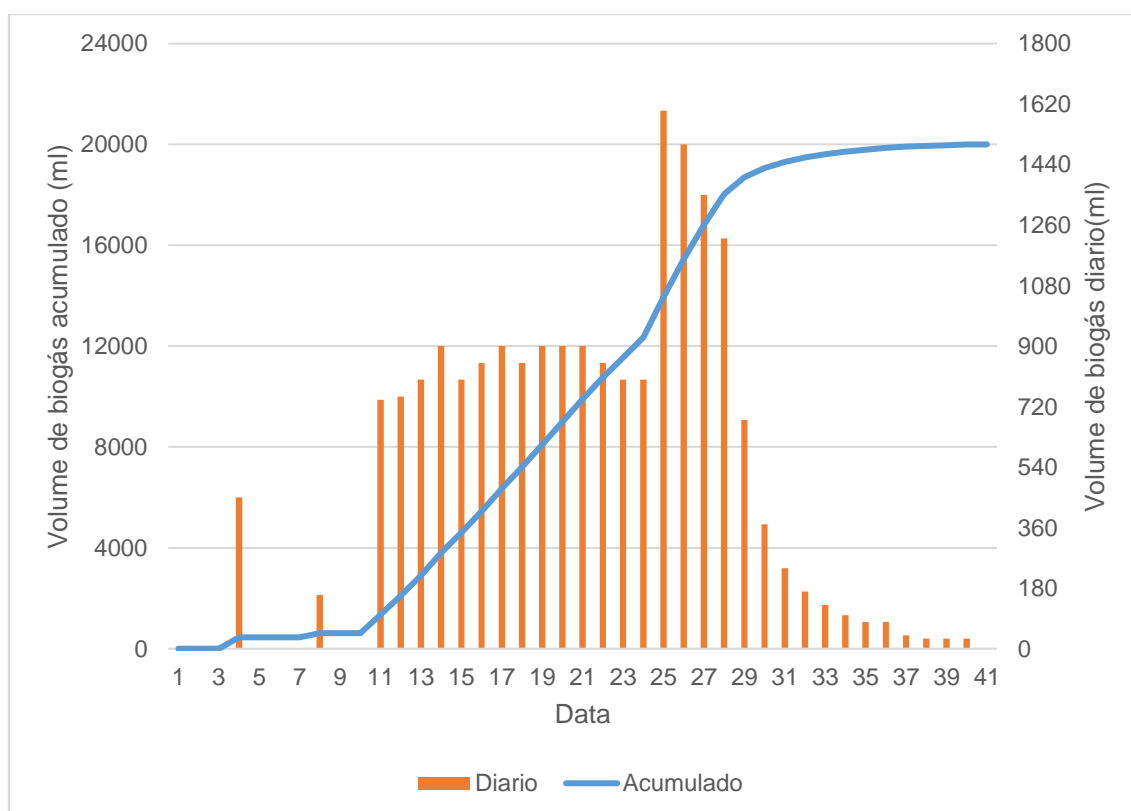
4.4 Avaliação do volume de biogás produzido

O processo de degradação por biodigestão anaeróbia do substrato contendo inóculo suíno juntamente com PHB teve um tempo de detenção hidráulica de 42 dias. Durante este período foi realizada quantificação diária de

biogás produzido e coletado semanalmente biogás para ser analisado por métodos cromatográficos para determinar a sua composição.

O Gráfico 1 demonstra a quantidade diária e a acumulada de biogás produzida ao longo do processo. Pode-se perceber que no 11º dia houve uma produção rápida e contínua de biogás, o que indicou o início a degradação. Tal produção se manteve constante até o dia 25 onde houve novamente uma elevada produção de biogás, sendo quase o dobro dos valores percebidos até então. A partir deste percebe-se uma queda acentuada da produção de biogás, o qual cessou completamente no 41º dia, após produzir 20000 ml de biogás. Tal valor é superior ao encontrado por Cremonez (2019) ao realizar a biodigestão de polímero obtido a partir de fécula de mandioca. Sendo assim, é mais vantajoso se utilizar PHB caso seu interesse seja o aproveitamento energético do biogás produzido.

Gráfico 1. Produção de biogás diária/acumulada na presença de PHB

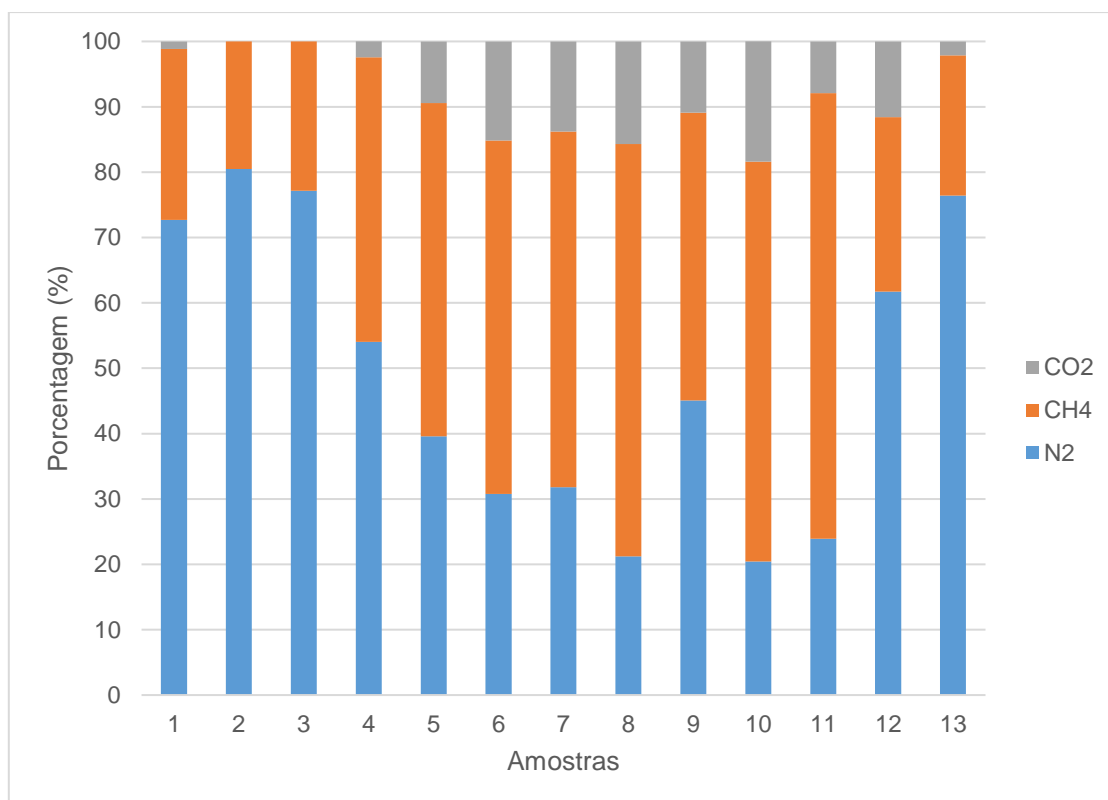


Fonte: Os autores

As coletas de gás para realização das análises cromatográficas ocorreram nos dias 8,13,14,15,16,18,19,20,22,27,29,36 e 38 do experimento, os quais se

encontram no gráfico acima. Estes serão tratados por amostras 1 a 13 no decorrer deste relatório para facilitar a compreensão. Os resultados obtidos para composição do biogás encontram-se no Gráfico 2.

Gráfico 2. Composição do biogás



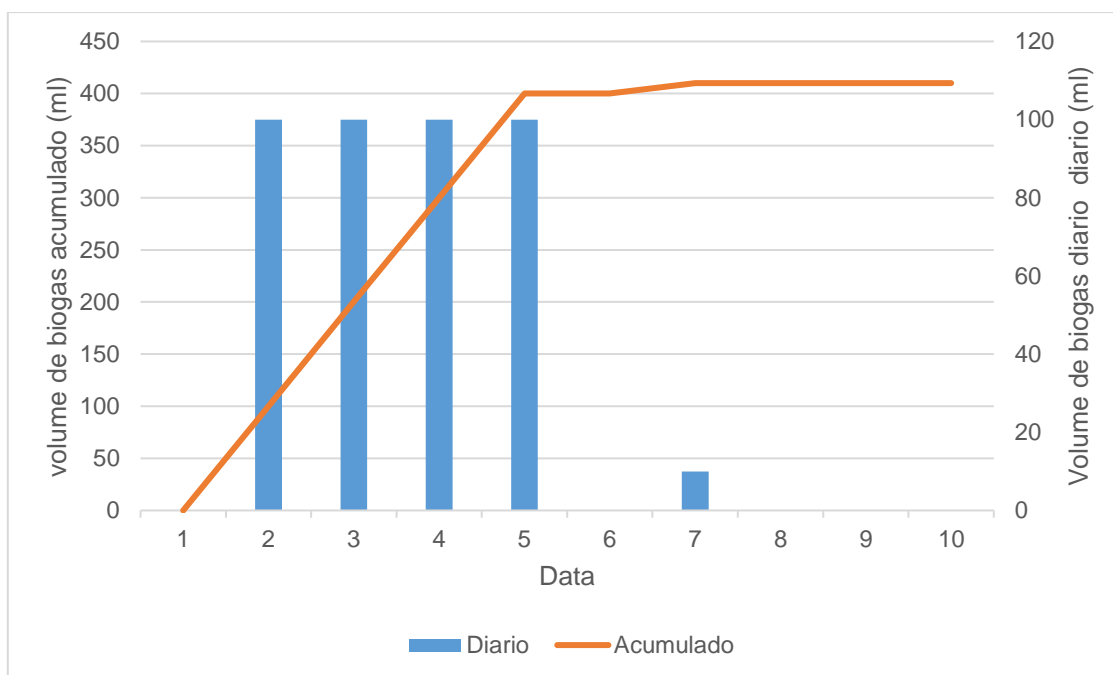
Fonte: Os autores

Com o passar do tempo há uma maior concentração de metano, atingindo um pico de 68% na 11ª amostra analisada. Que é um valor próximo ao alcançado por Guo *et al.* (2013) ao realizar a biodigestão de espumas Biodegradáveis a base de amido de trigo, fécula de batata e amido de milho. Também é próximo ao valor encontrado por Kolstad *et al.* (2012) ao realizar a degradação de polímeros biodegradáveis com inoculo retirado de um digestor de laboratório alimentado com silagem de milho.

O processo de degradação por biodigestão anaeróbia do substrato contendo apenas inóculo suíno teve um tempo de detenção hidráulica de apenas 7 dias. Durante este período foi realizada quantificação diária de biogás produzido, que pode ser observada no Gráfico 3 como sendo de 410 ml acumulado. Isso ocorre devido ao material já estar quase totalmente equilibrado

pois já passou por um processo de biodigestão e contém apenas microrganismos, os quais sem uma fonte de substrato acabam por morrerem em poucos dias.

Gráfico 3. Produção de biogás diária/acumulada sem presença de PHB



Fonte: Os autores

Sendo assim pode-se observar que a produção de biogás proveniente da biodigestão anaeróbia tendo como substrato inóculo suíno e PHB obteve um valor 400% superior aquele que continha apenas inóculo suíno. Portanto, a utilização de PHB em processos de biodigestão anaeróbia possui um futuro promissor e que pode ser muito explorado caso tal polímero seja utilizado com mais frequência para a produção de embalagens.

5 CONCLUSÕES

Os Polímeros Biodegradáveis à base de polihidroxicanoatos apresentaram elevado potencial de degradação via biodigestão anaeróbia, uma vez que a elevada produção de biogás encoraja o desenvolvimento de linhas de pesquisas que visem aos estudos energéticos pela degradação desses polímeros.

A utilização de Polihidroxibutirato na produção de embalagens comerciais foi comprovada como sendo benéfica ao meio ambiente devido a remoção de sólidos significativa, fazendo com que seu tempo de degradação seja muito inferior ao de polímeros convencionais e, portanto, os impactos ambientais serão muito menores.

Além da biodigestão anaeróbia outras formas de degradação podem ser analisadas, como a compostagem. A qual tem como produto o biofertilizante, que possui uso comercial e alto custo agregado.

REFERÊNCIAS

AMARAL, C., AMARAL, L., LUCAS JÚNIOR, J., NASCIMENTO, A., FERREIRA, D. AND MACHADO, M.. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Ciência Rural**, 34(6), pp.1897-1902. 2004

AMARAL, M. A., BORSCHIVER, S., MORGADO, C. R. V. Análise do segmento de bioplásticos: prospecção tecnológica em “plásticos verdes”, PHA e PLA. **Engevista**, v. 21, n. 2, p.228-241, maio 2019.

ANGELIDAKI, I., TREU, L., TSAPEKOS, P., LUO, G., CAMPANARO, S., WENZEL, H. AND KOUGIAS, P. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, 36(2), pp.452-466. 2018.

APHA. **Standard Methods: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19 ed.1995.

AQUINO, S., CHERNICHARO, C., FORESTI, E., SANTOS, M. AND MONTEGGIA, L. Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 12(2), pp.192-201. 2007.

ARRUDA, M., AMARAL, L., PIRES, O. AND BARUFI, C. Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa. **Revista científica eletrônica de agronomia**. 2002.

BARANA, A. C. **Avaliação de tratamento de manipueira em biodigestores fase acidogênica e metanogênica**. 2000. x, 95 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2000.

BIPERS: COLETÂNEA DE TECNOLOGIAS SOBRE DEJETOS SUÍNOS. [s.i], ago. 2002. Disponível em: <<http://docsagencia.cnptia.embrapa.br/suino/bipers/bipers14.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2018.

BOND, T., TEMPLETON, M. R.. History and future of domestic biogas plants in the developing world. **Energy For Sustainable Development**, [s.l.], v. 15, n. 4, p.347-354, dez. 2011.

BRITO, G. F., AGRAWAL, P., ARAÚJO, E. M., & MÉLO, T. J. A. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista eletrônica de materiais e Processos**, 6(2), 127-139. 2011.

BREITBURG, D., LEVIN, L., OSCHLIES, A., GRÉGOIRE, M., CHAVEZ, F., CONLEY, D., GARÇON, V., GILBERT, D., GUTIÉRREZ, D., ISENSEE, K., JACINTO, G., LIMBURG, K., MONTES, I., NAQVI, S., PITCHER, G., RABALAIS, N., ROMAN, M., ROSE, K., SEIBEL, B., TELSZEWSKI, M., YASUHARA, M. AND ZHANG, J. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. **Science**, 359(6371), p.7240. 2018.

BUCCI, D.. **Avaliação de embalagens de phb (poli (ácido 3- hidroxibutírico)) para alimentos.** Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2003

CAMPOS, J. R. Tratamento de esgoto sanitário por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. **Bio**, 1999.

CARR, L. **Desenvolvimento de embalagem biodegradável tipo espuma a partir de fécula de mandioca.** Doutorado. Universidade de São Paulo. 2007).

COSTA, L., MIRANDA, C., CAMPOS, M., ASSIS, D. and DRUZIAN, J. Mapeamento tecnológico do processo de obtenção do phb através da análise de pedidos de patentes. **Revista Gestão, Inovação e Tecnologias**, 3(2), pp.55-69. 2013.

COUTINHO, B., MIRANDA, G., SAMPAIO, G., SOUZA, L., SANTANA, W. AND COUTINHO, H. A importância e as vantagens do polihidroxibutirato (plástico biodegradável). **HOLOS**, 3, p.76-81. 2004.

CREMONEZ, P. **Digestão anaeróbia de um polímero à base de fécula de mandioca.** Doutorado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2019.

CRUZ, H. M. et al. Estudo do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás de digestão anaeróbia de resíduos alimentares. **Research, Society And Development**, [s.l.], v. 8, n. 5, p.1-17, 8 mar. 2019.

DENADAE, B. E. **Avaliação da produção de biopolímeros pelas cepas bacterianas DsA. N042 e DsA. N049 isoladas de Diabrotica speciosa usando subprodutos industriais.** Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. 2018.

FONSECA, C. C. **Produção e utilização do biopolímero poli (hidroxibutirato) (PHB) em embalagens alimentícias.** Graduação. Universidade de São Paulo. 2014.

GUO, M., STUCKEY, D.C., MURPHY, R.J. End-of-life of starch–polyvinyl alcohol biopolymers. **Bioresource Technology**, v.127, p.256–266. 2013.

HUANG, J., SHETTY, A. S., WANG, M. S. Biodegradable plastics: A review. **Advances In Polymer Technology**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.23-30, 1990.

JAIN, S., JAIN, S., WOLF, I., LEE, J. AND TONG, Y. A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 52, pp.142-154, 2015.

KARLSSON, T., KONRAD, O., LUMI, M., SCHMEIER, N., MARDER, M., CASARIL, C., KOCH, F. AND PEDROSO, A. **Manual básico de biogás.** 1st ed. Lajeado: UNIVATES. 2014.

KOLSTAD, J., VINK, E., DE WILDE, B. AND DEBEER, L. Assessment of anaerobic degradation of Ingeo™ polylactides under accelerated landfill conditions. **Polymer Degradation and Stability**, 97(7), pp.1131-1141, 2012.

KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., DO AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Embrapa Suínos e Aves-Livro científico (ALICE), 2019.

LAUTENSCHLÄGER, B. I. **Avaliação de embalagem de consumo com base nos requisitos ergonômicos informacionais.** Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2001.

LARSEN, A. C. **Co-digestão anaeróbia de glicerina bruta e efluente de fecularia.** Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2009.

LAY, J., LI, Y. AND NOIKE, T. Effect of Moisture Content and Chemical Nature on Methane Fermentation Characteristics of Municipal Solid Wastes. **Doboku Gakkai Ronbunshu**, (552), pp.101-108. 1996.

LAY, J., LI, Y. AND NOIKE, T. Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. **Water Research**, 31(6), pp.1518-1524. 1997.

LEITE W. R. M. **Digestão anaeróbia em temperaturas mesofílica e termofílica de lodo de ete usando reatores de estágio único e dois estágios.** Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

LUNA, M., LEITE, V., LOPES, W., SOUSA, J., SILVA, S. Tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos. **Engenharia Agrícola**, 29(1), pp.113-121. 2009

MAO, C., FENG, Y., WANG, X., REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 45(C), pp 540-555. 2015.

MARIANO, M. AND FROEMMING, L. Considerações Sobre a História da Embalagem de Alimentos: A Evolução de Uma Poderosa Ferramenta de Marketing. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN**. São paulo. 2004.

MARINHO, V., ALMEIDA, T., CARVALHO, L. AND CANEDO, E. Aditivação e Biodegradação de Compósitos PHB/Babaçu. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, 13(1), pp.37-41. 2018.

MARTINS, P., MACHADO, A., FONSECA, E. AND REIS, K. Compósitos biodegradáveis a base de polihidroxibutirato-hidroxivalerato (PHB-HV) reforçados com resíduos do beneficiamento do café. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 15(3), pp.400-404, 2010.

MIRANDA, A. P., AMARAL, L. A., LUCAS JR, J. Influência da temperatura na biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos e suínos. **X ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E VI ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO-UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA**, p. 2928-2931, 2006.

MOÇO, E. A. S. **Projeto de uma unidade produtora de biogás**. Mestre. Instituto Politécnico de Tomar. 2012.

NASCIMENTO, J. F. DO. **Estudo da Processabilidade e da Caracterização do Poli (ácido 3- hidroxibutírico)- PHB Obtido a Partir de Cana- de-Açúcar**. Mestrado Universidade Estadual de Campinas. 2001.

OLIVEIRA, D. E. P. **Estudo de viabilidade da produção de energia elétrica a partir do biogás gerado pela biodigestão de resíduos sólidos orgânicos de uma central de abastecimento paulista**. Mestrado. Universidade Nove de Julho. 2019.

DE PAOLI, M. **Degradação e estabilização de polímeros**. São Paulo: Artliber. 2009.

PARAMESWARAN, P. AND RITTMANN, B. Feasibility of anaerobic co-digestion of pig waste and paper sludge. **Bioresource Technology**, 124, pp.163-168. 2012.

PATIL, P., GOGATE, P., CSOKA, L., DREGELYI-KISS, A. AND HORVATH, M. Intensification of biogas production using pretreatment based on hydrodynamic cavitation. **Ultrasonics Sonochemistry**, 30, pp.79-86. 2016.

PENTEADO, E., LAZARO, C., SAKAMOTO, I. AND ZAIAT, M. Influence of seed sludge and pretreatment method on hydrogen production in packed-bed

anaerobic reactors. **International Journal of Hydrogen Energy**, 38(14), pp.6137-6145. 2013.

POSADA, JOHN A. ET AL. Design and analysis of poly-3-hydroxybutyrate production processes from crude glycerol. **Process Biochemistry**, [s.l.], v. 46, n. 1, p.310-317, jan. 2011

RAMOS, A. F., HERNANDEZA, A. E., MENDEZB, D. A., CABEZAB, I. O., & MORENO-SARMIEN TOB, N. Purification of Poly (3-hydroxybutyrate) Produced by Fatty Acid Fermentation Using Organic Polar Solvents. **Chemical engineering**, 67.pp 667-672. 2018.

RAMOS, A., ESPINOSA, A., CABEZA, I., MENDEZ, D., LILIANA, O. AND MORENO, N. Extraction, purification and modification of poly (3-hydroxybutyrate) produced by the fermentation of fatty acids with Burkholderia cepacia B27. **New Biotechnology**, 44, p.S107. 2018.

ROSA, D. S., FRANCO, B. L., & CALIL, M. R. Biodegradability and mechanical properties of polymeric mixtures. **Polímeros**, 11(2), 82-88. 2001.

ROSA, D. S., CHUI, Q. S. H., FILHO PANTANO, R., & AGNELLI, J. A. M. Avaliação da Biodegradação de Poli-β-(Hidroxibutirato), Poli-β-(Hidroxibutirato-co-valerato) e Poli-ε-(caprolactona) em Solo Compostado. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 12(4),pp311-317. 2002.

ROSS, G., ROSS, S., TIGHE, B. Bioplastics. **Brydson's Plastics Materials**, pp.631-652. 2017.

SANTA CATARINA. PAULO ARMANDO VICTÓRIA DE OLIVEIRA. **Embrapa Suínos e Aves. Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: Manual de Boas Práticas**. Concordia: Embrapa. 109 p. Projeto de controle da degradação ambiental decorrente da suinocultura em Santa Catarina. PNMA II – Gestão Integrada de Ativos Ambientais. 2004.

SCHLEMMER, D. A., ANDREANI, L., VALADARES, L. F. **Comunicado técnico 10: Biomateriais: Polímeros e Compósitos**. Brasília: Embrapa, 9 p. 2014.

SILVA, L., GOMEZ, J., ROCHA, R., TACIRO, M. AND PRADELLA, J. Produção biotecnológica de poli-hidroxialcanoatos para a geração de polímeros biodegradáveis no Brasil. **Química Nova**, 30(7), pp.1732-1743. 2007.

SILVA, M. O. S. A DA. **Análises físico-químicas para controle de estações de tratamento de esgotos**. São Paulo: São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 226 p. 1977

SOUZA, C., LUCAS JÚNIOR, J., FERREIRA, W. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato: considerações sobre a partida. **Engenharia Agrícola**, 25(2), pp.530-539. 2005.

SOUSA, W., BARBOSA, R., FOOK, M., FILGUEIRA, P. AND TOMAZ, A. Membranas de polihidroxibutirato com hidroxiapatita para utilização como biomaterial. **Matéria** (*Rio de Janeiro*), 22(4). 2017.

YUSUF, M. O. L., DEBORA, A., OGHENERUONA, D. E. Ambient temperature kinetic assessment of biogas production from co-digestion of horse and cow dung. **Research in Agricultural Engineering**, 57(3), 97-104. 2011.

ZANELLA, T. V., SERRANO, T. M., DINIZ, P. **Por uma nova ordem ambiental internacional: Poluição marinha por plásticos e o direito internacional do ambiente**. Curitiba: Juruá. 308 p, 2013.

ZENATTI, D. C. **Tratamento e aproveitamento de resíduos da produção do biodiesel: água residuária e glicerol**. Doutor. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel. 2011.