



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO**  
**IFG CAMPUS GOIÂNIA**  
**MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

**Vanessa Kelly Alves Araújo**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO  
RESÍDUO PROVENIENTE DE PERDAS NA INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO  
DA SOJA**

**Goiânia, 2019.**

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO**  
**IFG CAMPUS GOIÂNIA**  
**MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

Vanessa Kelly Alves Araújo

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO  
RESÍDUO PROVENIENTE DE PERDAS NA INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO  
DA SOJA**

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em  
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG  
(PPGTPS- IFG) -Dissertação de Mestrado  
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de  
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:  
Tecnologia de Redução e Gerenciamento de  
Resíduos.

---

Orientador: Prof. Dr. Danna Pereira Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira

**Goiânia, 2019.**

Ar15a Araújo, Vanessa Kelly Alves.

Avaliação do potencial de geração de biogás a partir do resíduo proveniente de perdas na indústria de processamento da soja / Vanessa Kelly Alves Araújo. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2019.  
69 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Danns Pereira Barbosa.

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Goiânia.

Inclui anexo.

1. Biogás. 2. Biometano. 3. Resíduos - soja. I. Barbosa, Danns Pereira (orientador). II. Oliveira, Sérgio Botelho de (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Goiânia. IV. Título.

CDD 665.776

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740  
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO  
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação                      | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia - Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor: **VANESSA KELLY ALVES ARAÚJO**

Matrícula: **20162011140220**

Título do Trabalho: **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO RESÍDUO PROVENIENTE DE PERDAS NA INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO DA SOJA**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 08/08/2019

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, \_\_\_\_\_, 08/08/2019  
Local Data

Vanessa Kelly Alves Araújo

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**IFG CÂMPUS GOIÂNIA**  
**MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

**Vanessa Kelly Alves Araújo**

**“AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR  
DO RESÍDUO PROVENIENTE DE PERDAS NA INDÚSTRIA DE  
PROCESSAMENTO DA SOJA”**

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em  
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG  
(PPGTPS - IFG) - Dissertação de Mestrado  
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de  
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:  
Tecnologia de Redução e Gerenciamento de  
Resíduos.

Prof(a). Dr(a). DANNIS PEREIRA BARBOSA (presidente e orientador – PUC GOIÁS /  
PPGTPS)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). SÉRGIO BOTELHO DE OLIVEIRA (coorientador – IFG PPGTPS)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). DAYWES PINHEIRO NETO (avaliador – IFG PPGTPS)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). CHRISTIAN GONCALVES ALONSO (avaliador externo – UFG)

Assinatura

Aprovado em: 21/02/2019

## DEDICATÓRIA

Aos professores do programa, especialmente ao meu orientador e ao meu coorientador. A minha família, amigos e todos que de alguma forma contribuíram para realização do presente trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao criador que permitiu-me ter esta experiência na minha vida, com todos os fatores e todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte dela. Em especial agradeço ao meu orientador, pelo qual tenho muito respeito, Professor Dr. Danns por ter sido tão atencioso, paciente, pela confiança, ensinamentos, estímulo e disponibilidade, ao meu coorientador Professor Dr. Sérgio Botelho primeiramente por ter cruzado meu caminho, pela confiança, amizade, conhecimentos partilhados, também pela disponibilidade até nos horários de almoço de domingo e feriados para solucionar os problemas ocorridos.

Sou grata a minha amiga Me. Suzel (*in memoriam*), pela imensurável experiência repassada, pela ajuda no laboratório e apoio durante a pesquisa, além de ser um exemplo constante de mulher cheia de garra. À Me. Rosana e ao Me. Thiago pelo suporte durante os experimentos. A minha irmã Vitória pela força e companheirismo. Ao meu querido Davi, por todo apoio em diversos momentos difíceis. Ao meu anterior gerente, Pedro de Alcântara pela confiança e flexibilidade no expediente de trabalho tornando possível a realização do curso e dos experimentos. A minha amiga Me. Dayane, por tudo que nosso encontro nos proporcionou, obrigada pela inspiração, parceria e coragem. Ao meu amigo Professor Wellington e ao Valmir por não se pouparem em ajudar alguém. Aos meus pais Carlos e Ivone por me ensinarem independência e perseverança.

**EPÍGRAFE**

“Sabedoria é a meta da alma humana; mas a pessoa, à medida que em seus conhecimentos avança, vê o horizonte do desconhecido cada vez mais longe.” —  
Heráclito

**TÍTULO:** AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO RESÍDUO PROVENIENTE DE PERDAS NA INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO DA SOJA

**AUTOR:** VANESSA KELLY ALVES ARAÚJO

**ORIENTADOR:** DANNS PEREIRA BARBOSA

**COORIENTADOR:** SÉRGIO BOTELHO DE OLIVEIRA

### **RESUMO**

A indústria da soja movimentava grande parte do mercado alimentício, farmacêutico e de biocombustíveis no Brasil. Com a alta produção, há também um alto valor de geração de subprodutos que ainda não tem uma destinação adequada, advindos de perdas de grãos durante o seu processamento. Esse material, que atualmente é considerado um resíduo do ponto de vista da indústria de processamento de soja no estado de Goiás, foi usado como biomassa para avaliação do potencial de geração de biogás através de conversão anaeróbia em escala de laboratório. Os dois tipos de resíduos Soja Varrição (SVA) e Soja do Decantador (SD) foram submetidos a dois experimentos: o primeiro de potencial bioquímico de biometano (BMP) durante 30 dias no Sistema Automático de Teste de Potencial de Biometano II (AMPTS II) e o segundo experimento de avaliação da composição dos gases do biogás gerado através de reatores semicontínuos durante 80 dias em condições mesofílica de temperatura a 40 °C. No primeiro experimento foi obtido BMP de 443,30 Nml.g<sup>-1</sup>MSO para SVA e 414,20 Nml.g<sup>-1</sup>MSO para SD. Ao longo dos 80 dias de experimento nos reatores de fluxo semicontínuos, foram produzidos 73,49 NL de biogás somando o valor dos 4 reatores de capacidade total de 1 L de substrato e inóculo. A composição média de biometano no biogás para os reatores que continham SVA foi de 56,1 %, enquanto nos reatores que continham amostras de SD a média foi 67,1 %, este se mantendo a partir do 14º dia de experimento com a produção de biometano acima de 65%, chegando até 74%. No cálculo teórico para conversão do biogás em energia elétrica foi obtido o valor de 21.161 KWh.mês<sup>-1</sup> somando o potencial de SVA e SD, o que seria o bastante para abastecer 134 residências por mês, mostrando ser favorável para conversão anaeróbia para fins de aproveitamento energético.

**Palavras-chave:** Biometano, Digestão Anaeróbia, Decomposição.

**TITLE:** EVALUATION OF BIOGAS GENERATION POTENCIAL FROM WASTE FROM LOSSES IN THE SOYBEAN PROCESSING INDUSTRY

**AUTHOR:** VANESSA KELLY ALVES ARAÚJO

**ADVISER:** DANNS PEREIRA BARBOSA

**CO-ADVISER:** SÉRGIO BOTELHO DE OLIVEIRA

### **ABSTRACT**

The soybean industry moves much of the food, pharmaceutical and biofuels market in Brazil. With high production, there is also a high value of by-product generation that does not yet have an adequate destination, resulting from grain losses during processing. This material, that is currently considered a residue for to soybean processing industry in the state of Goiás was used as biomass for the evaluation of biogas generation potential through anaerobic conversion in lab-scale. The two types of residues, Soybean Sweep (SVA) and Soybean from the Decantador (SD) were submitted to two experiments: the first was biomethane biochemical potential (BMP) for 30 days in the Automatic Methane Potential Test System II (AMPTS II) and the second experiment of evaluation of the gas composition of the biogas generated through semi-continuous reactors during 80 days in mesophilic conditions of temperature at 40 °C. In the first experiment BMP was obtained from 443.30 Nml.g<sup>-1</sup>MSO for SVA and 414.20 Nml.g<sup>-1</sup>MSO for SD. During the 80 days of experiment in the semi-continuous flow reactors, 73.49 NL of biogas were produced, adding the value of the 4 reactors of total capacity of 1 L of substrate and inoculum. The average biomethane composition in the biogas for the reactors containing SVA was 56.1%, while in the reactors containing SD samples the mean was 67.1%, which was maintained from the 14th day of experiment with the production of biomethane above 65%, up to 74%. In the theoretical calculation for the conversion of biogas to electric energy, the value of 21161 KWh.month<sup>-1</sup> was obtained, adding the potential of SVA and SD, which would be sufficient to supply 134 residences per month, showing a favorable for anaerobic conversion to of energy use.

**Keywords:** Methane, Anaerobic digestion, Decomposition.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Representação do processo da digestão anaeróbia.....	22
<b>Figura 2</b> - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa .....	30
<b>Figura 3</b> -Conjunto do AMPTS .....	35
<b>Figura 4</b> - Reatores de Fluxo Semicontínuo .....	37
<b>Figura 5</b> –Analisador de composição dos gases .....	38
<b>Figura 6</b> – Medidor de volume de gás .....	38
<b>Figura 7</b> - Caçamba de armazenagem onde foi coletada a amostra de Soja Varrição.....	41
<b>Figura 8</b> -Caçamba de armazenagem onde foi coletada a amostra de Soja Decantação .....	41
<b>Figura 9</b> -Volume acumulado de Biometano ao longo dos 30 dias de experimento .....	44
<b>Figura 10</b> -Cálculo de Potencial Bioquímico de Biometano (BMP) das amostras SD e SVA no experimento em batelada .....	45
<b>Figura 11</b> - Produção acumulada de Biogás ao longo do experimento com as amostras substratos SVA e SD no reator de fluxo semicontínuo .....	46
<b>Figura 12</b> - Potencial bioquímico de Biogás dos substratos SVA, SD e Inóculo nos reatores de fluxo semicontínuo .....	47
<b>Figura 13</b> - Composição e volume em NmL da geração diária do biogás nos reatores de fluxo semicontínuo de SVA.....	48
<b>Figura 14</b> - Composição em porcentagem da produção de biogás dos reatores contendo SVA .....	49
<b>Figura 15</b> - Concentração de H <sub>2</sub> S no biogás gerado pelas amostras de SVA.....	50
<b>Figura 16</b> - Composição e volume diário em NmL dos reatores de fluxo semicontínuo contendo amostras de SD .....	51
<b>Figura 17</b> - Composição e volume diários da produção de biogás dos reatores contendo SD.	51
<b>Figura 18</b> - Composição do biogás em porcentagem e H <sub>2</sub> S em Partes por Milhão dos reatores de SD .....	52
<b>Figura 20</b> - Monitoramento do FOS/TAC durante o processo de digestão anaeróbia .....	55

**LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 1-</b> Resíduos na produção de biodiesel e extração do óleo vegetal .....	19
<b>Quadro 2-</b> Alternativas de aplicação biogás.....	25
<b>Quadro 3-</b> Impurezas no biogás e tecnologias de remoção .....	27
<b>Quadro 4-</b> Necessidade de remoção de gases componentes no biogás .....	27

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Valores de composição de biogás teóricos.....	21
<b>Tabela 2-</b> Características de algumas tecnologias de conversão de biogás em energia elétrica .....	26
<b>Tabela 3-</b> Especificação proposta para o Biometano.....	28
<b>Tabela 4-</b> Poder Calorífico Inferior de alguns gases combustíveis .....	29
<b>Tabela 5-</b> Equivalência energética de 1 m <sup>3</sup> biogás a alguns combustíveis gasosos .....	29
<b>Tabela 6-</b> Valores obtidos durante a caracterização da MSO das amostras de SVA .....	42
<b>Tabela 7 -</b> Valores obtidos durante a caracterização da MSO das amostras de SD .....	42
<b>Tabela 8 -</b> Caracterização de sólidos totais e massa seca orgânica para experimento no AMPTS II .....	42
<b>Tabela 9 -</b> Caracterização de sólidos totais para experimento no Reator de fluxo semicontínuo .....	42
<b>Tabela 10 -</b> Valores de referências para alimentação dos reatores no início do experimento em batelada.....	43
<b>Tabela 11 -</b> Quantidade de massa fresca de cada substrato e inóculo adicionados nos reatores de fluxo semi-contínuo .....	46
<b>Tabela 12-</b> Redução de matéria orgânica ou biodegradabilidade das amostras no experimento de reatores semicontínuo .....	53
<b>Tabela 13:</b> resultados das análises de nitrogênio amoniacal nas amostras de SVA e SD .....	53
<b>Tabela 14-</b> Concentrações de Fósforo Total ns amostras SVA e SD .....	54
<b>Tabela 15-</b> Tabela com os resultados das análises de FOS/TAC do experimento com reatores de fluxo semicontínuo e o valor de biomassa adicionado em cada reator após análise. ..	56
<b>Tabela 16-</b> Valores de referência usados para o cálculo de estimativa de conversão para energia térmica e elétrica.....	57
<b>Tabela 17-</b> Resultados dos cálculos de estimativa de conversão para energia térmica e energia elétrica .....	57

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AOVs	Ácidos orgânicos voláteis
AMPTS II	Sistema Automático de Teste de Potencial de Metano II
DQO	Demanda química de oxigênio
FOS	Ácido Orgânico Volátil
MSI	Massa Seca Inorgânica
MSO	Massa Seca Orgânica
pH	Potencial hidrogeniônico
SD	Soja do Decantador
STP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
SVA	Soja Varrição
TAC	Carbono Inorgânico Total
TS	Sólidos Tótais
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	A SOJA NO BRASIL.....	18
2.2	RESÍDUOS DE SOJA.....	19
2.3	PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE SOJA.....	20
2.3.1	Processo de Digestão Anaeróbia .....	20
2.3.2	Produção de Biogás com resíduos e subprodutos da Soja.....	23
2.4	UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS .....	25
2.4.1	Tecnologias de conversão.....	25
2.4.2	Purificação do biogás.....	26
2.4.3	Cálculos de conversão .....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
3.1	COLETA E TRATAMENTO DAS AMOSTRAS.....	30
3.2	COLETA E TRATAMENTO DO INÓCULO.....	31
3.3	CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS, DIGESTATOS E INÓCULO .....	31
3.3.1	Análises para montagem do experimento em batelada no AMPTS e nos reatores de fluxo semicontínuo. ....	31
3.3.2	Determinação do pH.....	33
3.3.3	Determinação do FOS/TAC .....	33
3.3.4	Potencial Bioquímico de Biometano .....	34
3.3.5	Determinação de Biodegradabilidade do Substrato.....	34
3.4	EXPERIMENTOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS .....	35
3.4.1	Experimentos das amostras Soja Varrição (SVA) e Soja do Decantador (SD) em regime de batelada .....	35
3.4.2	Experimento em reatores semicontínuos.....	36
3.5	TRATAMENTO DOS DADOS DO REATOR SEMICONTÍNUO.....	38
3.6	CÁLCULOS DE CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA.....	39
3.6.1	Cálculo de conversão em energia térmica .....	39
3.6.2	Cálculo de conversão em energia elétrica .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
4.1	COLETA E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	41
4.1.1	Teor de sólidos totais (MS) e Massa Seca Orgânica (MSO).....	41
4.2	BIOGÁS PRODUZIDO PELAS AMOSTRAS DE SVA E SD NOS REATORES EM BATELADA E EM FLUXO SEMICONTÍNUO .....	43
4.2.1	Potencial bioquímico de Biogás no AMPTS II .....	43
4.2.2	Potencial bioquímico de Biogás no Reator de Fluxo Semi-contínuo.....	46
4.2.3	Redução de matéria orgânica após digestão anaeróbia .....	53
4.2.4	Resultado de Nitrogênio Amoniacal .....	53
4.2.5	Resultados das análises de fósforo .....	54
4.2.6	Resultados FOS/TAC .....	55
4.2.7	Estimativa do potencial de conversão de energia termina e elétrica.....	56
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>58</b>

**ANEXO I- ARTIGO APRESENTADO NO 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE  
SCIENTIFIC CONFERENCE ON ELECTRIC POWER ENGINEERING (EPE) ..... 66**  
..... 69

## 1 INTRODUÇÃO

O cenário mundial de preocupação com as mudanças climáticas associado à crescente demanda por energia despertam o desenvolvimento de tecnologias e produtos que contribuam para a descentralização da matriz energética mundial e diminua a dependência de fontes de combustíveis fósseis.

As energias renováveis sempre foram vistas como a solução para o quadro energético, porém os custos com investimento as tornaram desfavoráveis sobre o menor custo do petróleo (FREITAS, 2015). Todavia, através de investimentos em pesquisas já foi possível se obter ganhos com o desenvolvimento de energias mais limpas, tanto ambiental quanto econômico. No Brasil, isso já é uma realidade no setor de biocombustíveis, devido aos incentivos do governo, além dos fatores propícios como o clima e o solo brasileiro (EICHLER, 2015).

Como exemplo, biodiesel foi desenvolvido como uma opção ao diesel, um derivado de petróleo altamente poluente. Assim, esse biocombustível apresentou uma série de vantagens, na diminuição de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera e por ser praticamente isento de enxofre em sua composição (PAIVA, 2010). O biodiesel é produzido no Brasil principalmente a partir da soja, sendo este mais um dos motivos do crescimento da indústria da soja desde 2006, quando o governo federal lançou o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel -PNPB (OSAKI E BATALHA, 2008).

A indústria de processamento da soja movimentam o setor alimentício, o setor de cosméticos, o setor de combustíveis, de alimentação animal e alguns subprodutos que são vendidos para indústrias estrangeiras (ROST, 2013).

Apesar de o biodiesel ser obtido através de uma fonte considerada sustentável, o processamento da soja para sua produção gera um alto volume de resíduos. Durante algumas etapas do processamento industrial da soja ocorrem perdas de produção dos grãos que ainda não são aproveitadas, pois não estão em padrões para retornar ao sistema produtivo, sendo considerados como resíduo. Esse resíduo se divide pelas seguintes características: os grãos provenientes das perdas advindas de contêineres, esteiras e ao redor das prensas que são varridos no chão de fábrica e armazenados em caçambas, chamado de resíduo de soja varrição (SVA) e os remanescentes denominados como soja do decantador (SD) que são grãos e outros resíduos carregados pelas águas pluviais e ficam retidos através da decantação no processo de pré-tratamento dessa água pluvial, onde não é adicionado nenhum reagente químico, sendo o resíduo sólido retirado na etapa de decantação. Ambos os resíduos são compostos por grãos

crus e cozidos e impurezas como por exemplo areia. Estima-se que na indústria onde foi realizado o estudo, a média de produção desse resíduo é de 50 toneladas/mês no período de safra, onde os resíduos são reservados em caçambas e destinados ao aterro sanitário local.

Derubein e Steinhauser (2011) e Rohstoffe et al. (2010) afirmam que resíduos que contêm alto teor de proteínas, carboidratos e gorduras, nutrientes determinantes para produção do biogás, apresentam qualidades propensas para gerar biogás através de digestão anaeróbia. Por serem compostos em sua maior parte por soja, que apresenta alto teor de lipídeos, proteínas e carboidratos, os resíduos analisados neste estudo ainda não têm uma aplicação limpa, o que os tornam propícios para digestão anaeróbia. A alta quantidade de resíduos gerados se torna ainda mais atraente, pois pode gerar energia em grande escala a ser recuperada na própria indústria e diminuir a carga de resíduos da indústria a ser levada para o aterro sanitário local.

Vidal (2015) afirma ainda que a conversão anaeróbia possa ser uma alternativa para recuperação da energia contida na matéria orgânica convertendo-a em biogás, a utilização do biogás é uma opção vantajosa de consumo de energia mais limpa, pois reduz a emissão de gás biometano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), gases que contribuem para o aquecimento global, produzidos naturalmente durante o processo de decomposição da matéria orgânica, em um aterro sanitário, por exemplo (AL SEADI, 2008). O gás metano contido no biogás possui propriedades caloríficas em torno de  $35.800 \text{ kJ.m}^{-3}$  e através da sua recuperação energética é possível evitar a emissão para a atmosfera, oxidando-o em gás dióxido de carbono, que tem menor implicação sobre o efeito estufa (IPCC, 2015).

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

Este estudo propõe a avaliação do potencial de geração de biogás a partir dos resíduos do processamento da soja de uma indústria que produz óleos vegetais, farelo de soja, biodiesel, glicerina, lecitina, além de alguns produtos derivados, localizada em Anápolis, Goiás. Os resíduos SVA e SD foram submetidos a experimentos para analisar a geração de biometano e composição do biogás através de reatores em batelada e semicontínuos.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar ensaios de caracterização das amostras-substratos: soja proveniente de varrição (SVA) e Soja do Decantador (SD).

- Avaliar o Potencial Bioquímico de Biometano (BMP – Biochemical Methane Potential) dos substratos SVA e SD usando o sistema automático de teste de potencial de metano II (AMPTS II);
- Avaliar composição e geração do biogás em reatores semicontínuos;
- Avaliar biodegradabilidade das amostras após a digestão anaeróbia;
- Realizar cálculos de estimativa de conversão em energia térmica e elétrica a partir dos resultados da geração de biogás.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão subdividida em três tópicos principais, necessários para o conhecimento dos temas abordados e construção das etapas metodológicas desenvolvidas. O primeiro tópico aborda o histórico e utilização da soja no Brasil. O tópico seguinte apresenta os resíduos da soja, considerando os processos industriais para geração de subprodutos. Já o último tópico aborda a produção do biogás a partir da soja, considerando os aspectos referentes ao processo de digestão anaeróbia e à produção de biogás com resíduos e subprodutos da soja.

### 2.1 A SOJA NO BRASIL

A soja (*Glycine max (L.) Merrill*), de origem asiática, teve seu cultivo consolidado no Brasil a partir da chegada de técnicas agrícolas no fim dos anos 70, avançando por diversas partes do país, fazendo com que o Brasil se tornasse um dos principais produtores e exportadores do mundo. (KNORR, 2017; BARBOSA E ASSUNÇÃO, 2001; MAZZALI, 1995).

Apesar de a soja ser de clima temperado, foi adaptada ao clima tropical diante das boas características físicas do solo que facilitam a mecanização integral do cultivo (DOMINGUES, 2016). Além disso, outros motivos para a fixação do cultivo da oleaginosa no país se deram pela cultura e sucessão com o trigo, desenvolvimento de tecnologias para cultivo, carência de óleos vegetais como alternativa aos óleos animais, cooperações para produção e comercialização, pois em meados dos anos 70 o valor da soja no mercado mundial impulsionou o cultivo e levou às pesquisas para adaptação da soja no Cerrado (DALL'AGNOL, 2016). O sucesso do cultivo, alavancado pelo desenvolvimento científico e tecnológico, favoreceu o povoamento e valorização de regiões no interior do país, inclusive Goiás (FREITAS, 2011).

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) (2019) a estimativa é que até no fim de 2019 a produção do grão tenha atingido 118,8 milhões de toneladas. Já a estimativa de processamento do grão divulgada pela Associação Brasileira de Óleos Vegetais (ABIOVE) (2019) é o recorde de 43,6 milhões de toneladas em 2018.

Em virtude do seu alto valor nutricional, a soja é consumida mundialmente sendo fonte de proteínas, lipídeos, vitaminas e carboidratos (PEREIRA, 2013). Devido ao avanço da indústria de processamento do grão, hoje é possível o aproveitamento máximo dos grãos e a obtenção de diversos produtos (FREITAS, 2011). O processamento da soja transforma o grão em três grupos

de produtos bases: comestível, óleos não comestíveis, e a lecitina, usada em produtos farmacêuticos e alguns alimentos (DOMINGUES, 2016).

Importante também para a crescente demanda pela oleaginosa é aumento do uso do biodiesel, pois esse biocombustível tem como o seu principal insumo a soja, sendo que 71% da produção do biodiesel advém da soja (ABIOVE, 2018)

## 2.2 RESÍDUOS DE SOJA

Na indústria de processamento da soja, o grão passa por diversas etapas até a obtenção dos produtos finais. O Quadro 1 apresenta os principais processos para obtenção dos produtos na indústria de processamento da soja, os resíduos gerados e a aplicação para reaproveitamento.

**Quadro 1-** Resíduos na produção de biodiesel e extração do óleo vegetal

Processo	Resíduo	Origem	Composição	Aplicação
<b>Extração do óleo vegetal</b>	Farinha desengordurada, cascas	Limpeza, preparação e moagem de grãos, bagas e amêndoas	Proteína, fibras e celulose, com teor de umidade de 40-60%	Cogeração de energia elétrica, obtenção de composto, produção de ração e aglomerados
	Particulados	Limpeza e preparação dos grãos, bagas e amêndoas	Farelo e partículas sólidas	-
	Efluentes	Extração do óleo com solvente	Baixa DBO, farelo dissolvido em suspensão e traços de solvente	-
<b>Refino do óleo/ Preparo da matéria-prima</b>	Efluentes, Gomas, Borrás	Branqueamento, neutralização, winterização, degomagem e desodorização	Efluente rico em fosfatos, sabões, metais, leticinas, ceras e substâncias coloidais	Obtenção de composto (adubo orgânico), utilização na indústria química
<b>Produção de Biodiesel</b>	Ácido Graxo	Processo de refino de óleo vegetal e/ou matéria graxa, processo de transesterificação e do tratamento da glicerina	Líquido oleoso, cor amarelada com propriedades químicas a depender do óleo utilizado	Combustível para caldeiras; Esterificação para produção de B100
	Glicerina	Processo de transesterificação	Glicerol	Utilização na indústria química; Combustível para caldeiras.
	Água dos condensadores e evaporadores	Processo de secagem (óleo vegetal, glicerina e biodiesel) e destilação da glicerina e éster	Água de processo	Reciclagem em outra etapa do processo.

**Quadro 2-** Resíduos na produção de biodiesel e extração do óleo vegetal

(conclusão)

	Efluente da lavagem do biodiesel	Lavagem do biodiesel	Sabão, resíduo de catalisadores e água acidificada	-
<b>Produção de Biodiesel</b>	Sal	Filtragem	Resíduos do dessecante utilizado	Obtenção de composto (adubo orgânico)
<b>Tratamento da Glicerina</b>	Resíduo Glicérico	Destilação da Glicerina	Resíduos da destilação da glicerina: ácidos graxos livres e impurezas minerais	Energia, adubo orgânico, produção de álcool, catalisador.

Fonte: Adaptado de MMA, 2006.

O processamento da soja gera uma grande quantidade de resíduos como palha, fibras, cascos e melão, ricos em celulose, matéria prima de baixo custo, atrativa para produção de biocombustíveis (CAILLOT, 2017).

Há ainda uma grande disponibilidade de resíduos de soja gerados no campo, como caule, palhas, folhas, vagens, grãos que constituem cerca de 1.230 mil de toneladas por ano no Brasil (FAOSTAT, 2016).

## 2.3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE SOJA

### 2.3.1 Processo de Digestão Anaeróbia

O Biogás é uma mistura gasosa resultante da digestão anaeróbia da matéria orgânica. Esse processo acontece naturalmente em pântanos, rúmen de animais ruminantes, fundo de lagos, entre outros ambientes livres de oxigênio, onde é propício para atividade metabólica desse grupo de bactérias (DERUBEIN E STEINHAUSER, 2011). A digestão anaeróbia também resulta em material reduzido em teor orgânico que é chamado de digestato. A composição do biogás, representada na Tabela 1, varia de acordo com a composição da biomassa utilizada e os parâmetros como pH e temperatura durante a realização das etapas de digestão anaeróbica que são divididas em quatro: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (DERUBEIN E STEINHAUSER, 2011; KARLSSOM et al., 2014; ROHSTOFFE et al., 2010).

**Tabela 1**-Valores de composição de biogás teóricos

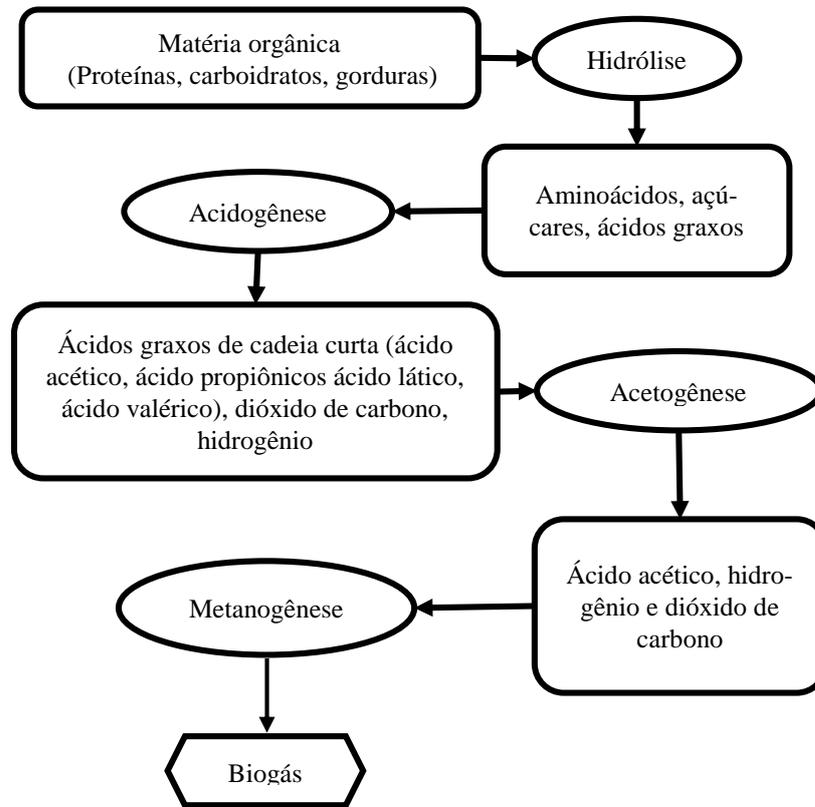
<b>Composto</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Volume %</b>
Metano	CH <sub>4</sub>	50-75
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	25-45
Vapor de água	H <sub>2</sub> O	2-7
Oxigênio	O <sub>2</sub>	<2
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	<2
Amônia	NH <sub>3</sub>	<1
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	<1
Sulfeto de Hidrogênio	H <sub>2</sub> S	<1

Fonte: Adaptado AL SEADI et al., 2008.

Na hidrólise, compostos orgânicos complexos como proteínas, carboidratos e lipídeos são convertidos pelas bactérias hidrolíticas em compostos orgânicos simples como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares; na acidogênese há a ação das bactérias fermentativas acidogênicas que convertem as moléculas simples em ácidos graxos voláteis como ácido acético, ácido láctico, ácido propiônico, ácido valérico além de dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, álcoois. Na terceira etapa há conversão desses compostos em hidrogênio dióxido de carbono e acetato pela atividade das bactérias acetogênicas. Por fim, as bactérias arqueas metanogênicas assimilam esses compostos dando origem ao biogás (DERUBEIN e STEINHAUSER, 2011; HOFMANN, 2000; KARLSSOM et al., 2014; ROHSTOFFE et al., 2010; VIANA, 2011). A Figura 1 representa as etapas do processo de digestão anaeróbia e a produção do biogás.

De certo modo, essas etapas da digestão anaeróbia ocorrem de forma simultânea, mesmo os microrganismos tendo necessidades diferentes em relação à temperatura, pH e disposição de nutrientes. A variação da temperatura pode gerar a morte de alguns microrganismos e até interromper o processo de produção de biogás (ROHSTOFFE, 2010; TIEST, 2014; VICTORINO et al., 2016; WRESTA E BUDHIJANTO, 2012).

**Figura 1**– Representação do processo da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de ROHSTOFFE et al., 2010.

As arqueas metanogênicas são mesófilas (faixa entre 20 a 40 °C) e as mais sensíveis principalmente à mudança rápida de temperatura, por isso é ideal manter uma temperatura constante no processo. Geralmente são empregadas nas usinas de biogás temperaturas entre 37± 5° C obtendo-se boa eficiência nessa faixa mesofílica (ROHSTOFFE et al., 2010; TIEST, 2014; VICTORINO et al. 2016; WRESTA E BUDHIJANTO, 2012). Nos casos em que há interesse na esterilização da biomassa, como em estações de tratamento de esgotos, é empregado a faixa termofílica de 45 a 60 °C (PEREIRA, 2016).

Segundo Caillot (2017), o monitoramento do pH é outro fator que tem se mostrado essencial no processo de digestão anaeróbia, pois se o conteúdo do biorreator estiver fora da faixa ótima, a capacidade de neutralização tampão fica comprometida, inibindo todo o processo.

Estudos anteriores mostram que as bactérias hidrolíticas e acidogênicas têm como faixa ideal 5,0-6,3, porém nessa faixa de pH ocorre a inibição das acetogênicas e metanogênicas. Como as hidrolíticas também trabalham na faixa de pH um pouco mais elevado, o ideal é ajustar o reator para trabalhar na faixa de pH ideal para as metanogênicas (6,5-8) que são as mais sensíveis (CAILLOT, 2017). Zhang et al. (2009) usando lodo ativado como substrato, obteve a

maior produção de metano quando o pH se manteve em 7,0.

Em relação à alimentação (adição de substrato) dos reatores, é necessário ser controlada, pois a rápida adição de carga pode aumentar a concentração de ácidos orgânicos voláteis (AOVs) e conseqüentemente tornar o processo de biodigestão instável comprometendo a produção de biogás. Os AOVs são provenientes dos processos de hidrólise e acidificação de organismos, e o acúmulo desses ácidos atrapalha a metanogênese. (DAI et al., 2015).

Por outro lado, a baixa concentração dos AOVs também pode causar instabilidade, portanto, é necessário saber a melhor hora de alimentá-los para continuar a produção de biogás satisfatória. (ROSATO, 2017; ROHSTOFFE et al., 2010). Por isso, um parâmetro importante de ser investigado é a razão entre a alcalinidade intermediária causada pela acumulação de ácidos orgânicos voláteis e a alcalinidade por bicarbonatos, conhecidos também pelo termo alemão FOS/TAC (RIAZI E CHIARAMONTI, 2017).

O monitoramento do FOS/TAC foi iniciado por Mc Grhee (1968) que fez testes para determinar a concentração de ácidos graxos em digestores anaeróbios titulando o ácido. Baseado na metodologia de Mc Grhee, Nordmann W. (1977) desenvolveu a metodologia de titulação que é bastante utilizada.

Scano et al. (2014) afirmam que o parâmetro FOS/TAC é comumente utilizado para monitoramento de processos de digestão anaeróbica. De forma direta, a relação FOS/TAC corresponde a um indicador que avalia os processos de fermentação de uma amostra. O valor do TAC é uma estimativa da capacidade tampão da amostra; enquanto o valor FOS corresponde ao teor de ácidos graxos voláteis naquela mesma amostra.

### **2.3.2 Produção de Biogás com resíduos e subprodutos da Soja**

A composição da soja a torna atrativa para geração de biogás, pois as bactérias hidrolíticas atuam na decomposição de compostos complexos contidos na soja. Alguns pesquisadores utilizaram resíduos e subprodutos provenientes da indústria de processamento e substratos da soja para geração de biogás. Dentre eles, Wresta e Budhijanto (2012) analisaram o potencial de geração de biogás usando a água residual da coagulação proteica no leite de soja, que apresentava em sua composição 70% de proteína e carboidratos. Eles realizaram os testes de potencial de geração de biogás em batelada por 33 dias com a adição de efluente ativo para fornecer as bactérias necessárias para o processo de digestão anaeróbia, pois devido ao baixo pH não há crescimento das metanogênicas no substrato utilizado. Ao final do experimento obteve-se aproximadamente 467 mL de biometano com 400 g de substrato.

Zhu et al. (2013) realizaram um estudo de codigestão usando resíduos do processamento da soja e feno estragado. Os resíduos do processamento da soja utilizado são compostos por grãos de soja, resíduo de óleo de soja e terra de diatomáceas usada no processo de branqueamento do óleo e tem baixa razão Carbono/Nitrogênio. Eles realizaram testes em reatores anaeróbios somente com resíduo da soja e em reatores com a composição resíduos de soja/feno 75:25, cujo o rendimento foi 148% maior que o reator que continha 100% de resíduo de soja, devido à inibição causada pela amônia na digestão da proteína, ou seja, com a codigestão obteve-se melhor resultado pelo baixo teor de proteínas contido no feno e uma alta razão C/N, assim equilibrando com a baixa taxa C/N dos resíduos de processamento de soja. Portanto chegaram à conclusão que a codigestão desses dois substratos pode melhorar o desempenho da digestão anaeróbia

Citelli et al. (2017) realizaram testes de atividade metanogênia usando como biomassa o melão de soja. A escolha se justifica pela possibilidade de aproveitamento energético desse subproduto através de conversão anaeróbica, visto que o mesmo advém da produção da proteína concentrada da soja e é rico em açúcares. Os autores utilizaram também na realização dos testes, o glicerol, subproduto da produção do biodiesel. Cada teste foi feito com um tipo de inóculo. Segundo os resultados o melão produziu 2,5 vezes mais biogás que o glicerol como substrato.

Dai et al. (2015) utilizaram o substrato da soja, dentre outros substratos provenientes de resíduos de cozinha para produção de biogás e a avaliação da ação inibitória causada pela acumulação de AOVs em reatores de fluxo semicontínuos durante 31 dias, alimentados diariamente com 1,0 g MSO de substrato. Eles ajustaram o pH para 7 no início do experimento (dentro da faixa ideal) e após 7 dias o pH passou a ser 5, e quanto a produção de biogás, obtiveram a lenta produção, em torno de 100- 400 mL, com uma média de apenas 12% de biometano, o que evidencia a ação inibitória das metanogênicas causada pelos AOVs.

A utilização do glicerol, resíduo da produção do biodiesel, para conversão anaeróbia também foi alvo de pesquisas. Fountoulakis e Manios (2009) testaram a atividade metanogênica com diferentes biomassas com a adição de glicerol, onde no experimento a biomassa foi o resíduo orgânico municipal e com a adição de glicerol, apesar de a sua composição ter agentes tóxicos para as bactérias, teve um aumento da produção de biogás de 1400 mL CH<sub>4</sub>/dia para 2084 mL CH<sub>4</sub>/dia.

Yu (2015) estudou a digestão anaeróbia da água residual do processamento da proteína de soja em reatores de duas fases e obteve a remoção de demanda química de oxigênio (DQO) de 80% e produção de biogás com composição média de 55% de biometano.

A literatura registra diversos estudos utilizando alguns subprodutos do processamento da soja para geração de biogás, porém em relação ao resíduo utilizado nesse trabalho especificamente os estudos na literatura são poucos.

Diante dos estudos analisados, tem-se que a utilização de diferentes resíduos do processamento da soja aplicado à produção de biogás, além de viável do ponto de vista econômico, reinsere no ciclo de consumo um produto que seria descartado, possuindo ainda funcionalidades no campo da conversão térmica ou conversão energética.

## 2.4 UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

O Biogás pode ser utilizado como combustível de diversas formas como: queima direta em caldeiras, para aquecimento, iluminação ou em conversão para energia elétrica. No caso da conversão para energia elétrica, a energia química contida nas moléculas do biogás é convertida pelo processo de combustão em energia mecânica ativando os motores que a converte em energia elétrica (OLIVEIRA, 2009). No Quadro 2 estão algumas alternativas para aplicação do Biogás.

**Quadro 3-** Alternativas de aplicação biogás

Combustão direta, com geração de calor.	Caldeiras	Produção de vapor ou calor
	Secadores Térmicos	Secagem de produtos ou lodo
Motores	Turbinas a gás	Geração de energia elétrica
	Energia mecânica	Bombas, Ventiladores, Exaustores
	Veicular	Veículos leves e pesados
	Motor Gerador	Geração de energia elétrica
	Co- Geração com aproveitamento da energia térmica	Geração de energia elétrica e aproveitamento de calor ou vapor

Fonte: Adaptado de LOBATO (2011)

### 2.4.1 Tecnologias de conversão

As tecnologias de conversão de biogás para energia elétrica bastante utilizadas são: motores de explosão interna (Ciclo Otto), turbinas a gás ou microturbinas, e ainda motores de co-geração que aproveitam a energia térmica residual (OLIVEIRA 2009; PECORA, 2006, COSTA, 2006, LIMA E PASSAMANI, 2012). Na Tabela 2 são mostradas características de algumas tecnologias de conversão de biogás em energia elétrica.

**Tabela 2-** Características de algumas tecnologias de conversão de biogás em energia elétrica

	<b>Microturbina</b>	<b>Turbina a Gás</b>	<b>Motores Bicombustíveis</b>	<b>Motores a Gás Ciclo OTTO</b>
Potência	200 kW	500kW- 150 MW	340kW	100kW a 1MW
Rendimento	24-30%	20-30%	30 a 44%	34- 42%
Emissão de NOx	<9ppm	35ppm-50ppm	27ppm	250- 3000ppm
Tempo de vida	-	Baixo	35.000h	60000 h
% de metano	35% a 100%	-	65%	45%
Ruído	Baixo	Baixo	Alto	Alto

Fonte: Adaptado de ROHSTOFFE et. al., 2010; COSTA, 2006; PECORA, 2006.

Como pode ser observado na Tabela 2 o rendimento das tecnologias tem valores próximos e podem variar de acordo com a manutenção, qualidade do biogás, impurezas, entre outros fatores. Segundo Costa (2006) os valores de NOx devem ser levados em consideração pois a emissão desses poluentes causam a formação de ozônio troposférico e se for em um local onde a atmosfera estiver com bastante poluentes é preferível optar por uma tecnologia de turbinas a gás.

#### 2.4.2 Purificação do biogás

Alguns componentes do biogás têm menor poder calorífico que o CH<sub>4</sub>, como o CO<sub>2</sub> e a água diminuem a eficiência dos motores. O CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S representam subprodutos com propriedades corrosivas, além de outros gases traços contidos no biogás que prejudicam o sistema e emitem gases poluentes. Assim sendo, se torna necessário a utilização de algum método de purificação do biogás para sua utilização (ANGHEBEN, 2017; COSTA, 2006; BORSCHIVER E SILVA, 2014).

O biogás que tem baixo teor de H<sub>2</sub>S é favorável pois diminui custos com o tratamento para ser usado em motores, uma vez que o H<sub>2</sub>S em contato com vapor forma ácido sulfúrico e corrói motores. Portanto é um fator também a ser avaliado (ROHSTOFFE et al. 2010). Segundo CCE (2000) para resíduos industriais os valores típicos de teor de H<sub>2</sub>S no biogás é de 100 - 10.000 ppm, ou seja, 0,01 – 1 %.

Tecnologias utilizadas como absorção, adsorção, separação por criogênia e separação por membranas, alcançam eficiências maiores que 95% de pureza de metano, pois não removem apenas maior parte do CO<sub>2</sub> como também o sulfeto de hidrogênio, água, siloxanos dentre outras

impurezas do biogás (MISSIAGGIA, 2016, BARBOSA, 2018). No Quadro 3 estão listadas algumas tecnologias de purificação utilizadas para cada impureza.

**Quadro 4-** Impurezas no biogás e tecnologias de remoção

<b>Impureza</b>	<b>Técnicas de remoção</b>
Dióxido de Carbono	Adsorção; absorção física; absorção química; permeação por membranas; Adição de propano e criogenia
Água	Resfriamento; Compressão; Adsorção em sílica, carvão ativado e peneira molecular Absorção química, em soluções de glicol e sais higroscópicos
Oxigênio e Nitrogênio	Adsorção em carvão; Peneira molecular ou membranas
Amônia	Enquanto o gás é seco ou está no processo de remoção de Dióxido de Carbono
Siloxanos	Resfriamento; Absorção em mistura líquida de hidrocarbonetos; Adsorção em carvão ativado; alumínio e sílica gel; Co-separação com sulfeto de hidrogênio
Sulfeto de Hidrogênio	Precipitação / Absorção química em solução de NaOH Adsorção química em solução contendo Ferro / Adsorção em carvão ativado/ Adsorção utilizando Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Tratamento biológico; Peneiras moleculares
Particulados	Particulados Filtro mecânico

Fonte: Adaptado de BORSHIVER E SILVA (2014); NAJA et al. (2011).

A escolha da melhor tecnologia de remoção vai depender da qualidade da composição do biogás gerado (MERCADO, 2010), da aplicação e da tecnologia utilizada para conversão da energia, portanto, diversos fatores tem que ser levado em consideração. No Quadro 4 estão listados alguns limites recomendados para usos específicos.

Há ainda legislações específicas para o uso do biometano, após purificação para ser usado misturado com o gás natural, tendo que atingir segundo a resolução N°8 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), de 30 de janeiro de 2015, os valores conforme à Tabela 3.

**Quadro 5-** Necessidade de remoção de gases componentes no biogás

Uso	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Caldeira	Não	≤ 1000 ppm
Motor de combustão interna	Não	< 1000 ppm
Microturbinas	Não	Remover
Veículos	Recomendável	Remover
Rede Gás natural	Remover	Remover

Fonte: Adaptado de PERSSON et al., 2006.

**Tabela 3-** Especificação proposta para o Biometano

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE
Metano (mínimo)	% mol.	90
Oxigênio (máximo).	% mol.	0,8
CO <sub>2</sub> , (máximo)	% mol.	3,0
CO <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> , (máximo)	% mol.	10
Enxofre Total (máximo)	mg.m <sup>-3</sup>	70
Gás Sulfídrico (H <sub>2</sub> S) (máximo)	mg.m <sup>-3</sup>	10

Fonte: Adaptado da ANP, 2015.

### 2.4.3 Cálculos de conversão

Existem diversos cálculos e modelos teóricos que auxiliam ao apoio de decisão e são base para o estudo de viabilidade da utilização do biogás. Lima e Passamani (2012) avaliaram o potencial energético do biogás produzido no reator UASB de uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), a partir do cálculo do potencial térmico e elétrico do biogás produzido na ETE e chegaram à conclusão que a sua conversão em eletricidade seria inviável pela baixa vazão da produção de Biogás da ETE, sendo incapaz de suprir a necessidade energética da própria ETE.

Bilotta e Ross (2014) quantificaram através de cálculos a energia fornecida pelo biogás gerado em uma ETE, onde com produção de metano de 1.427,2 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>; energia elétrica média disponível de 65.280,3 kWh.mês<sup>-1</sup>, o que equivale a 59% da demanda média mensal de energia da própria estação, assim concluíram que a recuperação do biogás levaria a ganhos ambientais e econômicos.

Abdeshahian et. al. (2016) calcularam o potencial de biogás a partir dos resíduos orgânicos obtidos dos animais de produção e matadouros da Malásia. Os resultados indicaram que o potencial de biogás de 4589,49 milhões de m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup> disponibilizaria uma geração de eletricidade de 8,27.10<sup>9</sup> kWh ano<sup>-1</sup>.

O poder calorífico inferior (PCI) é usado nos cálculos de conversão, pois cada combustível tem um PCI diferente. No caso do biogás o PCI aumenta de acordo com a composição do metano (SOUZA, 2016). Na Tabela 4 está o PCI de alguns gases combustíveis.

**Tabela 4-** Poder Calorífico Inferior de alguns gases combustíveis

Combustíveis Gasosos	kcal/Nm <sup>3</sup>
Biogás (60% de metano)	5.500
Biometano	8.500
Propano	22.000
Butano	28.000
Gás natural	8.554
Gás de cozinha	25.775

Fonte: Adaptado de IANNICELLI (2008)

Na Tabela 5 é mostrada a equivalência energética de 1 m<sup>3</sup> de biogás com teor de metano a 60 % em relação às outras fontes de energia utilizadas.

**Tabela 5-** Equivalência energética de 1 m<sup>3</sup> biogás a alguns combustíveis gasosos

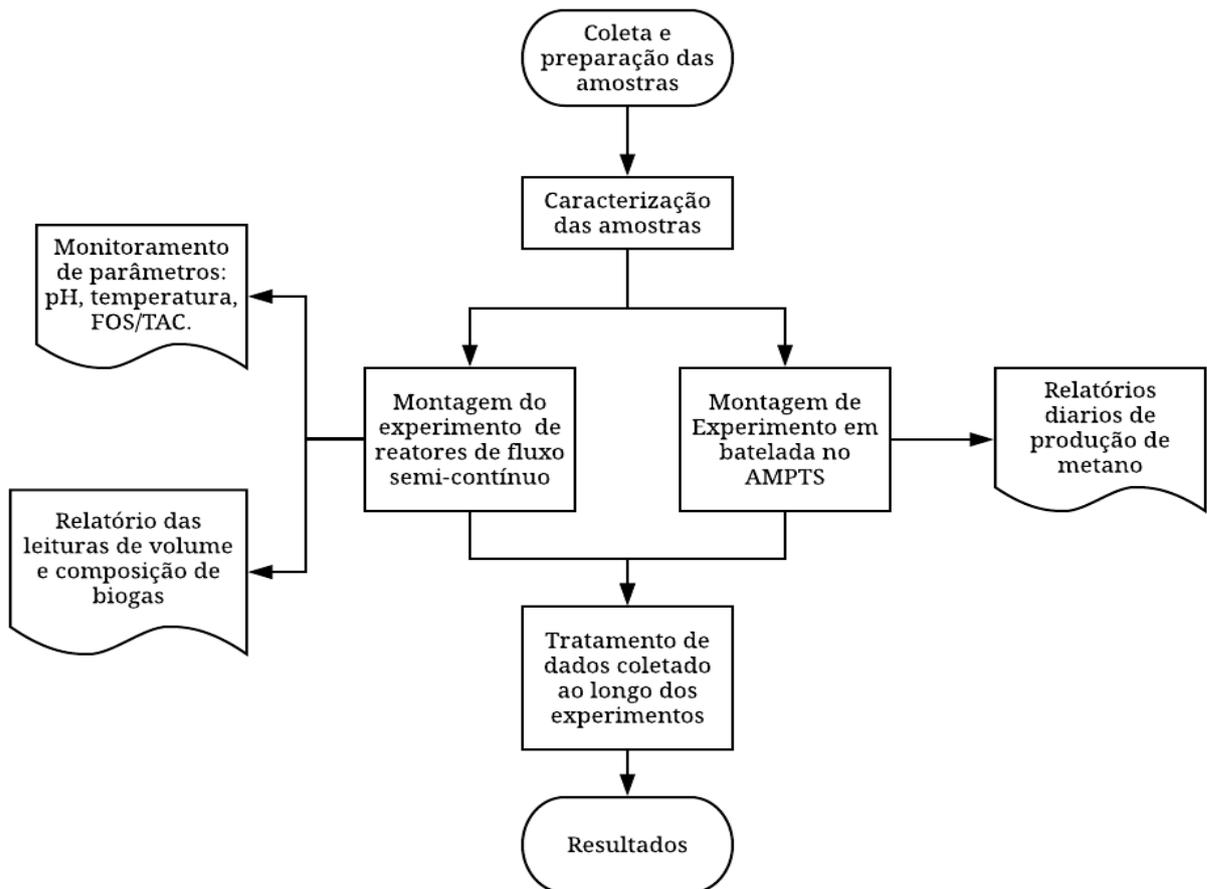
1 m <sup>3</sup> de Biogás (5500 kcal)	Equivalência
Lenha	1,6kg
Metano	0,93 m <sup>3</sup>
Propano	0,25 m <sup>3</sup>
Gasolina	0,8 L
Butano	0,2 m <sup>3</sup>
Álcool	1,3 L
Eletricidade	6,5 kWh
Carvão de Madeira	1,4 Kg
Biodiesel	0,55 L

Fonte: Adaptado de SOUZA, 2016; SILVA, 2009

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos utilizados na construção do experimento. A metodologia descrita seguiu uma ordem de ações específicas para alcance dos objetivos propostos. O fluxograma da Figura 2, lista as etapas de desenvolvimento da pesquisa.

**Figura 2-** Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa



#### 3.1 COLETA E TRATAMENTO DAS AMOSTRAS

A amostra de resíduo de soja varrição e soja decantação foram coletados em uma indústria de processamento de soja localizada no município de Anápolis- GO. O inóculo foi coletado no reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) do tratamento de efluentes da indústria *Heinz* em Nerópolis, Goiás.

O experimento de conversão anaeróbia por fermentação das duas amostras em estudo foi realizado em duas etapas: em batelada e em fluxo semicontínuo. Além disso, foram realizadas análises de caracterização como: Massa Seca Orgânica (MSO), Massa Seca Inorgânica (MSI),

teor de umidade, pH, fósforo total, teor de nitrogênio. Os experimentos e as análises de fósforo e algumas de MSO foram realizados no Laboratório de Química do IFG e as demais no Laboratório de Química da Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

As amostragens de SVA e SD foram realizadas de acordo com ABNT NBR 10007/2004, onde foi coletado em torno de 1 kg de amostra representativa de cada caçamba e acondicionadas em recipiente plástico, em seguida foram congeladas no freezer do laboratório de química do IFG. As amostras de SD foram trituradas para melhor manipulação.

### **3.2 COLETA E TRATAMENTO DO INÓCULO**

O inóculo coletado do reator UASB da indústria alimentícia Heinz foi transportado em recipiente de polietileno 24 horas antes da montagem do experimento para caracterização de MSO. O acondicionamento foi feito em temperatura ambiente do laboratório (entre 25-27 °C) por dois dias, para as bactérias consumirem o residual de material biodegradável orgânico presente no inóculo.

### **3.3 CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS, DIGESTATOS E INÓCULO**

Foram realizados diversos ensaios de caracterização dos substratos utilizados (SVA e SD), incluindo a análise do inóculo. Os testes realizados foram: Massa Seca (MS); Massa Seca Orgânica (MSO); Teor de Matéria Seca Inorgânica (MSI) e pH. Já as análises de Fósforo total e Nitrogênio Amoniacal foram feitas somente nas amostras SVA e SD, pois o inóculo passa por um período de “descanso” de 48 h para que as bactérias consumam tais nutrientes. Para determinação de Fósforo foi utilizado o método gravimétrico do Quimociac e para Nitrogênio o método de Kjeldahl (BRASIL, 2014).

Para o digestato, ou seja, material que já passou pela digestão anaeróbia, foram analisados os teores de MS, MSO, MSI e pH somente para os digestato dos reatores de fluxo semicontínuo.

#### **3.3.1 Análises para montagem do experimento em batelada no AMPTS e nos reatores de fluxo semicontínuo.**

A caracterização da MS e da MSO foi iniciada dois dias antes do teste em batelada. Foi determinado de acordo com o Manual de Operação e Manutenção AMPTS II, onde aproximadamente 2,0000 g de amostra representativa de biomassa e inóculo foram adicionados individualmente em cadinhos secos. Em seguida, colocado na estufa marca Lucadema pré-aquecida a 105 °C durante 20 h para evaporar a umidade. Em seguida, os cadinhos foram

colocados em um dessecador para esfriar para então pesar a massa do cadinho e da amostra sem umidade. A amostra foi calcinada no bico de Bunsen e colocada na mufla à 550 °C para 3 h. Após o resfriamento no dessecador, a nova massa foi pesada. O MS está expresso na Equação 1 é a relação entre a quantidade de amostra após a secagem a 105 °C e a amostra úmida ( $M_{fresca}$ ).

$$MS(\%) = \frac{M_{seca} \times 100}{M_{fresca}} \quad (1)$$

Onde:

MS (%) = Teor de massa seca da amostra (em porcentagem);

$M_{seca}$  = Massa da amostra após aquecimento a 105 °C na estufa;

$M_{fresca}$  = Massa da amostra antes do aquecimento a 105 °C na estufa.

Matéria Seca Orgânica (MSO) é relação entre a diferença da massa após a secagem em 105 °C ( $M_{seca}$ ) e após a queima a 550 °C ( $m_{inorgânica}$ ) e a quantidade inicial de amostra representa o conteúdo MSO da biomassa ( $m_{fresca}$ ), expresso na Equação 2.

$$MSO (\%) = \frac{(M_{seca} - M_{inorgânica})}{M_{fresca}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

MSO (%): Teor de massa seca orgânica da amostra (em porcentagem);

$M_{seca}$ : Massa da amostra após aquecimento a 105 °C na estufa;

$M_{inorgânica}$ : Massa da amostra após aquecimento a 550 °C na mufla;

$M_{fresca}$ : Massa da amostra antes do aquecimento a 105 °C na estufa.

Com base nos cálculos de MSO foi possível calcular a quantidade de massa de substrato de cada amostra a ser carregada em cada reator, primeiramente calculando a quantidade de inóculo a ser carregado em cada reator utilizando a Equação 3, em seguida a quantidade de substrato, utilizando Equação 4, assim totalizando 400 g, conforme Equação 5.

$$miS = \frac{800 \times VsS}{VsI + (2 \times VsS)} \quad (3)$$

$$msS = \frac{miS \times VsI}{2 \times VsS} \quad (4)$$

$$400 = miS + msS \quad (5)$$

Onde:

miS: quantidade de inóculo;

msS: quantidade de substrato;

VsI: massa seca orgânica do inóculo;

VsS: massa seca orgânica da biomassa.

### 3.3.2 Determinação do pH

O pH das amostras foi medido antes de iniciar o experimento após homogeneizadas com o inóculo e depois desmontar o experimento no AMPTS II. Já o experimento em fluxo semi-contínuo foi monitorado o pH inicial e final e também o pH nas análises de FOS/TAC. Foi usado o pHmetro previamente calibrado.

### 3.3.3 Determinação do FOS/TAC

O FOS/TAC foi analisado através da metodologia DOC316.52.93087 baseada no método de Nordmann (1977) com a titulação do ácido  $H_2SO_4$  a  $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ . Primeiramente foi coletado 45 mL de digestato de cada reator, através do tubo de saída que fica submerso no líquido do reator para evitar a entrada de oxigênio ou qualquer troca gasosa com o meio externo. Então, o digestato coletado foi colocado em tubos Falcon cônicos para serem centrifugados, por 2 minutos a 7000 rpm para separação do material mais denso. Após essa separação, foi repassado somente a parte sobrenadante para o béquer usado na titulação. Foi titulado com  $H_2SO_4$  até atingir o valor de pH 5,0, anotado o volume em mL de  $H_2SO_4$  consumido e novamente titulado  $H_2SO_4$  até atingir o pH de 4,4. O cálculo realizado está na razão entre as Equações 6 e 7.

$$FOS = [(B \times 4 \times 1,66) - 0,15] \times 50 \quad (6)$$

$$TAC = \frac{A \times C_{tit} \times 50045}{V_{amostra}} \quad (7)$$

Onde:

FOS: Ácido Orgânico Volátil;

TAC: Carbono Inorgânico Total;

A = Volume (mL) do titulante até o pH 5,0;

C<sub>tit</sub> = Concentração do titulante (0,05 mol.L<sup>-1</sup>);

V<sub>amostra</sub> = Volume da amostra;

B = Volume (mL) do titulante consumido após o pH 5 até atingir o pH 4,4.

### 3.3.4 Potencial Bioquímico de Biometano

O potencial de bioquímico de biometano (BMP) foi calculado em relação à MSO da biomassa de entrada, sendo a razão do biometano produzido pela quantidade de MSO do substrato introduzido no sistema no início do experimento, como mostra a Equação 8.

$$\mathbf{BMP = \frac{VS-VI}{mVS,sS}} \quad \mathbf{(8)}$$

Onde:

BMP= Potencial Bioquímico de Biometano;

VS= Volume acumulado de biometano do reator contendo a amostra;

V<sub>I</sub>= Volume de biometano proveniente do inóculo presente no frasco da amostra;

mVS,<sub>sS</sub>= Quantidade de material orgânico de substrato contido no frasco de amostra.

### 3.3.5 Determinação de Biodegradabilidade do Substrato

Segundo Ali, Singh e Durgapal (2016), as biodegradabilidades da matéria orgânica dos substratos podem ser calculadas usando a Equação 9.

$$\mathbf{B (\%) = \frac{(I-F)}{I} \times 100} \quad \mathbf{(9)}$$

Onde:

B= Porcentagem de biodegradabilidade;

I= MSO inicial;

F= MSO final.

### 3.4 EXPERIMENTOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Os experimentos de teste de produção de biogás das amostras de SVA e SD foram realizados em dois tipos de reatores, um em batelada e outro em fluxo semicontínuo. Para ambos foram seguidos Manual de Operação e Manutenção AMPTS II (*Automatic Methane Potential Test System*) para preparação da biomassa e inóculo.

#### 3.4.1 Experimentos das amostras Soja Varrição (SVA) e Soja do Decantador (SD) em regime de batelada

O AMPTS II (Figura 3) é um equipamento composto por 15 reatores de vidro com capacidade máxima de 500 mL cada, agitação elétrica, imersos em banho maria com controle automático de temperatura, mantendo sempre à 40 °C (unidade A). O ambiente anaeróbico dentro dos reatores foi obtido através da purga com gás nitrogênio.

**Figura 3**-Conjunto do AMPTS



O AMPTS II conta ainda com uma unidade de absorção de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, representado na Figura 3 (unidade B), onde o biogás produzido no reator passa por essa unidade que contém um conjunto de 15 garrafas, uma para cada reator correspondente. Com capacidade de 100 ml cada frasco, contém uma solução alcalina 3 mol L<sup>-1</sup>, onde várias frações de gases ácidos como de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S ficam retidas pela interação química com NaOH, permitindo a passagem somente do CH<sub>4</sub> para a unidade medição de volume de gás.

Na unidade de medição do volume de gás (unidade C da Figura 3), o biometano é medido através das células múltiplas de um dispositivo úmido de medição. Essa medição acontece acordo com o princípio de deslocamento de gás no líquido e pode monitorar fluxos de gás ultrabaixos, onde um pulso digital é gerado quando um volume definido de gás flui através do dispositivo. O Software AMPTS II usado em um navegador no computador, integrado com o equipamento faz a aquisição dos dados, exibindo e analisando os resultados.

Para montagem do experimento a biomassa foi moída, homogeneizada e testada. Para referência e material de controle foi utilizado celulose microcristalina do fabricante *Synth P.A.*, o qual é um material 100% biodegradável, isto é, é facilmente degradado quando na presença microrganismos de degradação de matéria. O inóculo foi analisado separadamente, pois é necessário no experimento para o *start up* do processo de biodigestão anaeróbia, disponibilizando microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia. Sendo assim, o mesmo deve ser descontado do experimento SVA e SD. Por isso a necessidade de realização do experimento com esse substrato de forma isolada, obtendo do SVA e SD somente a produção de biometano das biomassas.

Para unidade de absorção de CO<sub>2</sub> foram preparadas 3 mol L<sup>-1</sup> de solução de hidróxido de sódio (NaOH) com 0,4% indicador de pH da timolftaleína, água destilada e soluções padrão de pH 4,0 e 7,0. Foram adicionados 80 mL desta solução em cada umas das 15 garrafas da unidade de absorção de CO<sub>2</sub>.

### 3.4.2 Experimento em reatores semicontínuos

Os reatores semicontínuos representados na Figura 4, são constituídos por 6 reatores de vidro com capacidade 1,2 L cada. Os reatores foram preenchidos por 1 L de biomassa mais inóculo, onde a proporção de 2:1 de MSO foi utilizada, conforme o Manual de Operação do AMPTSII, que considera ainda a necessidade de que o espaço de 200 mL fique vazio, como *headspace*.

Cada reator do equipamento contém uma pá agitadora que se movimenta de 5 em 5 minutos, uma saída de gás, *bag* de armazenagem do gás, saída para retirada do digestato e alimentação,

e uma cuba termostatzada para manter uma temperatura de 40 °C, onde a cuba é isolada da luz externa.

Cada *bag* de armazenagem tem capacidade máxima de aproximadamente 2 L. Um *plug* na superfície de cada *bag* permite que estes sejam desconectados e levados à capela, para a leitura a composição e do volume do biogás. Posteriormente a essa análise, os *bags* são devolvidos aos reatores.

**Figura 4-** Reatores de Fluxo Semicontínuo



A leitura da composição do biogás gerado foi realizada com o aparelho *Biogas 5000 Gas Analyzer* da marca Geotech, como mostra a Figura 5.

A quantificação do volume de gás em cada *bag* foi feita pelo aparelho *RITTER Drum-Type Gas Meters Series TG (Wet-Test)* (Bochum, Alemanha), representado na Figura 6.

**Figura 5**–Analisador de composição dos gases



**Figura 6**– Medidor de volume de gás



### 3.5 TRATAMENTO DOS DADOS DO REATOR SEMICONTÍNUO

As medições do volume e composição do biogás nos *bags* de armazenagem dos reatores de fluxo semicontínuo foram realizadas sob condições de temperatura e pressão do laboratório. Segundo Pham et al. (2013) se torna necessário realizar a conversão do valor a *Standard Temperature e Pressure* (STP), em português “Condições Normais de Temperatura e Pressão (N)”, baseada na Lei de Charles, em que afirma que o volume de gás varia de acordo com a temperatura e pressão. Além disso, tem o fator da pressão que a umidade contida no gás exerce, portanto, o cálculo deve-se excluir o fator da umidade contida no gás.

As Condições Normais de Temperatura e Pressão (N) referem-se às condições experimentais nas quais são adotadas 273,15 Kelvin, ou seja, 0 °C e a pressão de 1013 hPa, ou seja, 1 atm. Para a conversão, como foram realizadas medições em média de 2 em 2 dias em horários variados do dia, onde a temperatura média no laboratório no horário de medições ao longo dos dias de experimento foi de 26 °C (299,15 K) e pressão a 930 hPa (0,95 atm). A Equação 10 demonstra o cálculo realizado para conversão do volume à STP ou N:

$$V_0S = \frac{V \times (P - P_U) T_0}{(P_0 \times T)} \quad (10)$$

Onde:

$V_0S$  = Volume de gás sem a umidade e em estado normal (NL);

V= Volume de gás lido (L);

P= Pressão no momento da leitura do volume do gás (hPa);

P<sub>U</sub>= Pressão do vapor da água em função da temperatura ambiente (hPa), adotado 30 hPA para a temperatura de 26°C;

T<sub>0</sub>= Temperatura Normal (=273,15 K);

P<sub>0</sub>= Pressão Normal (1013,25 hPA);

T= Temperatura do laboratório no momento da medição (K).

### 3.6 CÁLCULOS DE CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA

Os valores obtidos de produção de biogás e biometano foram submetidos à cálculos para ter uma estimativa teórica da produção de energia térmica e energia elétrica possível ser gerada na indústria levando em consideração a produção de resíduos da mesma.

#### 3.6.1 Cálculo de conversão em energia térmica

Para o cálculo de conversão do biogás em energia térmica foi utilizado a Equação 10, que considera o valor do biogás purificado, ou seja, o biometano, por isso há necessidade de saber o teor de CH<sub>4</sub> contido no biogás. Foi utilizado no cálculo o poder calorífico inferior do metano igual a 8500 kcal/m<sup>3</sup> (COSTA, 2006; LIMA E PASSAMANI, 2012; OLIVEIRA, 2009).

$$ET = (Q_{\text{biogas}} \times \%_{\text{biometano}}) \times PCI_{\text{metano}} \quad (11)$$

Onde:

ET= Energia térmica (kcal.dia<sup>-1</sup>);

% biometano= Teor de biometano na composição purificado;

PCI<sub>metano</sub>= Poder calorífico inferior do metano (kcal/m<sup>3</sup>);

Q<sub>biogás</sub>= Vazão do biogás produzido (m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup>).

### 3.6.2 Cálculo de conversão em energia elétrica

Com o valor da energia térmica calculada no item anterior se torna possível calcular o valor da potência elétrica gerada pela queima do biometano, o que vai variar de acordo com a eficiência da tecnologia de conversão, do gerador escolhido. Para calcular a potência foi usado a Equação 11 (COSTA, 2006; LIMA e PASSAMANI, 2012).

$$P_e = (E_T \times 4,1848 \times N_{tec} \times N_{gerador})/86400 \quad (11)$$

Onde:

$P_e$ = Potência elétrica (kW);

$E_T$ = Energia térmica (kcal.dia<sup>-1</sup>);

4,1848= Fator de conversão de “kcal” para “kJ”;

$N_{tec}$ = Rendimento médio da tecnologia de conversão (30%);

$N_{gerador}$ = Rendimento do gerador (85%);

86400 = Fator de conversão de dias para segundos.

Obtendo o valor da potência elétrica foi possível calcular o valor de energia elétrica a ser produzida pelo biometano usando a Equação 12.

$$E_e = (P_e \times T_{operação}) \quad (12)$$

Onde:

$E_e$ = Energia elétrica gerada pelo biometano;

$P_e$ = Potência elétrica do biometano;

$T_{operação}$ = Tempo de operação do motor (h.dia<sup>-1</sup>).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo estão discutidas as etapas realizadas e os resultados obtidos ao longo da pesquisa realizada.

### 4.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

O resíduo SVA é proveniente das perdas de produção que não conseguem ser evitadas, pois os grãos caem dos caminhões de carregamento no pátio, esteiras, etapas componentes de preparação do grão de soja. Esses grãos são varridos do pátio e reservados em uma caçamba (Figura 7) para então serem destinados ao aterro sanitário local. O resíduo SD é proveniente da separação de sólidos na etapa de decantação no processo do tratamento de água pluvial, esse material sólido, composto por grãos de soja e impurezas encontradas no pátio como grãos de areia e folhas de árvores que se sedimentam no fundo e são coletados e armazenados também em uma caçamba representada na Figura 8. Ambas as amostras foram coletadas diretamente das caçambas de armazenagem.

**Figura 7-** Caçamba de armazenagem onde foi coletada a amostra de Soja Varrição



**Figura 8-** Caçamba de armazenagem onde foi coletada a amostra de Soja Decantação



#### 4.1.1 Teor de sólidos totais (MS) e Massa Seca Orgânica (MSO)

As caracterizações das amostras de biomassa foram realizadas em triplicata. O resultado da caracterização de MSO e teor de umidade da amostra SVA estão apresentados na Tabela 6 e

para biomassa SD na Tabela 7. Esses valores foram usados para os cálculos de referência para o AMPTS II.

**Tabela 6-** Valores obtidos durante a caracterização da MSO das amostras de SVA

Massa amostra (g) Fresca	Massa da amostra (g) após aquecimento a 105 °C por ±22h (MS)	Massa da amostra (g) após calcinação a 550 °C por 3 h (MSI)	Massa Seca Orgânica (g)	Teor de umidade (%)
2,8398	59,10	14,81	44,29	40,89
3,0101	67,99	15,67	52,32	32,00
3,0765	62,92	22,52	40,39	37,07

**Tabela 7 -** Valores obtidos durante a caracterização da MSO das amostras de SD

Massa amostra (g) Fresca	Massa da amostra (%) após aquecimento a 105 °C por ±22h (MS)	Massa da amostra (%) após calcinação a 550 °C por 3 h (MSI)	Massa Seca Orgânica (g)	Teor de umidade (%)
2,9366	26,07	9,88	16,18	73,92
2,8411	25,16	8,83	16,33	74,83
2,7283	25,72	8,30	17,42	74,27

Foram feitas médias das triplicatas das duas amostras e a partir desses valores foram definidas a porcentagem de MS, MSO de cada amostra, para o inóculo foi realizado o mesmo método, porém como as biomassas foram testadas no AMPTS II em momentos diferentes, foram usadas amostras de dois inóculos diferentes, mas com a mesma origem. Os resultados estão representados na Tabela 8. Com esse valor foi definido a quantidade de amostra e de inóculo a ser colocado em cada reator.

**Tabela 8 -** Caracterização de sólidos totais e massa seca orgânica para experimento no AMPTS II

Amostra	MS(%)	Erro Padrão MS(%)	MSO(%)	Erro Padrão MSO (%)
SVA	63,42	2,10	45,66	2,86
Inóculo 1	4,08	0,13	2,24	0,12
SD	25,66	0,21	16,63	0,31
Inóculo 2	5,25	0,14	4,25	0,12

Já para cálculo de referência dos reatores de fluxo semicontínuo foram usados os cálculos da MSO na Tabela 9.

**Tabela 9 -** Caracterização de sólidos totais para experimento no Reator de fluxo semicontínuo

Amostra	MS(%)	Erro Padrão MS(%)	MSO(%)	Erro Padrão MSO (%)
SVA	63,42	2,10	45,66	2,86
SD	25,66	0,21	16,63	0,31
Inóculo	5,25	0,14	4,25	0,12

Quanto ao inóculo utilizado, os valores se MS e MSO foram 5,25% e 4,25%, resultados próximos aos encontrados por Zhu et al. (2013), onde encontraram de 3,80% para o inóculo utilizado e o teor de MSO de 35,90 % para resíduos de processamento da soja analisado, composto por grãos de soja, resíduo de óleo de soja e terra de diatomáceas usada no processo de branqueamento do óleo.

A razão de MSO do inóculo por MSO do substrato de 2:1 foi adotada e o valor de alimentação de cada reator foi estabelecida em função da MSO realizada, conforme as Equações 3, 4 e 5. Na Tabela 10 são mostrados a quantidade de cada biomassa que foi utilizada no experimento em batelada no AMPTS.

**Tabela 10** - Valores de referências para alimentação dos reatores no início do experimento em batelada

	<b>Amostra (msS*)<sub>(g)</sub></b>	<b>Inóculo (miS*)<sub>(g)</sub></b>	<b>MSO(%) em cada reator</b>	<b>MS(%) em cada reator</b>
SVA	12,65	385,19	3,24%	5,43
SD	28,97	371,03	5,91%	9,44

Legenda: \* miS: Massa fresca do inóculo; msS; Massa fresca do substrato.

Na Tabela 10, tem-se os valores de MSO e MS nos biodigestores de SVA. Na literatura não tem uma regra para digestão seca ou úmida, mas convencionou-se que a digestão úmida não ultrapasse MS de 15% pela questão do bombeamento nas usinas. (ROHSTOFFE et al. 2010).

## **4.2 BIOGÁS PRODUZIDO PELAS AMOSTRAS DE SVA E SD NOS REATORES EM BATELADA E EM FLUXO SEMICONTÍNUO**

### **4.2.1 Potencial bioquímico de Biogás no AMPTS II**

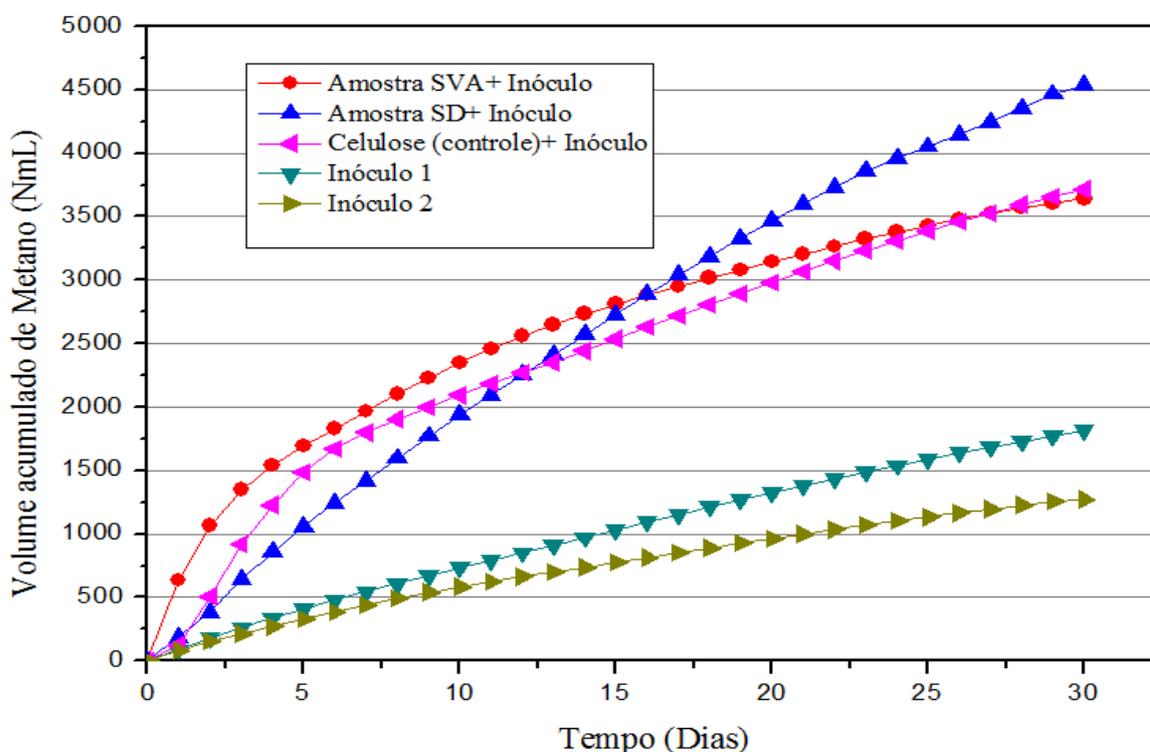
O teste de potencial bioquímico de biometano foi realizado por 30 dias em cada uma das amostras-substrato de SVA e SD e inóculo. O experimento usando amostras de SD e SVA não foram realizadas no mesmo período, portanto foram usadas amostras diferentes de inóculo, mas com a mesma origem. Na Figura 9 está representado graficamente os valores obtidos do volume acumulado de biometano ao longo dos 30 dias para ambas amostras, pode-se notar que as duas amostras de inóculo apresentaram a mesma curva.

Como apresentado na Tabela 8, tem-se as amostras do inóculo referenciadas como 1 e 2. Essa diferenciação foi dada pelas datas em que esses materiais foram coletados no reator UASB, já que a amostra referenciada como “inóculo 1” foi coletada e analisada no dia 28 de dezembro de 2017, enquanto a amostra referenciada como “inóculo 2” foi coletada e analisada no dia 01 de fevereiro de 2017 e os experimentos com esses inóculos montados dois dias após cada coleta.

Analisando o gráfico da Figura 9, tem-se que o volume acumulado de biometano ao longo dos 30 dias de experimento foi bem próximo nos dois inóculos analisados (1 e 2), tendo os dois uma produção baixa, ainda que estes tenham sido coletados em dias diferentes, demonstra que o inóculo não teve muita alteração em sua característica de composição, fator esse que revela a qualidade do inóculo utilizado. Com relação aos valores de biometano obtidos do experimento pelas amostras substratos SVA e SD, os resultados obtidos expressos na Figura 9, após subtrair o valor de produção do inóculo, pôde-se observar que estes foram bem superiores aos valores produzidos pelos inóculos sozinhos. Segundo Silva e Graff (2015), isso é pertinente, pois indica pouca interferência do inóculo no volume de gás produzido, sendo o substrato utilizado responsável pela maior produção de biometano.

Ao fim dos 30 dias a produção de biometano para as amostras substratos SVA+ Inóculo e SD +Inóculo foram de 3644,36 NmL e 4535,53 NmL, respectivamente. Já para Silva e Graff (2015), que fizeram testes de produção de biogás usando inóculo e resíduos de leite como substrato em reatores de 600 ml por 30 dias, a taxa de produção de biometano foi de 3335,58 NmL.

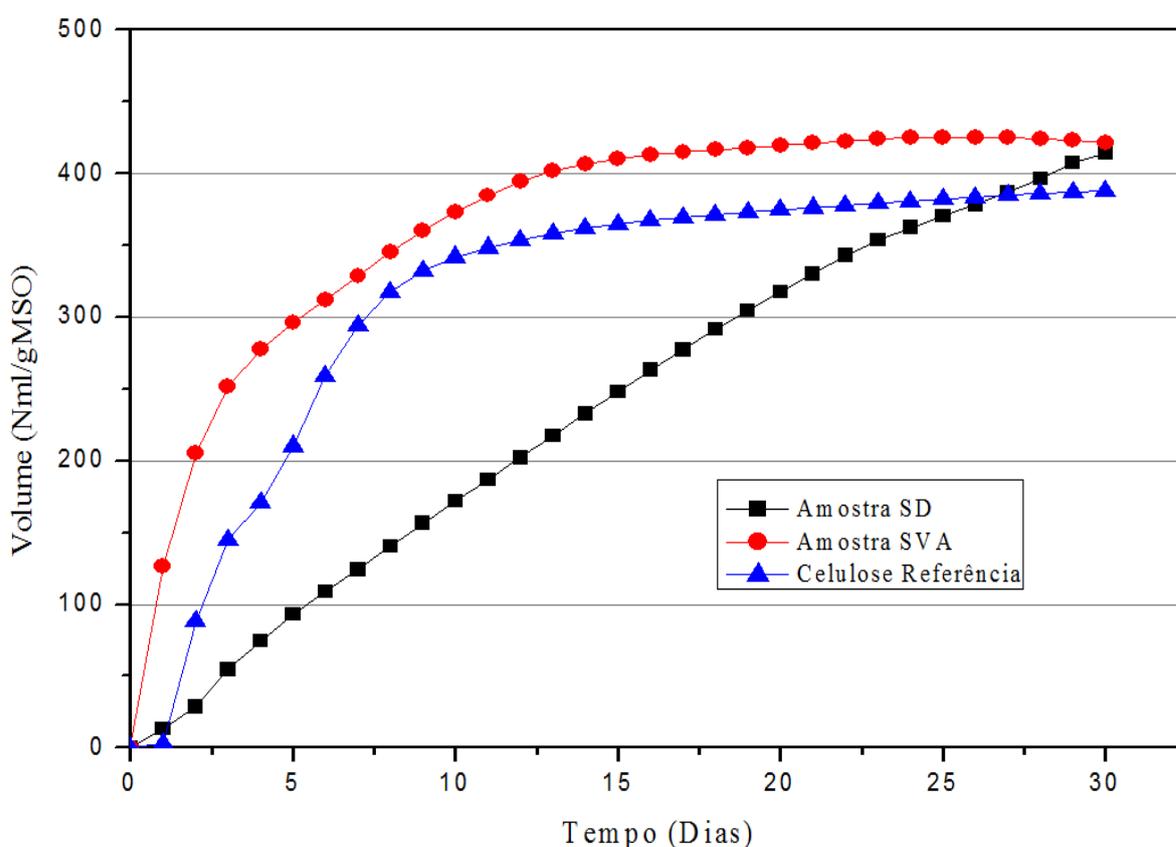
**Figura 9-**Volume acumulado de Biometano ao longo dos 30 dias de experimento



O gráfico da Figura 10 mostra o resultado do cálculo de Potencial Bioquímico de Biometano das amostras SD e SVA ao longo dos 30 dias no experimento em batelada. É possível analisar

o comportamento das três amostras testadas, SD, SVA e celulose referencial, que é utilizada como parâmetro ideal à título de comparação com as amostras teste na produção de biometano. Durante praticamente todo o período do experimento a produção de biometano das amostras SVA foi superior à produção de biometano pela celulose referencial, já a SD no fim do experimento estava superior à celulose e equivalente à SVA, o que indica potencial aplicabilidade dos resíduos testados na produção de biometano, substância de maior representatividade na produção do biogás. O maior índice de potencial de BMP foi de 443,30 NmL.g<sup>-1</sup>MSO para SVA e 414,20 NmL.g<sup>-1</sup>MSO para SD, enquanto Guerri et al. (2017) usando resíduos alimentares como substrato para gerar metano, obteve a produção específica do Potencial Bioquímico de Biometano de 311 NmL.g<sup>-1</sup>MSO. Já Steinmetz et al. (2014) encontraram o potencial específico bioquímico de metano para resíduos de incubatório de ovos de 544 NmL.g<sup>-1</sup>MSO e chegou à conclusão ser um resíduo atrativo para ser usado como biomassa para gerar biogás.

**Figura 10**-Cálculo de Potencial Bioquímico de Biometano (BMP) das amostras SD e SVA no experimento em batelada



#### 4.2.2 Potencial bioquímico de Biogás no Reator de Fluxo Semi-contínuo

O experimento no reator de fluxo semicontínuo foi iniciado no dia 03/02/2017, seguindo o mesmo protocolo para cálculo de alimentação do AMPTS, conforme mostrado na Tabela 11.

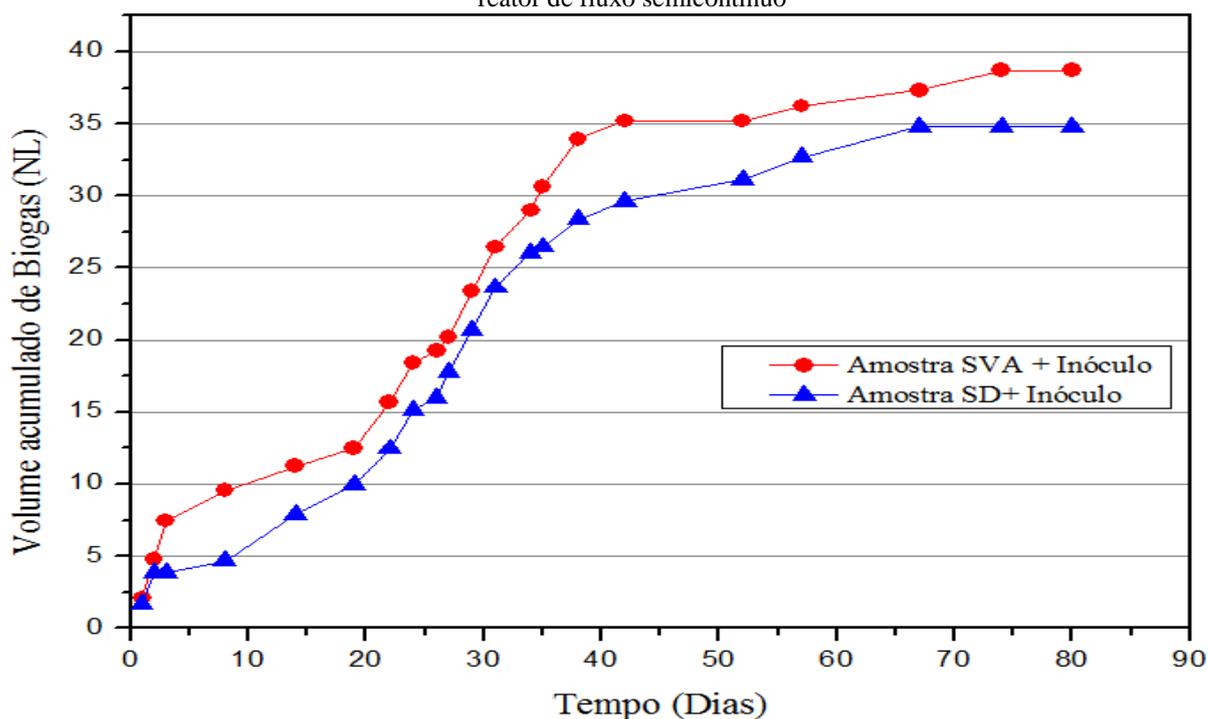
**Tabela 11** - Quantidade de massa fresca de cada substrato e inóculo adicionados nos reatores de fluxo semi-contínuo

	Amostra (msS*)(g)	Inóculo (miS*)(g)	Água destilada(g)	MSO(%) em cada reator	MS(%) em cada reator
SVA	41,27	886,69	72,04	5,65	7,24
SD	113,21	886,69	0,0	5,65	7,56

Legenda: \* miS : Massa fresca do inóculo; msS; Massa fresca do substrato.

O gráfico da Figura 11 mostra a produção acumulada de biogás ao longo dos 80 dias de experimento com substratos SVA e SD no reator de fluxo semicontínuo, lembrando que o experimento iniciou com 6 reatores, 2 amostras em triplicatas e logo no início dois reatores tiveram problema com vazamento de biogás, então só foi medido a produção de biogás de 2 duplicatas. Observa-se que no 31º dia que a produção biogás foi de 26,47 NL de SVA e 23,66 NL de SD com a composição de metano de 57 % e 67 %, respectivamente. Salvadori et al. (2012) usaram lodo de uma estação de tratamento de esgoto de uma indústria de soja e inóculo em reatores anaeróbios de 600 mL e gerou em 30 dias 18,28 L de biogás, onde 57% corresponderam a metano.

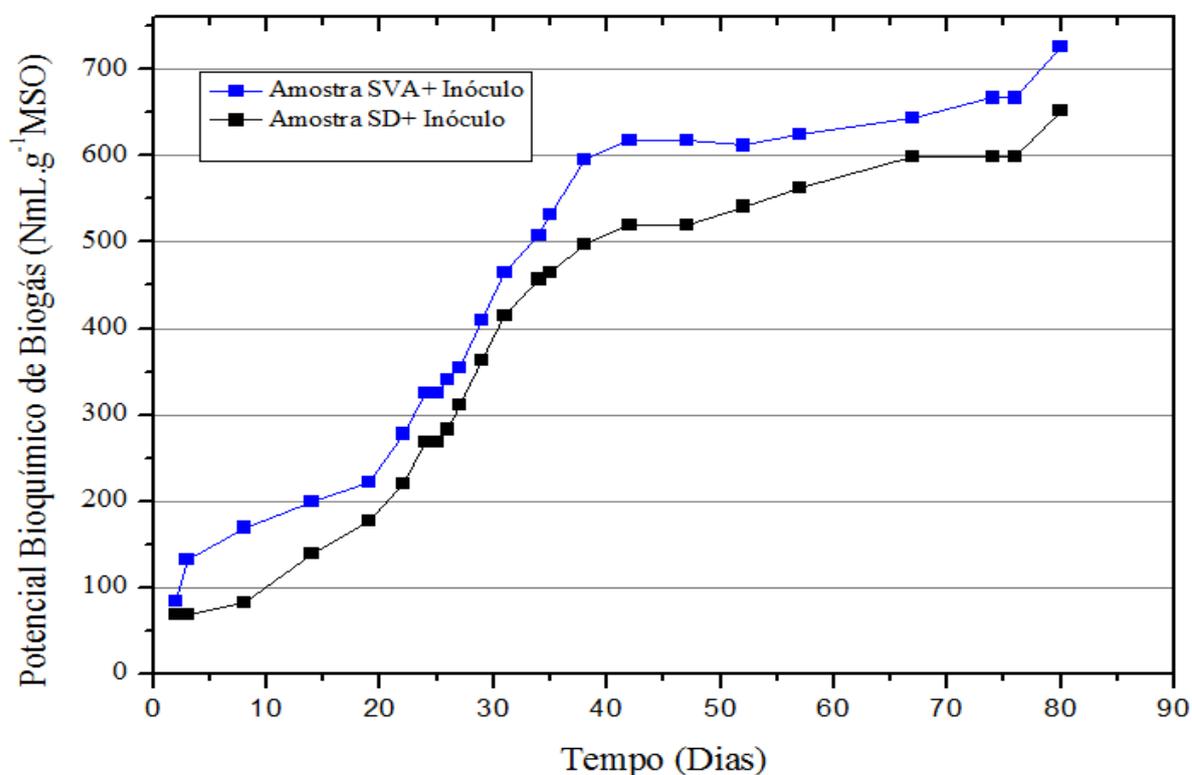
**Figura 11-** Produção acumulada de Biogás ao longo do experimento com as amostras substratos SVA e SD no reator de fluxo semicontínuo



Ainda no gráfico da Figura 11 é possível observar a crescente produção de biogás das duas amostras analisadas. A produção maior foi da amostra SVA, representada no gráfico pela linha vermelha. Na geração total, tem-se um acumulado de biogás 38,71 NL pela amostra SVA e 34,78 pela amostra SD. Segundo Unido (2011) a curva do gráfico em formato de “escada” evidencia alguma pequena inibição no processo, chamado de diáuxia. O crescimento diáuxico é uma adaptação do microrganismo em um meio com dupla disponibilidade de nutrientes, onde o microrganismo consome um tipo de nutriente para depois consumir o outro menos preferível. (CHU e BARNES, 2016).

No gráfico da Figura 12 é mostrado o volume acumulado de biogás em  $\text{NmL.g}^{-1}\text{MSO}$  em função dos dias do experimento dos reatores que continham as amostras substratos SVA+inóculo e SD+inóculo. Os reatores foram alimentados nos 25º, 47º e 57º dias respectivamente. Os valores de alimentações foram determinados com base na MSO de cada substrato, sendo o valor de alimentação de  $0,5 \text{ MSO.L}^{-1}$ , portanto o valor para SVA foi 1 g e para SD foi 3 g.

**Figura 12-** Potencial bioquímico de Biogás dos substratos SVA, SD e Inóculo nos reatores de fluxo semicontínuo

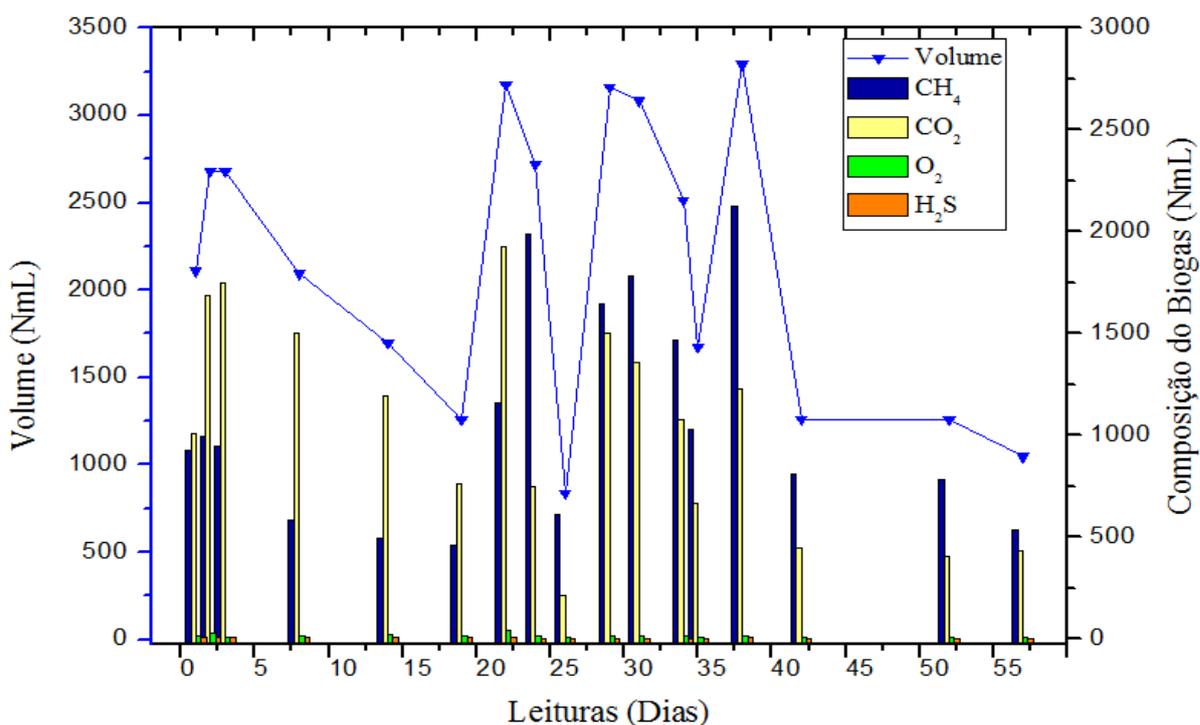


Nas Figuras 13 à Figura 18 estão os gráficos de composição do biogás do primeiro dia até o 57º dia de experimento, período em que foi avaliada a composição do biogás com o aparelho

Biogas 5000, que nos dá o valor em porcentagem. Os gráficos com composição em mL foram obtidos multiplicando o volume em mL pela composição em porcentagem.

A Figura 13 mostra o gráfico da composição e volume dos dias que houveram medições em NmL de produção de biogás dos reatores com a amostra de SVA. As medições ocorreram nos dias que os *bags* se encontravam com um volume considerável. Para obtenção dos dados de composição em NmL foi multiplicado o valor da composição em porcentagem obtido pelo aparelho Biogas 5000, pelo valor de volume em NmL. Em relação à composição em NmL, no início teve uma maior produção de CO<sub>2</sub> em relação ao gás CH<sub>4</sub>, mas a partir do 23º dia esse quadro se inverteu passando a produção do gás CH<sub>4</sub> a ser superior que o CO<sub>2</sub> e os demais gases traços abaixo de 1%. Em relação ao volume produzido, foram registrados vários índices acima de 3 L sendo o maior índice registrado foi no 38º dia com 3,29 NL.

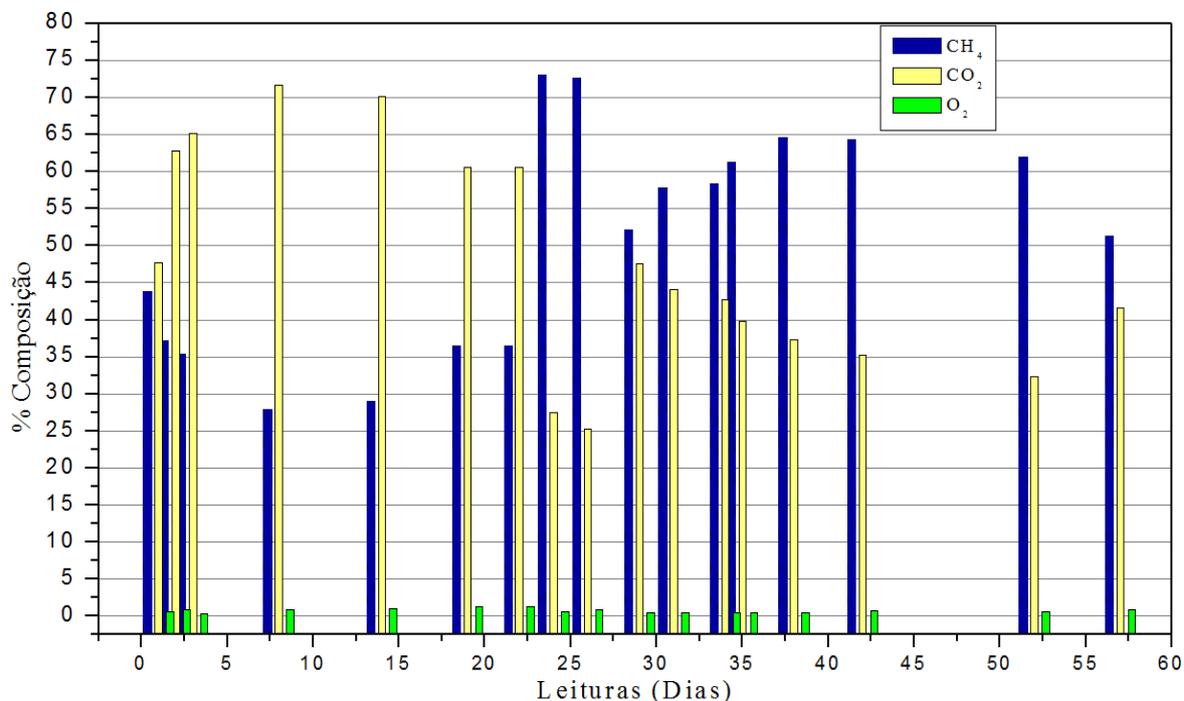
**Figura 13-** Composição e volume em NmL da geração diária do biogás nos reatores de fluxo semicontínuo de SVA



Como mostra o gráfico da Figura 14, que analisa a composição do biogás gerado por SVA agora em porcentagem, tem-se na amostra o volume de biometano, dióxido de carbono e oxigênio, onde o biogás analisado teve em sua composição elevados índices de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Houve mudanças significativas nos índices a partir do 24º, em que os teores de CH<sub>4</sub> estavam baixo e passaram a aumentar chegando a ser registrado o valor de 73 % e até o fim das medições no experimento se manteve superior à 50 %. A média ao longo do experimento foi de 56,1%.

Gueri et al. (2017) em seu experimento de fluxo semicontínuo usando resíduos alimentares como substrato para gerar biogás, obteve a produção de 58,86 % de gás metano.

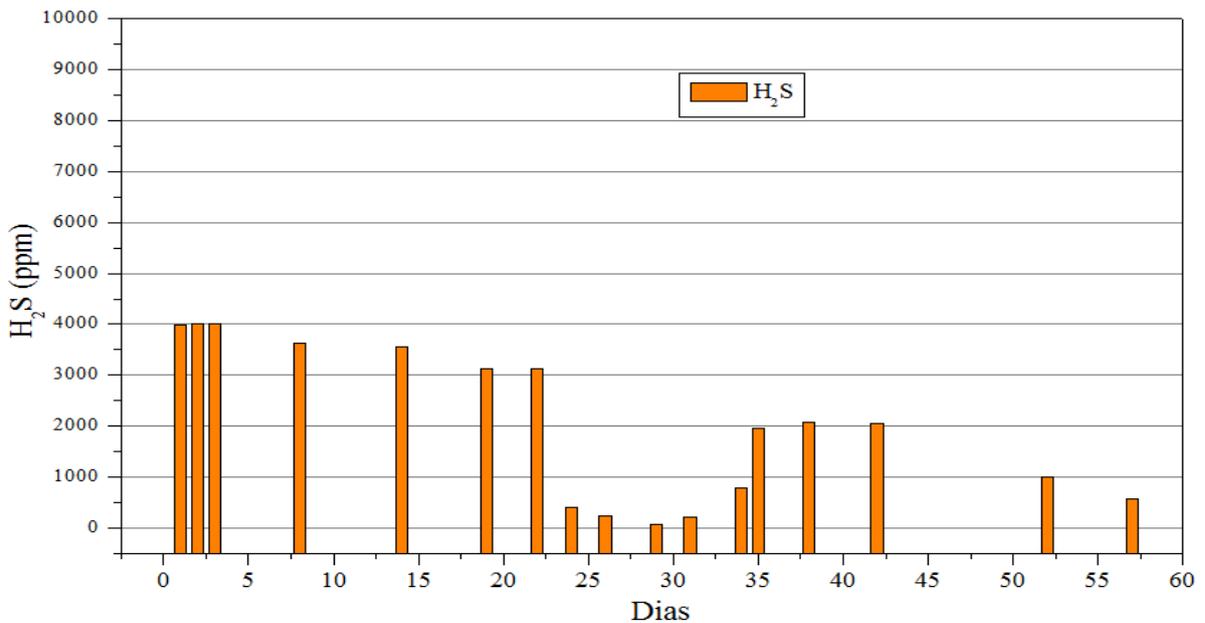
**Figura 14-** Composição em porcentagem da produção de biogás dos reatores contendo SVA



O gráfico da Figura 15 mostra a concentração de sulfeto de hidrogênio na amostra SVA, onde o valor máximo encontrado foi de 4000 ppm e o mínimo 70,5 ppm. Entre os dias 25 – 34, os valores tiveram redução significativa. Em seguida, a partir da leitura do 30º dia, a composição de H<sub>2</sub>S na amostra de SVA teve aumento expressivo, comportamento que foi mantido nas próximas três leituras, cuja justificativa é a alimentação nos reatores que ocorreu no 28º dia de experimento. Segundo Rohstoffe et al. (2010), a concentração elevada do H<sub>2</sub>S se deve a formações a partir da decomposição de compostos orgânicos e inorgânicos que contém enxofre e proteína. Nas amostras de SVA se justifica também pela queda do pH no início do experimento. A queda do pH se dá pela produção de ácidos como ácido acético e H<sub>2</sub> que também são usadas pelas bactérias redutoras de sulfato, produzindo assim o Sulfeto de hidrogênio (GERARDI, 2003). Além disso em valores de pH mais baixos prevalece H<sub>2</sub>S em sua forma molecular, já em pH mais elevado a produção de H<sub>2</sub>S é inibida se mantendo as formas ionizadas de sulfeto (SCHIRMER et al., 2015). Não obstante, a concentração de H<sub>2</sub>S de biogás proveniente de digestão anaeróbia varia na faixa de 100- 10.000 ppm, dependendo da composição da matéria orgânica, mas geralmente da concentração de proteínas (AWE et al., 2017). A concentração de H<sub>2</sub>S no biogás produzido por SVA foi dentro da faixa alta

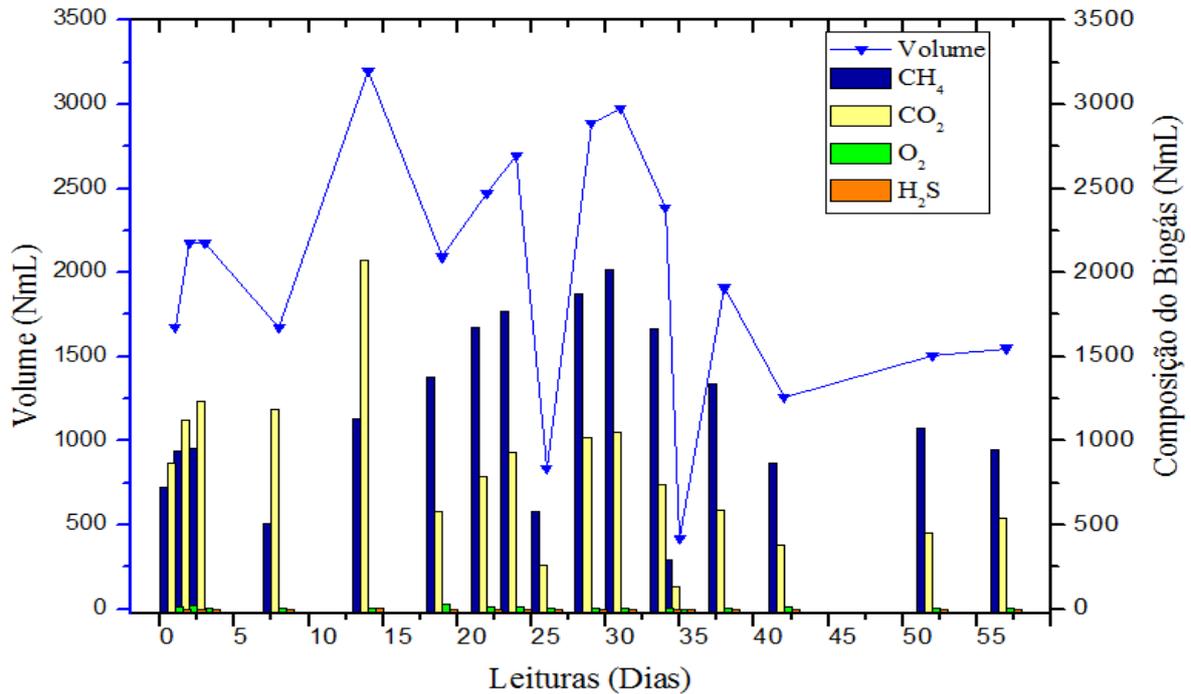
considerando algumas aplicações, logo necessita de dessulfurização, para queima direta em caldeiras e uso em motores de combustão interna, por exemplo, é recomendável que estejam abaixo de 1000 ppm (PERSSON et. al., 2006). Já as microturbinas são mais tolerantes ao H<sub>2</sub>S podendo chegar até 70.000 ppm (ARIAS, 2010).

**Figura 15-** Concentração de H<sub>2</sub>S no biogás gerado pelas amostras de SVA



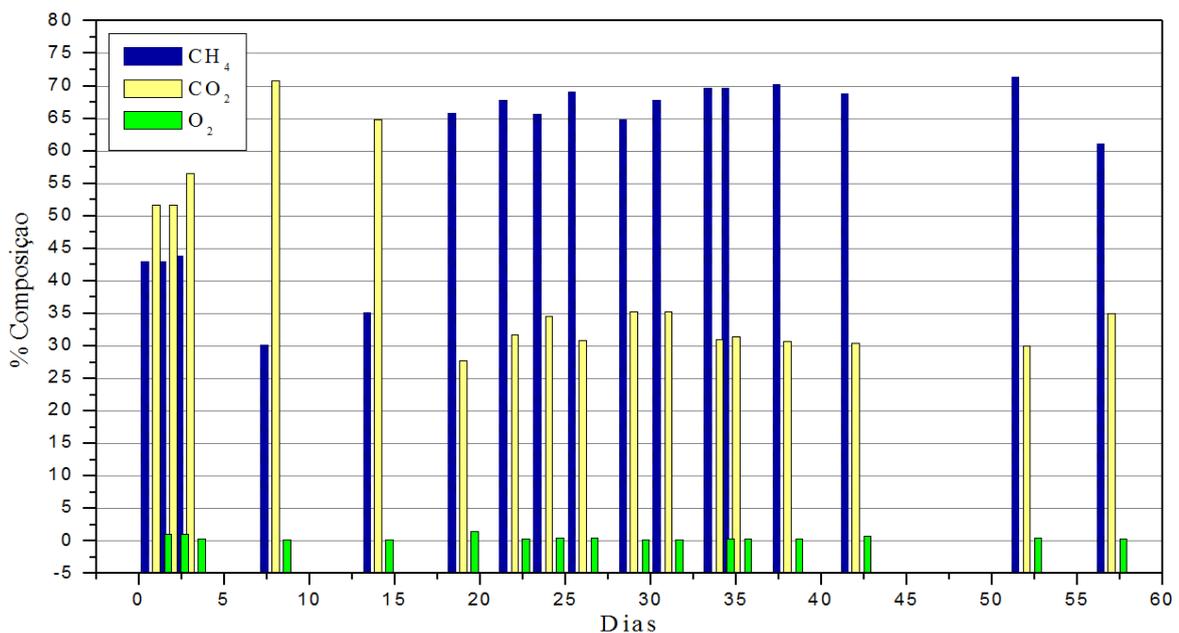
O gráfico da Figura 16 mostra a composição e o volume diário de produção de biogás em NmL dos reatores com a amostra de SD, no qual os pontos ligados por linha mostram o volume em NmL do biogás produzido pelas amostras substratos SD em função dos em que foram realizadas as leituras, assim o volume apresentou variações chegando em um máximo de 3200 NmL no 14º, ou seja 3,2 NL. Nesse mesmo dia a maior parte da composição foi de CO<sub>2</sub>. Segundo Liu et al. (2008), a maioria das substâncias orgânicas, por exemplo, carboidratos e ácidos graxos de cadeia longa e álcoois, não são substratos para a metanogênese. Primeiramente esses compostos são processados pelas bactérias hidrolíticas, fermentativas acidogênicas e bactérias acetogênicas formando CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S e baixo CH<sub>4</sub> no início. Logo que as atividades das metanogênicas aumentam, aumenta também o volume de metano, diminuindo esses outros compostos, pois são usados como precursores para o metano.

**Figura 16-** Composição e volume diário em NmL dos reatores de fluxo semicontínuo contendo amostras de SD



O gráfico da Figura 17 mostra a composição em porcentagem do biogás gerado pelos reatores que continham SD, onde o biogás analisado teve em sua composição elevados índices de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, e na maioria das leituras. A partir do 18º dia de leitura o CH<sub>4</sub> teve valores superiores se mantendo acima de 65% e o CO<sub>2</sub> diminuiu passando a ficar abaixo dos 35%.

**Figura 17-** Composição e volume diários da produção de biogás dos reatores contendo SD

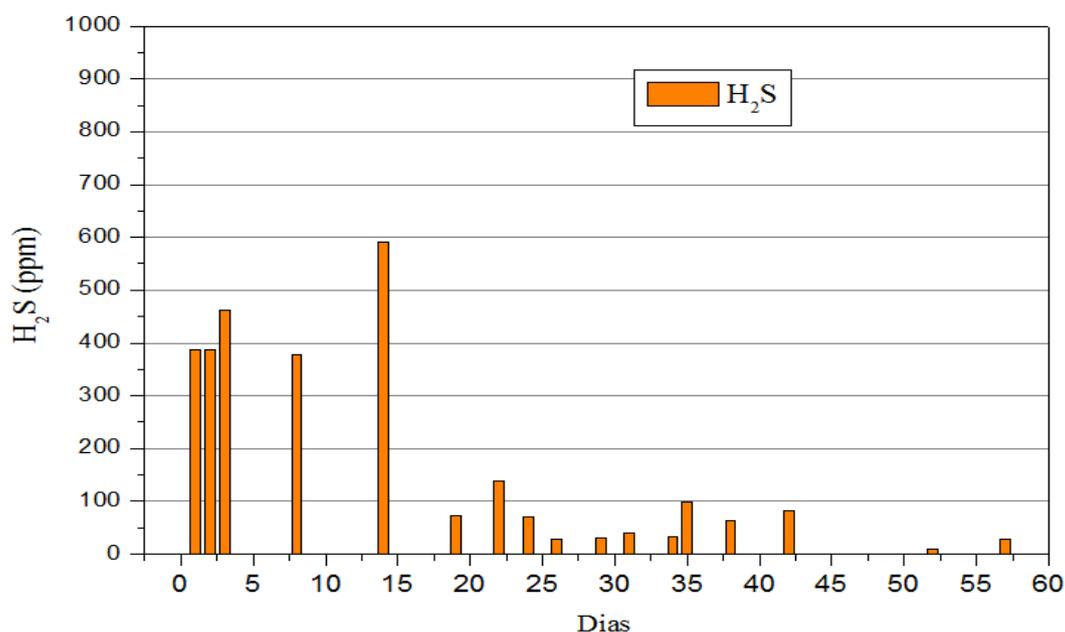


Em relação ao processo de bioestabilização tem-se teoricamente que a estabilização da biodigestão dos resíduos ocorreu após a taxa da relação  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  atingir uma média de valor 1,5 (LEITE et al., 2009). No reator com amostras de SVA, houve bastante variação estabilizando por volta do 24º dia com a taxa  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  de 2,65. Já os reatores contendo amostra de SD, iniciou com a taxa de 0,8 e a partir do 19º dia de experimento ficou com essa taxa acima de 2,00, mais estável que o SVA. Leite et al. (2009) encontraram resultados em que a biomassa utilizada proveniente de restos de feiras livres atingiu o valor de 1,5 nessa relação  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  após somente 150 dias de experimento.

O gráfico da Figura 18 mostra a composição em ppm de sulfeto de hidrogênio na amostra SD. É possível perceber o decaimento do sulfeto de hidrogênio no biogás analisado, a partir do 14º dia, o valor máximo encontrado ao longo do experimento foi 462 ppm e o mínimo 9 ppm, o que é propício para diversas aplicações, inclusive pode ser dispensado tratamento do biogás com dessulfurização.

Em relação aos resultados das amostras de SVA, o que justifica as amostras de SD terem produzidos menores frações de  $\text{H}_2\text{S}$  é que a SD tem maior teor de inorgânicos, justificado por sua composição ter menos grãos de soja e mais impurezas carregadas pela chuva. Outra explicação é que durante o processo de decantação a SD e o tempo de armazenagem na caçamba já inicia processo de decomposição, sendo oxidado parte da matéria orgânica, inclusive pela ação microbiológica de bactérias redutoras de sulfato.

**Figura 18-** Composição do biogás em porcentagem e  $\text{H}_2\text{S}$  em Partes por Milhão dos reatores de SD



### 4.2.3 Redução de matéria orgânica após digestão anaeróbia

Na Tabela 12 pode-se verificar a redução de MSO nas amostras após o experimento em reatores semicontínuos. O cálculo foi feito somando os valores de MSO inicial dos substratos com o inóculo, uma vez que a MSO final das amostras foi determinada com o inóculo, assim foi possível obter os valores de redução de MSO, como porcentagem da amostra Biodegradada (B%).

A redução da matéria orgânica de SVA foi 94,83 % e a da SD foi de 83,95 %, essa diferença foi atribuída ao fato da SD já estar em processo de degradação no momento da amostragem, o que comprova isso também é teor de MSO da SVA que era de 29,03 %, superior ao da SD no ensaio de caracterização anterior ao experimento de digestão anaeróbia. Este ensaio de caracterização também serviu para obter a porcentagem da Massa Seca Inorgânica (MSI) em relação aos Sólidos Totais (ST) contidos nas duas amostras, que foi 35,19 % para SD e 23,95 % para SVA, ou seja, a SD tinha maior teor de inorgânicos e menor teor de matéria orgânica em relação a SVA no ensaio de caracterização inicial das amostras. Ali, Singh e Durgapal (2016) obtiveram a redução de 13,87% de MSO após digestão anaeróbia de esterco de vaca por 35 dias. Barbosa (2017) submeteu vinhaça e melaço de cana-de-açúcar à digestão anaeróbia e obteve a remoção de MSO de 75 % e 84 %.

**Tabela 12-** Redução de matéria orgânica ou porcentagem da amostra biodegradada B(%) das amostras no experimento de reatores semicontínuo

Amostra	MSO <sub>Inicial</sub> (%)	MSO <sub>Final</sub> (%)	B(%)
SVA + inóculo	49,91	2,58	94
SD + inóculo	20,88	3,35	83

### 4.2.4 Resultado de Nitrogênio Amoniacal

Os resultados das análises de Nitrogênio Amoniacal estão expressos na Tabela 13

**Tabela 13:** resultados das análises de nitrogênio amoniacal nas amostras de SVA e SD

Amostra	Concentração de N-NH <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )
SVA	5,46
SD	1,61

Souza (1984) afirma que com Nitrogênio Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) acima de 0,15 g.L<sup>-1</sup> há inibição da digestão. Ortner et al. (2015) diz que a quantidade de NH<sub>3</sub> dissolvida depende diretamente da temperatura e pH, encontraram na pesquisa realizada a redução da produção de biometano somente com a concentração de 7,7 g kg<sup>-1</sup> a 9,1 g kg<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>.

Os resultados na Tabela 13 mostram altas concentrações de N-NH<sub>3</sub>, principalmente nas amostras SVA, isso se deve ao alto teor de proteína contido na soja, principal fonte para N-NH<sub>3</sub> tendo o resíduo de SVA em sua maior composição o grão da soja, enquanto o SD além da soja contém também outros resíduos orgânicos e inorgânicos carreados do pátio. Além disso, pelo fato de os resíduos SD já estarem em processo de decomposição no momento da amostragem, pode-se afirmar que já houve um consumo do nitrogênio pelas bactérias hidrolíticas. Mesmo com a alta concentração de nitrogênio amoniacal do SVA não houve comprometimento da digestão anaeróbia. Já o digestato, material remanescente no reator após a digestão anaeróbia, pode apresentar características para ser usado como fertilizante, pois pode fornecer nutrientes como nitrogênio e fósforo para o solo (CANTARELLA e MARCELINO, 2008). Segundo Seadi et al. (2008), a concentração da amônia é proporcional à temperatura e pH, sendo maior em meio termofílico e pH elevado.

#### 4.2.5 Resultados das análises de fósforo

Na Tabela 14 estão expressos os resultados de fósforo das análises realizadas com as amostras SVA e SD. Barcelos (2009) cita que além no N, o Fosforo (P) também é primordial na metanogênese.

**Tabela 14-** Concentrações de Fósforo Total ns amostras SVA e SD

Amostra	Concentração de Fósforo (mg.g <sup>-1</sup> )
SVA	1,76
SD	0,74

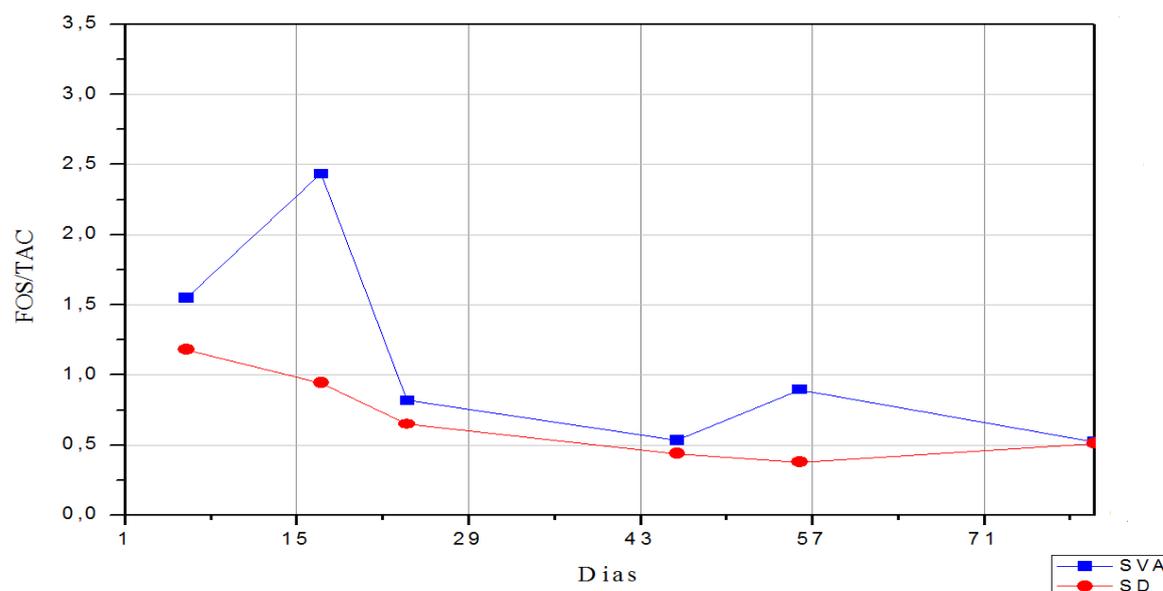
Os teores encontrados para SVA foram superiores o de SD, que se justifica pelo fato de a SD estar em processo de decomposição no momento da amostragem e ter menos grãos de soja em sua composição que o SVA. Vargas (2014) encontrou teores de fósforo em médias das análises dos grãos de soja de 3,74 mg.g<sup>-1</sup>, um pouco mais que o dobro que os resultados SVA.

Vale ressaltar que disposição de nutrientes como fósforo e nitrogênio em cursos hídricos causa eutrofização, já a recuperação desses nutrientes ao serem usados como fertilizante pode trazer benefícios para agricultura (CARMONA, 2017).

#### 4.2.6 Resultados FOS/TAC

Os resultados das análises de FOS/TAC serviram de parâmetro de monitoramento do processo de digestão anaeróbia dos reatores de fluxo semicontínuo. Na Figura 19 está representado graficamente os resultados das análises e na Tabela 15 o detalhamento do resultado coletado.

**Figura 19-** Monitoramento do FOS/TAC durante o processo de digestão anaeróbia



Na Figura 19 podemos verificar através da linha azul que os reatores de SVA tiveram um pico de FOS/TAC no 18º dia de experimento, demonstrando o acúmulo de ácidos orgânicos voláteis, conseqüentemente houve a queda do pH para 6,8 (Tabela 15) mas não houve necessidade de receber nenhuma correção de pH. O acúmulo de AOVs interfere na produção na metanogênese pois levam a queda do pH (MAMFRIM, 2013). A queda do FOS/TAC no dia 25º de experimento demonstrou necessidade de alimentação dos reatores, no qual foi realizada logo após as análises de FOS/TAC. As Alimentações ocorreram nos dias 25º, 47º e 57º. Segundo LILI et al. (2011) o FOS/TAC entre 0,3 e 0,4 mostra a produção do biogás está em equilíbrio, pode-se observar valores próximos a esses a partir do dia 13/03 das amostras de SD. Tais amostras demonstraram mais estabilidade na variação da taxa de FOS/TAC, o que é ideal para degradação de compostos intermediários. Segundo Barbosa (2017), a estabilidade no processo de digestão anaeróbia depende do equilíbrio entre de consumo e produção de ácidos, que são controlados pela atividade dos microrganismos em função da carga orgânica adicionada, ou seja, a alimentação. Barbosa (2017) analisou durante a fase operacional da digestão anaeróbia de vinhaça da cana-de-açúcar uma taxa de FOS/TAC entre 0,1 e 0,3, a autora atribuiu esses valores

à estabilidade entre a fase ácida e a metanogênese, conseqüentemente ao não acúmulo de ácidos no reator.

Na Tabela 15 os resultados das análises de FOS/TAC indicam que foi necessário realizar a alimentação dos reatores apenas três vezes para que mantivesse produção. Os valores de alimentação dos reatores foram de 1 g de SVA e 3 g de SD, cálculo baseado na MSO de cada substrato.

**Tabela 15-** Tabela com os resultados das análises de FOS/TAC do experimento com reatores de fluxo semi-contínuo e o valor de biomassa adicionado em cada reator após análise.

Data da Amostra	Dia do Experimento	Amostra	pH	Volume H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH 5.0	Volume H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH 4.4	TAC	FOS	FOS/TAC	Adição de biomassa (g)	Adição de água destilada (mL)
9/2	7	SVA 1	7,2	35,6	16,4	178000	2721	1,53	-	50
9/2	7	SVA 3	7,1	31,1	14,7	155500	2439	1,57	-	50
9/2	7	SD 2	7,5	24,3	8,2	121500	1360	1,12	-	50
9/2	7	SD 3	7,5	25,9	9,7	129500	1609	1,24	-	50
20/2	18	SVA 1	6,8	33,5	25,0	167500	4149	2,48	-	50
20/2	18	SVA 3	6,9	25,0	18,0	125000	2987	2,39	-	50
20/2	18	SD 2	7,7	45,0	13,0	225000	2157	0,96	-	50
20/2	18	SD 3	7,6	51,3	14,3	256500	2373	0,93	-	50
27/2	25	SVA 1	7,8	49,0	11,9	245000	1974	0,81	1	48
27/2	25	SVA 3	7,8	56,0	14,0	280000	2323	0,83	1	48
27/2	25	SD 2	7,7	49,0	11,1	245000	1841	0,75	3	46
27/2	25	SD 3	7,8	42,5	7,0	212500	1161	0,55	3	46
21/3	47	SVA 1	8,3	44,0	9,0	220000	1493	0,68	1	48
21/3	47	SVA 3	8,3	38,2	4,5	191000	7462	0,39	1	48
21/3	47	SD 2	8,2	35,0	5,0	175000	8292	0,47	3	46
21/3	47	SD 3	8,3	42,0	5,1	210000	8458	0,40	3	46
31/3	57	SVA 1	8,1	39,0	11,0	195000	1825	0,94	1	48
31/3	57	SVA 3	8,1	29,5	7,6	147500	1260	0,85	1	48
31/3	57	SD 2	8,1	29,0	5,0	145000	8292	0,57	3	46
31/3	57	SD 3	8,5	63,0	3,5	315000	5802	0,18	3	46
24/4	80	SVA 1	9,4	65,0	12,0	325000	1991	0,61	-	50
24/4	80	SVA 3	9,4	69,5	9,0	347500	1493	0,43	-	50
24/4	80	SD 2	9,4	62,0	10,0	310000	1659	0,54	-	50
24/4	80	SD 3	9,3	75,2	11,0	376000	1825	0,49	-	50

#### 4.2.7 Estimativa do potencial de conversão de energia térmica e elétrica

Para estimativa do potencial de geração de energia térmica e calorífica primeiramente foram utilizados os resultados do potencial bioquímico de biogás NmL.g<sup>-1</sup>MSO e a porcentagem de biometano obtido nos experimentos dos reatores de fluxo semicontínuo e multiplicado pela

quantidade de resíduos gerado na indústria para obter o potencial de metano que teria todo o resíduo gerado na indústria, como mostra a Tabela 16.

**Tabela 16-** Valores de referência usados para o cálculo de estimativa de conversão para energia térmica e elétrica

Substrato	BMP Biogás NmL.g <sup>-1</sup> MSO	Média % Biometano	Produção de resíduos na indústria (toneladas.mês <sup>-1</sup> )	Potencial de geração de biogás com o resíduo da indústria (m <sup>3</sup> .mês <sup>-1</sup> )
SVA	726,54	50	30	10244,23
SD	652,78	60	20	5556,46

A partir dos dados de potencial de geração de biogás com o resíduo da indústria por mês em m<sup>3</sup> foram realizados os cálculos teóricos para conversão de energia térmica e energia elétrica, onde foram considerados 30 % de eficiência do motor, 85 % de rendimento do gerador de acordo com a literatura, operando 24 h por dia. Os resultados estão expressos na Tabela 17.

**Tabela 17-** Resultados dos cálculos de estimativa de conversão para energia térmica e energia elétrica

Substrato	Estimativa de conversão para energia térmica Mcal d <sup>-1</sup>	Estimativa de conversão para energia elétrica KWh d <sup>-1</sup>	Estimativa de conversão para energia elétrica KWh mês <sup>-1</sup>
SVA	1.451,27	430,10	12.903,22
SD	928,86	275,28	8.258,45

Temos, segundo os resultados apresentados na Tabela 17, que 1.451,27 Mcal d<sup>-1</sup> gerados por dias de estimativa de energia térmica seria possível ser convertido em 430,46 kWh d<sup>-1</sup> de energia elétrica para a amostra de SVA, isso considerando o teor de biometano. Esse potencial calorífico poderia ser usado no próprio processamento da soja durante a secagem do grão por exemplo.

Com a somatória da estimativa de potencial de geração de energia elétrica de SVA e SD seria possível abastecer 131 residências com o valor de 21.161,67 kWh.mês<sup>-1</sup>, considerando o consumo médio de energia mensal em uma residência na região centro-oeste de 161 kWh (EPE, 2017). Enquanto Resende (2017) estimou a geração de 6.351,45 kWh.mês<sup>-1</sup> com o aproveitamento do biogás gerado por bagaço de cana-de-açúcar em uma indústria. Já Ferreira (2017) estimou a geração de 6,16.10<sup>5</sup> kWh.mês<sup>-1</sup> com biogás produzido no tratamento da vinhaça, o que seria o bastante para abastecer 11.600 habitantes.

Dependendo do uso, se for aplicado somente a queima direta, poderia ser dispensada custos com a purificação do biogás gerado pela SD, por gerar baixos teores de H<sub>2</sub>S e gerar teor de

metano superior ao de CO<sub>2</sub>, porém essa biomassa tem menor disponibilidade. Outra opção que poderia ser avaliada seria testes submetendo a SVA a um pré- tratamento, como possibilitar a iniciar o processo de degradação naturalmente antes de iniciar o processo em anaerobiose, como ocorre com o resíduo SD.

Para a o aproveitamento da energia elétrica tem que haver um estudo mais aprofundado de viabilidade econômica para que possa se fazer um investimento em uma usina de geração de energia elétrica. Porém, em termos gerais é recomendado a esta indústria o tratamento do resíduo via conversão anaeróbia e o aproveitamento do potencial térmico em alguns processos industriais, pois estaria solucionando dois passivos ambientais: um do volume do resíduo gerado que não tem uma destinação correta, e segundo evitaria o lançamento do CH<sub>4</sub> diretamente na atmosfera. Além de ganhos econômicos com economia de outras fontes de energias térmicas pagas.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os experimentos realizados bem como os ensaios de amostragem com as biomassas utilizadas nesse estudo demonstraram resultados satisfatórios em questão de produção e qualidade do biogás.

O substrato Soja do Decantador, apesar de ser considerado mais impuro, por ter maior teor de inorgânicos que a SVA, foi mais satisfatória por produzir baixos teores de H<sub>2</sub>S durante o processo de Digestão Anaeróbia e taxas de biometano acima de 65%, o que permite ter menor custo caso o uso aplicado necessite de algum tipo de dessulfurização. O volume total de biogás produzido pelas amostras substratos SD durante o experimento nos reatores de fluxo semicontínuo foi de 34,78 NL e o potencial bioquímico de biogás a 652,78 NmL.g<sup>-1</sup>MSO. Já no experimento em batelada apresentou o potencial bioquímico de biometano de 414,20 NmL.g<sup>-1</sup>MSO.°

As amostras de Soja Varrição também demonstraram ser bastante viável para conversão anaeróbia, demonstrando no experimento em batelada com retenção de 30 dias estabilidade a partir do 10º dia com o potencial bioquímico de biometano acima de 400 NmL.g<sup>-1</sup>MSO, e no experimento em fluxo contínuo teores de biometano na média de 56 %, total de volume foi de 38,71 NL e o potencial bioquímico de biogás a 726,54 NmL.g<sup>-1</sup>MSO.

A soma da estimativa de geração dos dois produtos para energia térmica e energia elétrica respectivamente foram de 2.380,13Mcal d<sup>-1</sup> e 21.161,67 kWh mês<sup>-1</sup>, o que além de ser um tratamento para o resíduo gerado diminuindo cerca de 80-90% e evitar o lançamento de metano na atmosfera, ainda poderia ser uma economia energética dentro da própria indústria.

A produção de biogás e consumo interno da própria indústria, seja na queima para obtenção de energia térmica ou conversão para energia elétrica, pode agregar valor ao produto final ao evitar custos com consumo de energia externa, porém seria apropriado utilizar algum método de purificação do biogás por conta dos teores de H<sub>2</sub>S detectados durante o experimento de fluxo semicontínuo.

Como a disponibilidade do resíduo de SVA é maior que a de SD que apresenta menores teores de H<sub>2</sub>S e maior teor de metano que SVA, uma opção seria fazer um pré-tratamento do resíduo SVA deixando-o nas mesmas condições do SD e reavaliar as porcentagens dos gases gerados em experimento de reatores de fluxo semicontínuos.

Sugere-se como trabalhos futuros: estudo de viabilidade econômica da utilização desse biogás na indústria; estudo de viabilidade de utilização do digestato em agricultura; análise do poder calorífico do biogás produzido com tais amostras e poder calorífico do digestato.

## REFERÊNCIAS

ABIOVE. **Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (Abiove)**. Disponível em: < <http://www.abiove.org.br/>>. Acesso em: 16/10/2018.

ABIOVE. **Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (Abiove)**. Disponível em: < <http://www.abiove.org.br/>>. Acesso em: 20/01/2019.

ABDESHAHIAN, P.; LIM, J. S.; HO, W. S.; HASHIM, H.; LEE, C. T. **Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 714-723, 2016

AL SEADI, T., RUTZ, D., PRASSL, H., KOTTENER, M., FINSTRWALDER, T., VOLK, S., & JANSSEN, R. (2008). **Biogas Handbook**.—University of Southern Denmark Esbjerg. ISBN 978-87-992962-0-0.

ALI, J.; SINGH, R.P.; DURGAPAL, V. "**Biogas Production from Different Organic Biomass Materials by Anaerobic Batch Fermentation**". *American Journal of Biomass and Bioenergy*. Vol. 5 Iss. 1 (2016) p. 43 – 56.

ANGHEBEN, A. A. **Estudo da remoção de H<sub>2</sub>S de biogás sob diferentes condições operacionais utilizando soluções contendo ferro em um sistema em escala de bancada**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ARIAS, J. **Remoción del sulfuro de hidrogeno. H<sub>2</sub>S (g)/ácido sulfhídrico H<sub>2</sub>S en el biogás**. *ECAG*. 6p. 2010.

AWE, O. W.; ZHAO, Y.; NZIHOU, A.; MINH, D. P.; LYCZKO, N. **A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies**. *Waste and Biomass Valorization*, v. 8, n. 2, p. 267-283, 2017.

BARBOSA, M. Y. U.. **Reator anaeróbio alimentado com vinhaça de cana-de-açúcar: avaliação dos efeitos causados pela interrupção na alimentação e estratégias para mitigação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. doi:10.11606/D.18.2017.tde-26092017-163317. Acesso em: 2019-02-10.

BARBOSA, L. C. **Análise de tecnologias para separação de CO<sub>2</sub> em plataformas offshore: absorção física por líquidos iônicos, absorção química por aminas e permeação por membranas**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2018.

BARBOSA, M. Z.; ASSUNÇÃO, R. **Ocupação territorial da produção e da agroindústria da soja no Brasil, nas décadas de 80 e 90**. *Informações econômicas*, v. 31, n. 11, p. 7-16, 2001.

BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L. **Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos**. *Eng Sanitaria Ambiental*, v. 21, n. 21, p. 275-282, 2016.

**BIOPROCESS. Manual of operation an maintenance of the biogas production potencial testing system from the substrates (AMPTS II), 2014.**

**BORSCHIVER, S.; DA SILVA, A. L. R. Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais.** In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis, Santa Catarina. 2014.

**CAILLOT, V. A. Avaliação do potencial de produção de biogás dos resíduos da suinocultura codigeridos com resíduos agricultura brasileira.** 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017

**CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho.** Informações Agronômicas, v. 122, p. 12-14, 2008.

**CARMONA, J. C. L. Recuperação de nitrogênio e fósforo na forma de estruvita a partir de lodo gerado em processo biológico de tratamento de esgoto.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2017.

**CCE – Centro para conservação de energia. Guia Técnico de Biogás.** Amadora – Portugal.117p.2000.

**CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento Brasil. Indic. Agropec.,** Brasília, Ano XXV, n. 12, dezembro 2019.

**CHU, D.; BARNES, D. J. The lag-phase during diauxic growth is a trade-off between fast adaptation and high growth rate.** Scientific reports, v. 6, p. 25191, 2016.

**CITELLI, I. R.; SARTI, A.; PIRES, SI MAINTINGUER2 LO. Avaliação da geração de metano por diferentes inóculos utilizando glicerol e melaço de soja como substrato.** XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica UFSCar – São Carlos – SP.

**DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources: an introduction.** John Wiley & Sons, 2011.

**DAI, B.; XU, J.; HE, Y.; X., P.; WANG, X.; DENG, Y.; WANG, Y & Yin, Z. Acid inhibition during anaerobic digestion of biodegradable kitchen waste.** Journal of Renewable and Sustainable Energy, v. 7, n. 2, p. 023118, 2015.

**DALL'AGNOL, A. A Embrapa Soja no contexto do desenvolvimento da soja no Brasil: histórico e contribuições.** Embrapa Soja-Livro técnico (INFOTECA-E), 2016.

**DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources: an introduction.** John Wiley & Sons, 2011

**DE FREITAS, Jéssica Clemente et al. Energias renováveis, clima e mudanças climáticas.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 4, p. 317-329, 2015.

DOMINGUES, M. S. **A soja no contexto do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB)**. Tese de doutorado. São Paulo, 2016.

EICHLER, P.; SANTOS, F.; TOLEDO, M.; ZERBIN, P.; SCHMITZ, G., ALVES, C.; RIES, L.; GOMES, F.. **Biomethanol production via gasification of lignocellulosic biomass**. Quím. Nova, São Paulo , v. 38, n. 6, p. 828-835, July 2015 .

EMPRESA, DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Consumo anual de energia elétrica por classe (nacional): 1995-2017**. 2017. Acesso em, v. 24, 2017.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of United Nations (2018)**. Production, Crops, Soybeans. Acesso em 03.06.18.

FERREIRA, S. F. **Potencial de aproveitamento energético do biogás a partir da digestão anaeróbia de vinhaça**. 2017.

FOUNTOULAKIS, M. S.; MANIOS, T. **Enhanced methane and hydrogen production from municipal solid waste and agro-industrial by-products co-digested with crude glycerol**. Bioresource technology, v. 100, n. 12, p. 3043-3047, 2009.

FREITAS, M. de C. M. de. **A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola**. Enciclopédia Biosfera–Centro Científico Conhecer, Goiânia-GO, v. 7, n. 12, p. 1-12, 2011.

GERARDI, M. H. **The microbiology of anaerobic digesters**. John Wiley & Sons, 2003.

GUERI, M V D.; Souza, S.; N.; M. de.; Kuczman, O. **Avaliação do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares em reatores batelada e semi-contínuo**. Dissertação de Mestrado 2017.

HOFMANN, J.; VON NIEDERBAYERN, **Regierung. Grundlagen der Biogaserzeugung**. Regierung von Niederbayern, 2000.

HANSEN, T. L.; SCHIMIDT, J. E., ANGELIDAKI, I., MARCA, E.; JANSEN, J. la C.; MOSBAEK, H., & CHISTENSEN, T. H.. **Method for determination of methane potentials of solid organic waste**. Waste Management, v. 24, n. 4, p. 393-400, 2004.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: Mitigation of climate change**. Cambridge University Press, 2015.

IANNICELLI, L. A. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira. Taubaté**. Dissertação de Mestrado. DEM/UNITAU. 2008.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N.; MARDER, M.; CASARIL, C.; KOCH, F.F.& PEDROSO, A. (2014). **Manual básico de biogás**. Lajeado: Univates.

KNORR, M. T. **Quarenta anos de expansão da soja no Brasil, 1975-2015**. Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia, n. 33, 2017.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. D.; PRASAD, S.; SILVA, S. A. **Tratamento anaeróbico de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 2, p. 190-196, 2009.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE- EFES**. Universidade Federal do Espírito Santo, 2012

LIU, Y.; WHITMAN, W. B. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1125, n. 1, p. 171-189, 2008.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico** – Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais UFMG. (2011).

LILI, M.; BIRÓ, G.; Sulyok, E.; PETIS, M.; BORBÉLY, J.; TAMÁS, J. (2011). **Novel approach on the basis of FOS/TAC method. In International Symposia” Risk Factors for Environment and Food Safety” &” Natural Resources and Sustainable Development” &** (Vol. 50, pp. 4-5).

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**. 2014.

MMA. **Identificação das Alternativas Tecnológicas de Controle, Tratamento e Reuso de Resíduos Industriais**. 2006. Disponível [http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_pnla/\\_arquivos/item\\_8.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/item_8.pdf) >. Acesso em 20 de jan. de 2018.

MAMPRIM, O. A. N. **Interferência da variação da carga aplicada específica (CAE) na composição do biogás produzido em digestão anaeróbia**. Dissertação de Mestrado- Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MAZZALI, L. **O processo recente de reorganização agroindustrial: do complexo à organização "em rede"**. São Paulo: EAESP/FGV, 1995. 283p.

MERCADO, A. G. **Remoção de sulfeto de hidrogênio de biogás em instalação piloto com óxido de ferro**. 2010. 1124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Orientação: Paulo Belli Filho Florianópolis, 2010.

NORDMANN, W. **Die Überwachung der Schlammfäulung. KA-Informationen für das Betriebspersonal, Beilage zur Korrespondenz Abwasser**, v. 3, n. 77, p. 77, 1977.

OSAKI, M.; BATALHA, M. O. **Produção de biodiesel e óleo vegetal no Brasil: realidade e desafio**. Organizações Rurais & Agroindustriais, v. 13, n. 2, 2011.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono** (Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2009

ORTNER, M.; LEITZINGER, K.; SKUPIEN, S.; BOCHAMANN, G.; FUCHS, W. **Efficient anaerobic mono-digestion of N-rich slaughterhouse waste: Influence of ammonia, temperature and trace elements**. *Bioresource technology*, v. 174, p. 222-232, 2014.

PAIVA, E. J. M. D. (2010). **Estudo da produção de biodiesel a partir de óleo de babaçu e etanol utilizando a transesterificação alcalina tradicional com agitação mecânica e assistida por ultrassons** (Tese de doutorado, Universidade de São Paulo).

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP–Estudo de Caso**. São Paulo, v. 18, p. 19-20, 2006.

PEREIRA, T. D. S. **Processo aerado termofílico combinando biomassa aderida e suspensa para tratamento de água residuária sintética de indústria de geleias e compotas de frutas**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PHAM, C. H.; TRIOLO, J. M.; CU, T. T. T.; PEDERSEN, L.; SOMMER, S. G. **Validation and recommendation of methods to measure biogas production potential of animal manure**. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, v. 26, n. 6, p. 864, 2013.

REZENDE, B. X. **Estudo da viabilidade da utilização de biomassa para geração de energia elétrica**. 2018.

RIAZI, M. R.; CHIARAMONTI, D. **Biofuels Production and Processing Technology**. CRC Press, 2017.

ROHSTOFFE, F. N. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (2010).

SALVADORI, S.; KONRAD, O.; CASARIL, C.; LUMI, M.; Schmitz, M. **Geração de biogás a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes na fabricação de proteína isolada de soja**. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, v. 9, n. 1, 2012.

SCANO, E. A., ASQUER, C., PISTIS, A., ORTU, L., DEMONTIS, V., & COCCO, D. (2014). **Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant**. *Energy Conversion and Management*, 77, 22-30.

SCHIRMER, W. N.; STEMMLER, A. S.; CROVADOR, M. I. C.; Jucá, J. F. T. **Avaliação da geração de gás sulfídrico no biogás gerado a partir de resíduos sólidos urbanos**. *Ciência & Tecnologia Fatec-JB*, v. 7, n. 1, 2015.

SILVA, G. B. da; GRAFF, C. A. **Avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir de resíduo de leite**. UNIVATES. 2015.

SILVA, C. A. B. V. **Limpeza e Purificação de Biogás**. 2009. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2009.

SOUZA, S. N. M.de. ASSOCIADO, C. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. 2016.

SOUZA, M. E. de. **Fatores que influenciam a digestão anaeróbia**. Revista DAE, v. 44, n. 137, p. 88-94, 1984

STEINMETZ, R.; KUNZ, A.; SOARES, H.; do AMARAL, A. C.; MOTA, S. **Avaliação da produção de biogás de resíduos de incubatório de ovos. In: Embrapa Suínos e Aves-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL NA AGROPECUÁRIA, 4., 2014, Bento Gonçalves, RS. Anais... Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2014. P. 71-76., 2014.

TIETZ, C. M.; ZENATTI, D. C.; FEIDEN, A.; LUPATINI, K. N.; CORRÊIA, A. F. **Influência da temperatura na produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 3, n. 2, 2014.

UNIDO. United Nations Industrial Development Organization. **User manual: Analysis of biogas and methane potential from organic materials in anaerobic batch experiments**. Final version, 2011.

VIANA, M. B. **Produção de biogás a partir de glicerol oriundo de biodiesel**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

VICTORINO, A.; VIANNA, J. N. de S.; ZANETI, I. C. B. B.; VILARINHO, M. T. L. **Biotecnologia e Sustentabilidade: Potencial de digestão anaeróbia na redução de resíduos, na produção de energia e de biofertilizantes**. Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science, v. 5, n. 1, p. 68-87, 2016.

VARGAS, R. L. de. **Teores de macronutrientes e micronutrientes em sementes de soja**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

VIDAL, A. G. **Produção de biogás em reator anaeróbio de alta taxa alimentado com a fração líquida de esterco bovino peneirado**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

WRESTA, A.; BUDHIJANTO, W. **The Effect of the Addition of Active Digester Effluent for Start-up Accelerator in Anaerobic Digestion of Soybean Curd Industry Waste Water (Basic Research for Biogas Power Generation)**. Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology, [S.l.], v. 3, n. 2, p. 81-86, dec. 2012.

YU, Y. **Research on soybean protein wastewater treatment by the integrated two-phase anaerobic reactor**. Saudi Journal of Biological Sciences (2015) 22, 526–531.

ZHANG, P.; CHEN, Y.; ZHOU, Q. **Waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation under mesophilic and thermophilic conditions: effect of pH**. Water research, v. 43, n. 15, p. 3735-3742, 2009.

ZHU, J.; ZHENG, Y.; XU, F.; LI, Y. **Solid-state anaerobic co-digestion of hay and soybean processing waste for biogas production**. Bioresource technology, v. 154, p. 240-247, 2014.

**ANEXO I- ARTIGO APRESENTADO NO 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE SCIENTIFIC CONFERENCE ON ELECTRIC POWER ENGINEERING (EPE)**

## Anaerobic Digestion Using Residue of Soybean Processing: Biogas Production and its Potential to Generate Energy

Vanessa Kelly Alves Araujo<sup>1</sup>, Suzel de Almeida<sup>2</sup>,  
Sérgio Botelho de Oliveira<sup>3</sup>  
Experimental & Technological Research an Study Group  
(NEXT)- Federal Institute of Goiás (IFG)<sup>1,2,3,4,5</sup>  
Goiania, Brazil  
araujo.vanessak@gmail.com<sup>1</sup>, suzelalmeida@gmail.com<sup>2</sup>,  
dr\_botelho@yahoo.com.br<sup>3</sup>

Wesley Pacheco Calixto<sup>4</sup>, Geovanne Pereira Furriel<sup>5</sup>,  
Danns Pereira Barbosa<sup>6</sup>  
Pontifical Catholic University of Goiás (PUC-GO)  
Goiania, Brazil<sup>6</sup>  
wpcalixto@gmail.com<sup>4</sup>, geovannefurriel@gmail.com,  
dannspb@gmail.com<sup>6</sup>

**Abstract**—In view of the world's energy scenario, it is important to seek exploration of alternative resources of energy. In Brazil there is great availability of biomass that isn't exploited, as in the food industry. The soybean processing industry has production losses that increase the availability of waste and consequently emitting methane gas into the atmosphere. The use of such waste for clean energy generation is advantageous. The work discusses the evaluation of the biomethane generation through anaerobic digestion (AD) at the laboratory level using the AMPTS II equipment, using soybean processing waste as biomass. From the biogas estimative generation was estimation of theoretical energy generation, it was 19KJ/s.

**Keywords**— biomass; renewable power; co-generation; substrate; residue;

### I. INTRODUCTION

Due to economic and population growth, world energy consumption tends to increase [1]. Hydroelectric plants and the use of fossil fuels are still the main energy sources used in Brazil [2]. Fossil fuels, besides being highly polluting, are not renewable and take thousands of years to form [3]. The advances in research and the growing concern of society with the limitation of resources and emission of pollutant gases in the atmosphere, propels the study of alternative sources of energy [4]. Thus, the use of renewable energies such as biomass has a great representativeness, since it has high availability in Brazil [5]. Biogas originates from the decomposition of the organic matter in an anaerobic environment, it contains mainly methane (CH<sub>4</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), hydrogen sulfite (H<sub>2</sub>S) and small amounts of other gases [6].

The activity of soybean cultivation represents a great productivity worldwide. The world soybean production for 2016/17 was estimated at 337.85 million tons, in which the Brazilian share was around 102 million tons [7] [8]. Soybean is a precursor of several important resource products for

humans, animals and biodiesel. In processing stages, losses occur, increasing the availability of residues from this activity. The inadequate disposal of these residues causes many environmental negative impacts. The use of this biomass waste in the biogas generation process, presents advantages such as the generation of energy [9]. Market competitiveness and exportation requires increased production and better yields, including lower consumption and energy costs [10].

The residue from losses in soybean processing mainly of soybean straw, raw soybeans and cooked soybean [11]. Those residues falls into the ground mixing with other wastes and it cannot return to the process. The case study of this work was done using the soybean processed by industry in the state of Goiás, which has the availability about 30 t of this kind residue per month, and represent an interesting source of renewable energy. It presents high total solids and high content of organic matter that are characteristics apposite to the production of biomethane through anaerobic digestion (AD) [12]. The goal of this work has been to estimate the methane potential yield from soybean waste that they are lost in production. The test to evaluate Biochemical Methane Production (BMP) at laboratory scale have been conducted in a Automatic Methane Potential Test System II equipment (AMTPS II), which allows to obtain the levels of methane gas yield, discarding other gases yielded in the AD. The methane yield was converted into calculation an estimate of co-generation of electricity and heat [6].

### II. MATERIAL AND METHODS

The system of AMPTS II of Bioprocess control presents 15 glass reactors (500 ml), electric stirring, set of gas scrubbers, one for each reactor of capacity 100 mL, and gas volume measuring device, here the volume of CH<sub>4</sub> gas released in the gas scrubber assembly is measured using a wet gas flow meter with a multiple flow cell array. This measuring device operates according to the principle of liquid displacement & flotation and can monitor ultra-low gas flows,

where a digital pulse is generated when a volume of gas flows through the device. A system integrated with the equipment makes the acquisition of the data, displaying and analyzing the results. The biomass was ground, homogenized and tested, and soybean residue samples were collected. The reference and control material was microcrystalline cellulose from the manufacturer Synth P.A. This material is 100% biodegradable, that is, it is readily degraded when in the presence of organic matter degradation microorganisms. The inoculum originating from the UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) reactor of the Heinz food industry. UASB are sludge blanket reactors in which the influent sewage enters the bottom of the reactor and in its upward movement, it crosses a layer of biological sludge that is in its inferior part, and it goes through a separator of phases while flowing towards the surface. The 3 mol/L sodium hydroxide solution (NaOH) with 0.4% thymolphthalein pH indicator, ultrapure water, nitrogen gas (N<sub>2</sub>) and standard solutions of pH 4,0 and 7,0 were prepared. Total (TS) and volatile solids (VS) were determined 2 days before starts the batch test. It was determined according to the Operation and Maintenance Manual AMPTSII, where 2.0000 g of representative sample of biomass and inoculum were added singly into in dry crucibles. Then placed in the oven preheated 105°C for 20 h in order to evaporate moisture. Next the crucibles placed in a desiccator for cooling. The crucible mass and sample were measured without moisture. The sample was calcined in Bunsen's beak and muffle at 550°C for 3 h. After cooling, in desiccator and the new mass was measured. TS expressed in equation (1) is the ratio between the amount of sample after drying at 105°C and the wet sample (M<sub>wet</sub>). The ratio between the difference after drying at 105°C (M<sub>Dried</sub>) and burning at 550°C (M<sub>Burned</sub>) and the initial amount of sample represents the VS content of the biomass (M<sub>wet</sub>), expressed in equation (2) [13].

$$TS(\%) = \frac{M_{dried}}{M_{wet}} \quad (1)$$

$$VS(\%) = \frac{M_{dried} - M_{burned}}{M_{wet}} \quad (2)$$

TABLE I. TOTAL SOLIDS (TS) AND VOLATILE SOLIDS (VS) CONTENT

SAMPLE(g)	TS(%)	VS(%)
2.6486	59.1	44.3
2.8978	68.0	52.3
2.3436	62.9	40.4

The VS data were used to calculate inoculum and the wet matter of each reactor in the ratio 2:1, respectively, occupying in each reactor the net volume of 400mL and 100mL headspace for biogas rise. Experiment in triplicate, being the inoculum, reference or blank of the experiment. Controlled pH, closed reactors and coupled hoses. The anaerobic environment was made with nitrogen gas, connected by the agitation system, water bath system at 40°C. The hoses connected to the reactors were connected to the vials with NaOH, 3 mol/L with pH indicator 0.4% thymolphthalein, where the biogas is purified before going to the bubble counter (biomethane) connected to the online software of the AMPTS II equipment.

### III. RESULTS AND DISCUSSION

In AMPTS II, the measurements (on-line) of biomethane produced in the anaerobic digestion, in laboratory scale, during 30 days. The recorded production of BMP, real-time cumulative volume and biomethane flow and volume normalization (NmL g<sup>-1</sup> VS), Equation (2), specify the biomass potential of the biomass and its biodegradation rate. The system has an algorithm that avoids overestimation of the volume and gas flow.

$$EP = \frac{V_s - V_i}{M_{VS,SS}} \quad (3)$$

Equation (3) - Calculation of BMP, where: V<sub>s</sub> = Average cumulative volume of methane sample (inoculum and substrate); V<sub>i</sub> = average value of the accumulated volume of methane produced by white (inoculum); And m<sub>VS,SS</sub> is the volatile solids (VS) contained in the reactor.

Figure 1 shows the specific production of methane by MSO for the substrate tested. Microcrystalline cellulose had a yield of 438.4 NmL g<sup>-1</sup> VS. This reference material is 100% biodegradable, presenting a superior result to the biomass substrate of soybean processing residue. The soybean residue substrate shows 421.4 NmL g<sup>-1</sup> VS, close to that of microcrystalline cellulose. It is observed that the substrate of soybean residue presents faster methane production when compared to microcrystalline cellulose, possibly due to the composition of this substrate, indicator of easily degradable organic material. The methane production curves for the soybean residue sample in Figure 1 show an analogous trend, already in the first days of registration, this lasts until almost all the organic matter has been digested and the accumulated methane recorded. After this period, gas production is stationary (around the 25th day).

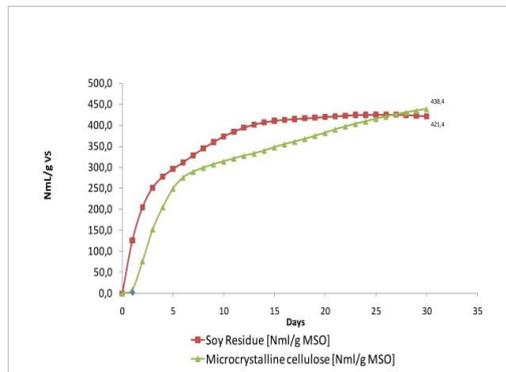


Fig. 1 - Methane production during the anaerobic digestion of the tested soybean biomass and microcrystalline cellulose (reference)

The generated gas can be used as a source of heat energy in boilers in the industry itself, in internal combustion generators and gas turbid to generate electricity[14]. By obtaining the volume of biomethane produced in the generating unit, it assists in making decision to choose which generation technology to use, which generating group, a possible commercialization of carbon credits, among other strategies [15].

As a result of estimate of biomethane generation it is possible to calculate a conversion capacity of the use of biogas as fuel to generate energy. Equation (4) represents the calculation of the conversion of biogas, where: EP= electric power (kW);  $Q_{\text{biogas}}$  = biogas flow  $\text{m}^3/\text{day}$ ;  $\text{HHV}_{\text{biogas}}$  = high heat value ( $\text{Kcal}/\text{m}^3$ );  $\eta_{\text{generation}}$ = electric power conversion efficiency (%); 4.1868= conversion factor kcal into KJ; 86400= is the conversion factor between a day and seconds [16] [17].

$$EP = \frac{Q_{\text{biogas}} \times \text{HHV}_{\text{biogas}} \times \eta_{\text{generation}} \times 4,1868}{86400} \quad (4)$$

$Q_{\text{biogas}} = 192 \text{ m}^3/\text{d}$ , based on biomethane generation calculations;

$\text{HHV} = 6.810 \text{ kcal}/\text{m}^3$ , based in calculations [17].

$\eta_{\text{generation}} = 0,3$

$$EP = 19 \text{ KJ}/\text{s}$$

#### IV. CONCLUSION

Through this work, with AMPTS II, it was possible to carry out preliminary kinetic studies of biomethane production of soybean residue biomass. This system provides better laboratory testing conditions when compared to conventional biodegradability tests under anaerobic conditions. The substrate tested and its respective BMP can be attributed to the difference in its composition, or even, preliminary processing of the biomass, as well as the granulometry of the solids of the substrate, indicating the results of the research in characterization and composition studies. The data extracted

from the kinetics of the process show that the behavior of the biomasses in the tests shows similarity, but the substrate of soybean residue, after about 10 days, presented faster methane production in time when compared to the cellulose. The use of soy residue to produce biogas is not only an environmental gain at the end of the cycle of natural resource use, but also an economic gain for the industry in the generation of energy, producing approximately  $5.770 \text{ m}^3$  of biomethane per month. Which can be used for example in the co-generation of electric energy and fuel. Therefore, it's concluded that the theoretical energy generation value from the biogas generation estimate in this case study was  $19 \text{ KJ}/\text{s}$ .

#### ACKNOWLEDGMENT

We thank all institutions that cooperate and contribute to this research. The Federal Institute of Science and Technology of Goias - IFG, for its exemplary cooperation initiative with universities and research institutions, in particular the IFG Department of Chemistry and the Professional Master's Program in Sustainable Process Technology. Special thanks to the GIZ of the German Embassy and the National Network of Substrates, who have collaborated for this initiative. At Kraft Heinz Foods Ltda Brazil and Federal University of Goias-UFG by support for research. At the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), the Goias State Research Foundation (FAPEG) and at Department of Chemistry of Pontifical Catholic University of Goias- PUC-GO by support for this research.

#### REFERENCES

- [1] N. S. Lewis, and D. G. Nocera, "Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization." Proceedings of the National Academy of Sciences 103, no. 43 (2006): 15729-15735
- [2] M. P. S. Martins, "Technology innovation and energetic efficiency." Monograph of postgraduate studies MBA in electric energy, Federal Institute of Economy-UFRJ (1999).
- [3] M. Asif, and T. Muneer. "Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies." Renewable and Sustainable Energy Reviews 11, no. 7 (2007): 1388-1413
- [4] R. C. Costa, and C. P. T. Prates, "The role of renewable energy sources in the development of the energy sector and the barriers of its penetration on the market." (2005)
- [5] L. Oswaldo, and J. Goldemberg, "Financial crisis, energy and sustainability in Brazil." advanced studies 23, no. 65 (2009): 121-130.
- [6] F. N. Rohstoffe, "Practical guide of Biogas: Generation and Utilization." Ministry of Nutrition, Agriculture and Consumer Protection of Germany (2010).
- [7] Anonymous. United States Department of Agriculture, "United States Department of Agriculture". Circular Series WAP 01-17 January 2017.
- [8] National Supply Company. Indicators of Agriculture / National Supply Company. Indic. Agropec., Brasília, Year XXV, n. 12, December 2016.
- [9] F. Borges, N. Sellin, S. H. W. Medeiros, Characterization and Evaluation of Sanitary and Industrial Effluent Sludge as Biomass in Energy Generation. Science & Engineering, Joinville, v. 17, n.1/2, p. 27-32, 2008.
- [10] K. S. Lopes, "Evaluation of the stage of soybean oil clarification through central composite planning and investigation of the potential for energy improvement in soybean processing." (2008).
- [11] J. Zhu, Z. Yi, X. Fuqing, and L. Yebo. "Solid-state anaerobic co-digestion of hay and soybean processing waste for biogas production." Bioresource technology 154 (2014): 240-247.

- [12] F. Battista, D. Fino, and G. Mancini. "Optimization of biogas production from coffee production waste." *Bioresource technology* 200 (2016): 884-890.
- [13] Manual of Operation and Maintenance of the Biogas Production Potential Testing System from the Substrates (AMPTS II), 2014.
- [14] J. Justi, "Simulation model to analyze the viability of electric power generation in urban sewage treatment plants after the implementation of the REN 482/12." Master's thesis, 2013.
- [15] D. F. Costa, "Generation of electric energy from the biogas of the sewage treatment." David Freire da Costa (2006).
- [16] A. Coldebella, "Viability of the use of biogas from bovine farming and swine breeding for electric power generation and irrigation in rural properties." 2006, 74 f." PhD diss., Dissertation (Masters in Agricultural Engineering)–Post-Graduate Program in Agricultural Engineering, State University of Western Paraná, Cascavel-PR, 2006. Available at: <[http://tede.unioeste.br/tede/tde\\_busca/arq\\_uivo.php](http://tede.unioeste.br/tede/tde_busca/arq_uivo.php), 2006.
- [17] R. D. Oliveira, "Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo, 2009).