

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 08/03/2021.

BRENDA CLARA GOMES RODRIGUES

**Aproveitamento do Melaço de Soja para Produção de Biometano em Reator
UASB**

Dissertação apresentada ao Instituto de Química,
Universidade Estadual Paulista, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Biotecnologia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Lúcia Gonsales da Costa Araújo

Co-orientador: Prof. Dr. Arnaldo Sarti

Araraquara
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

R696a Rodrigues, Brenda Clara Gomes
Aproveitamento do melaço de soja para produções de biometano em reator UASB / Brenda Clara Gomes Rodrigues.
– Araraquara : [s.n.], 2019
84 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química

Orientador: Maria Lúcia Gonsales da Costa Araújo

Coorientador: Arnaldo Sarti

1. Biogás. 2. Reatores UASB. 3. Digestão anaeróbia.
4. Resíduos orgânicos. 5. Metano. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "Aproveitamento do melaço de soja para produção de biometano em reator UASB"

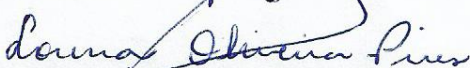
AUTORA: BRENDA CLARA GOMES RODRIGUES

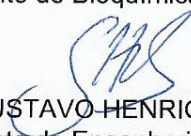
ORIENTADORA: MARIA LUCIA GONSALES DA COSTA ARAUJO

COORIENTADOR: ARNALDO SARTI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em BIOTECNOLOGIA, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ARNALDO SARTI
Departamento de Bioquímica e Tecnologia Química / Instituto de Química - UNESP - Araraquara


Profª Drª LORENA OLIVEIRA PIRES
Departamento de Bioquímica e Tecnologia Química / Instituto de Química - UNESP - Araraquara


Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP - Bauru

Araraquara, 08 de março de 2019

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO

Nome: Brenda Clara Gomes Rodrigues

e-mail: brendaclaragr@gmail.com

ENDEREÇO PROFISSIONAL

Departamento de Bioquímica e Tecnologia Química, Instituto de Química de Araraquara, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Rua Prof. Francisco Degni, 55, Bairro Quitandinha, CEP: 14800-060 – Araraquara, SP

FORMAÇÃO ACADÊMICA/TITULAÇÃO

2010-2016: Bacharelado em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia

Universidade Federal do Tocantins – *Campus Gurupi*.

Monografia: *Sensibilidade In Vitro de Sclerotium rolfsii à Farinha de Mostarda Etíope*

Orientador: Prof. Dr. Gil Rodrigues dos Santos

2014-2015: Graduação Sanduiche (Biotecnologia Industrial)

Università di Pisa – UNIPI/Italia

Bolsa: CAPES

2017-2019: Mestrado em Biotecnologia

Instituto de Química de Araraquara, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Araraquara.

Dissertação: *Aproveitamento do Melão de Soja para produção de biometano em reator UASB*.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Lucia Gonsales da Costa Araújo

Bolsa: CAPES

PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentações de trabalhos

1. ALMEIDA, A. F. de; TEIXEIRA, W. F. A.; RODRIGUES, B. C. G.; CARVALHO, L. P.; SANTOS, C. A. A. Development of mixed-culture using filamentous fungif or plant cell wall degrading-enzymes production in solid state cultivation. VIII Congresso Brasileiro de Micologia, 2016, Florianópolis.
2. RODRIGUES, B.C.G.; SARTI, A.; ARAUJO, M.L.G.C. Aproveitamento do melão de soja para produção de biogás em reator UASB. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ, 2018, São Paulo.

*Ao meu avô José de Azevedo Gomes, minha
inspiração e meu mentor, para sempre.*

*A minha avó Maria José Clara Gomes, meu norte
e minha força diária.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A mais de dois anos atrás, fiz algumas escolhas das quais a única certeza era que nada poderia ser previsto. Mais uma vez, novas-velhas rotinas se repetiam: muda de casa, muda de cidade, muda de Estado e por vezes de país. Muda de vida. Dois anos depois, mergulhada nessas escolhas e feliz por tê-las tomado, feliz pelas novas certezas e incertezas.

A pesquisa que desenvolvi ao longo desses dois anos pode não ser a melhor de todas (na área) ou de grande valor para os críticos, pesquisadores e aprendizes (como eu), mas até aqui esse foi o meu trabalho mais importante. Isso porque ele não é só meu... esse trabalho tem abraços, ligações, cartas, várias pausas para o café, churrascos aos domingos, sorrisos pelos corredores, muitas explicações químicas, passos apressados, viagens aos fins de semana, mensagens no celular, saidinhas nas quartas-feiras e muita saudade. Esse trabalho foi feito de apoio, mesmo quando não parecia se tratar dele.

A pós-graduação nunca será um ciclo fácil para ninguém, mas isso não quer dizer que nunca poderá ser maravilhoso. Costumo dizer que tive sorte, porque eu nunca estive só. Eu espero que durante toda a minha vida eu consiga agradecer com gestos todos aqueles que, inconscientemente, seguraram a minha mão e me ampararam ao longo desse processo.

A minha família, meu bem mais precioso, me concederam os melhores e maiores títulos que eu possa vir a ter: valores de vida tão nobres. Aos meus avós, minha mamis, meus irmãos, minhas tias e tios, meus primos, vocês são meus primeiros exemplos de força, empatia, respeito e meu maior orgulho é fazer parte do que somos, ser quem somos. É imensurável a admiração que tenho por vocês e esse trabalho é mais uma conquista nossa.

Falando em família, não é incomum ouvir por ai que tenho amigos no mundo inteiro, mas o que seria de mim sem essas almas transeuntes tão distintas e ao mesmo tempo tão iguais a minha? Acredito que eu seria um deserto, caminhando em círculos no meu umbigo. Aos meus amigos, gostaria de falar que a singularidade de cada um alimenta a minha alma. A família que me escolheu e eu escolhi, que me aceita e me recebe, sempre e em qualquer lugar, vocês são os complementos decisivos dos títulos obtidos em casa.

Em especial, gostaria de agradecer a Amanda, a amiga que a pós me deu e que se não tivesse sido aqui, a gente teria se encontrado em algum momento dessa vida. Eu me sinto mais forte quando temos que ser fortes juntas migs. Ao Guilherme, amigo de graduação e que a pós nos uniu novamente, bem mais que meros encontros, meu irmão de vida e que fez parte ativamente desse trabalho. Gui você foi, é e sempre será fundamental na minha jornada, aqui o trabalho não para. Vocês dois tem morada nessa dissertação e no meu coração.

Além da minha família e amigos, ao longo da vida tive vários mentores, “ídolos” e exemplos de profissionais que aprendi a admirar, dos quais alguns ainda se mantem. Hoje, tenho uma fada-sensata-acessível como orientadora, ela que por vezes acha que não contribuiu muito com meu trabalho, ela que pensa. Profa Maria Lúcia, você é uma mulher incrível e exemplo para nós, suas alunas, continuar a trilhar esses caminhos do mundo, tão cheios de machismo e extremismo. Obrigada por ter aceitado cruzar o meu caminho.

Ainda nesses dois anos de mestrado, conheci vários pesquisadores da área (lendo trabalhos, principalmente), muitos me tornei grande admiradora. Mas, dentre todos, não existe nenhum “van” ou “von” que eu tenha mais admiração do que o Arnaldo Sarti, meu maior ídolo, meu orientador, por vezes co-orientador (rsrs), meu amigo, parceiro de ideias mirabolantes, que foi meu freio em vários momentos, mas que sempre me incentivou a voar e pensar alto. Foi ele que sempre acreditou mais em mim que eu, que me provoca incansavelmente com desafios que só torna o trabalho ainda mais interessante.

Sarti, obrigado por ter feito desses dois anos o mais leve possível, por ser tão humano com seus alunos em um meio em que as hierarquias são mais importantes do que as relações humanas. A sua filosofia de trabalho que me mantém firme e forte no caminho, acreditando no que fazemos. Quando se gosta do que faz, ir no laboratório aos finais de semana é o melhor programa.

Diante de tantas pessoas fundamentais que estiveram presentes nesse período ou que sempre estiveram na minha vida, existem aquelas que comumente chamamos de colaboradores. Costumo pensar nos meus colaboradores como a malha ferroviária da Europa, eles tornaram meu caminho em direção aos meus objetivos mais fácil, leve e cheio de conhecimento de forma eficiente. Minha eterna admiração ao Juliano que viabilizou uma etapa extremamente importante desse trabalho, a Zilda com sua disposição e alegria em sempre resolver meus problemas mais triviais e a toda equipe do Instituto de Química que zela tão bem por quem aqui passa. Da janela do meu vagão, vocês me proporcionaram as mais belas paisagens e me levaram a lugares incríveis.

E assim, sigo acreditando, que mesmo nos meus momentos mais solitários e nos trabalhos mais individuais, eu nunca estarei sozinha. Obrigada.

Agradeço a CAPES, pelo fomento.

*“Triste, louca ou má
Será qualificada
Ela quem recusar
Seguir receita tal*

*A receita cultural
Do marido, da família
Cuida, cuida da rotina*

*Só mesmo, rejeita
Bem conhecida receita
Quem não sem, dores
Aceita que tudo deve mudar*

*Eu não me vejo na palavra
Fêmea: Alvo de caça
Conformada vítima*

*Prefiro queimar o mapa
Traçar de novo a estrada
Ver cores nas cinzas
E a vida reinventar*

*E um homem não me define
Minha casa não me define
Minha carne não me define
Eu sou meu próprio lar*

*Ela desatinou
Desatou nós
Vai viver só.”*

Francisco, el Hombre.

RESUMO

A produção de biogás a partir da digestão anaeróbia (DA) com resíduos industriais e agroindustriais tem se tornado bastante atrativa devido às suas vantagens econômicas, principalmente energética, pelo reaproveitamento do biogás. Nessa pesquisa foi utilizado o melaço de soja (subproduto da produção de proteína de soja) como substrato em reator anaeróbio de manta de lodo (UASB). Foram investigadas duas etapas subdivididas em fases com distintas condições operacionais ao UASB. A Etapa I foi subdividida em 6 fases, nas quais aumentou-se gradualmente a concentração de substrato (500 a 4.000 mgO₂L⁻¹) e reduziu-se o tempo de detenção hidráulica (TDH) (de 48, 24 e 12 horas). Nessas condições atingiu-se eficiências médias de remoção em termos de DQO entre 70 e 85%, sendo obtidos valores de DQO no efluente de 100 a 1.200 mgO₂L⁻¹ e foi obtido produção de biogás superior a 2,0 Ld⁻¹. Posteriormente, a unidade de tratamento foi investigada sob a Etapa II, subdividida em 4 fases, utilizando-se maiores concentrações de substrato (4.000 a 8.000 mgO₂L⁻¹) e TDH fixado em 24 horas, essas novas condições operacionais foram adotadas a partir dos resultados da Etapa I. A eficiência média de remoção de DQO manteve-se em torno de 80%, ressaltando-se que o aumento da carga orgânica, além de não ter inibido o processo, resultou em elevada média de produção de biogás (10,0 Ld⁻¹), atingindo máxima produção de 24,5 Ld⁻¹ com concentração de metano superior a 70%. Desta forma, os resultados obtidos indicam que tanto a produção de biogás como o tratamento biológico foram efetivos, demonstrando o excelente potencial do melaço de soja como substrato para a produção de altas concentrações de metano em reator UASB.

Palavras-Chave: Biogás. Reator UASB. Digestão Anaeróbia. Melaço de Soja.

ABSTRACT

Biogas production from anaerobic digestion (AD) of agro-industrial waste has been attracting significant interest due its economic advantages, especially as mean to offer a sustainable bioenergy source. In this work, soybean molasses (agro-industrial byproduct of soybean meal industry) was used as substrate in an anaerobic sludge blanket reactor (UASB). The research was divided in two parts and overall ten distinct phases according to operation conditions applied to the UASB reactor. The first part was subdivided into six phases. From phase 1 to 6, the substrate concentration gradually increased from 500 to 4.000 mgO₂L⁻¹ and hydraulic retention time (HRT) was reduced (48, 24 and 12 hours). During these phases, under stable operating conditions, the mean values of total COD removal varied between 70 to 85%, COD effluent values obtained varied between 100 to 1.200 mgO₂L⁻¹ and biogas production achieved was up to 2Ld⁻¹. On part two, the HRT was fixed on 24 hours and it was subdivided on four phases on which substrate concentration ranged from 4.000 to 8.000 mgO₂L⁻¹. The mean values of total COD removal were stabilized at around 80%, even with the increased organic load applied to the reactor as well as did not inhibited the biomass. In fact, the biogas production reached a maximum value of 24,5 Ld⁻¹ with methane concentration higher than 70%. The excellent results have demonstrated the potential applicability of this reactor configuration for treating soybean molasses. Moreover, they allowed the feasibility of the use of soybean molasses for biogas production.

Keywords: Biogas. UASB Reactor. Anaerobic Digestion. Soybean Molasses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do processamento dos grãos de soja.....	18
Figura 2: Fluxograma da produção de farelo concentrado proteico e obtenção do melaço de soja.....	20
Figura 3: Principais rotas metabólicas da Digestão Anaeróbia.....	24
Figura 4: Esquema de um reator UASB.....	34
Figura 5: Esquema do UASB utilizado no experimento.....	40
Figura 6: Unidade de tratamento utilizada no experimento.....	40
Figura 7: Medidor de biogás em tubo U.....	46
Figura 8: Placa eletrônica Arduíno.....	46
Figura 9: Esquema do medidor de biogás em tubo U e placa eletrônica.....	48
Figura 10: Meio suporte de fitas de PVC.....	53
Figura 11: Variação da concentração de DQO total e filtrada no afluente e efluente.....	54
Figura 12: Variação da eficiência de remoção de DQO total e filtrada.....	54
Figura 13a: Proliferação de algas no interior do reator UASB durante fase 5.....	57
Figura 13b: Reator UASB após a limpeza.....	57
Figura 14: Manta de lodo durante fase 6.....	58
Figura 15: Variação da concentração de SST e SSV no afluente e efluente.....	60
Figura 16: Variação da concentração de AB e AVT no afluente e efluente.....	62
Figura 17: Variação da produção de biogás em função da COV aplicada.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química dos grãos de soja.....	17
Tabela 2: Composição do melaço de soja.....	21
Tabela 3: Composição do melaço de soja utilizado nesse estudo.....	41
Tabela4: Condições operacionais da Etapa I.....	43
Tabela 5: Condições operacionais da Etapa II.....	44
Tabela 6: Parâmetros físico-químicos analisados e frequência de análises.....	45
Tabela 7: Condições operacionais para realização dos perfis temporais durante a Etapa II...48	
Tabela 8: Concentrações de ST, SV e ST do lodo ao longo do período experimental.....	50
Tabela 9: Valores médios do monitoramento físico-químico ao longo da Etapa I.....	52
Tabela 10: Produção de biogás durante Etapa I.....	64
Tabela 11: Valores médios de monitoramento físico-químico da fase 1.....	65
Tabela 12: Concentração de ácidos orgânicos.....	68
Tabela 13: Composição média do biogás analisado durante a Etapa II.....	70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Soja	16
1.2 Melão de Soja	19
1.3 Digestão Anaeróbia	23
<i>1.3.1 Potencial do Biogás Gerado a partir da Digestão Anaeróbia</i>	<i>27</i>
1.4 Reatores Anaeróbios de Alta Taxa	29
<i>1.4.1 Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (UASB)</i>	<i>31</i>
<i>1.4.2 Princípios e Aspectos de Funcionamento do Reator UASB</i>	<i>34</i>
2 OBJETIVOS	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (UASB)	39
3.2 Inóculo	41
3.3 Melão de Soja	41
<i>3.3.1 Pré-tratamento e Tamponamento do Meio de Alimentação</i>	<i>42</i>
3.4 Procedimento Experimental	42
<i>3.4.1 Etapa I: Condições Experimentais</i>	<i>43</i>
<i>3.4.2 Etapa II: Condições Experimentais</i>	<i>43</i>
3.5 Metodologia Analítica para Monitoramento do Reator	44
<i>3.5.1 Análises Físico-Químicas de Monitoramento</i>	<i>44</i>
<i>3.5.2 Medição do Volume de Biogás Produzido</i>	<i>45</i>
<i>3.5.3 Composição do Biogás</i>	<i>48</i>
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Inóculo	50
4.2 Desempenho do Reator	51
<i>4.2.1 Etapa I</i>	<i>51</i>
<i>4.2.1.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO)</i>	<i>53</i>
<i>4.2.1.2 Retenção de Sólidos</i>	<i>59</i>
<i>4.2.1.3 Alcalinidade a Bicarbonato e Ácidos Orgânicos Voláteis</i>	<i>61</i>
<i>4.2.1.4 Produção de Biogás – Etapa I</i>	<i>63</i>
<i>4.2.2 Etapa II</i>	<i>64</i>
<i>4.2.2.1 Fase 1</i>	<i>65</i>
<i>4.2.2.2 Fases 2, 3 e 4</i>	<i>67</i>

4.2.2.3 Produção de Biogás – Etapa II.....	69
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
REFERÊNCIAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

A economia brasileira, atualmente, é considerada uma das principais potências econômicas mundiais baseadas na agricultura, produzindo e exportando variados grãos, gramíneas, frutas, entre outros (MAPA, 2015). Por outro lado, com o crescimento populacional mundial, os recursos naturais responsáveis pela vida na Terra a partir do fornecimento de alimentos, vestimentas, insumos energéticos, dentre outros, encontram-se em constante diminuição, ao passo que a demanda desses recursos é crescente ao passar dos anos (ONU, 2012).

A ascensão por décadas na industrialização de alimentos, a crescente produção de biocombustíveis de primeira geração e a mudança do comportamento de consumo humano, geram enormes montantes de resíduos, principalmente no setor agroindustrial, devido à alta produtividade agrícola que cresce de acordo com as proporções em que as fronteiras agrícolas avançam também (ONU, 2012).

Dentro desse cenário econômico, a soja é o principal produto da agricultura brasileira, pois é um grão versátil que dá origem a diversos produtos e subprodutos de interesse das agroindústrias, indústrias químicas, farmacêuticas e de alimentos (INCOPA, 2017). De acordo com o relatório trimestral da FIESP (2018), o Brasil é o quarto maior consumidor, o maior produtor e o principal exportador mundial de soja.

Projeções da FAO (2016) estimam que até 2025, o Brasil continuará a ser o maior produtor mundial com cerca de 135 milhões de toneladas de grãos de soja produzido por safra. Contudo, a produção de subprodutos sem interesse comercial e resíduos, também serão gerados, pois cerca de 79% da soja produzida no Brasil é destinada para a fabricação de rações animais e tem adquirido importância crescente na alimentação humana, 18% para produção de óleo de soja e 1% é considerado sem destinação (MAPA, 2015).

De acordo com Yang e Yu (2013), com a produção de farelo concentrado de soja (72% de proteína), que é um produto de grande interesse comercial no ramo alimentício, é produzido como subproduto final o melaço de soja, que é o líquido concentrado remanescente da extração com etanol do farelo de soja. Para cada 1 tonelada de farelo de soja, é produzido 768,1kg de farelo concentrado de soja e 231,9kg de melaço de soja (SIQUEIRA et al., 2008). Esse subproduto já vem sendo visado por pesquisadores e indústrias devido a sua composição rica em carboidratos (OBENDORF et al., 2011), sendo estudada como matéria prima para vários processos fermentativos para obtenção de produtos de valor agregado como etanol,

ácido láctico, goma xantana, ácido málico (SIQUEIRA et al., 2008; SILVA, 2010; LETTI et al., 2012; CHENG et al., 2017), recuperação de lecitina residual (emulsificante) (FERREIRA, 2008) e como fonte de geração de energia para as indústrias, pelo processo de queima em caldeiras.

No entanto, ainda não existem processos consolidados para a utilização do melão de soja devido aos polissacarídeos e fibras insolúveis presentes em sua composição, que necessitam de um pré-tratamento para liberação dos monômeros fermentescíveis. Isso gera um aumento significativo de custos no processo industrial e limitaria a sua utilização como matéria prima para fins industriais (CHENG et al., 2017).

Dessa forma, com a expansão da produção e consumo de soja e seus derivados, faz-se necessário o descarte ecologicamente correto desses subprodutos ainda sem perspectivas de mercado, que é o caso do melão de soja, que pode ser utilizado como substrato em processos biológicos de digestão anaeróbia (DA) para a geração de biometano.

Com a crescente procura de fontes energéticas renováveis e na preocupação em diminuir a dependência de processos que gerem energia a partir de combustíveis fósseis, o processo de DA tem sido constantemente aplicado para conversão de resíduos orgânicos provindos de diversas fontes prontamente biodegradáveis em biometano, que é então utilizado como fonte de energia, gerando calor e eletricidade (KAMDEM et al., 2011). DA é um bioprocessamento em que o resíduo orgânico é biodegradado em biogás por um complexo de microrganismos em um sistema livre de oxigênio; o biogás como produto, consiste principalmente de metano e dióxido de carbono (ABUDI et al., 2016).

De acordo com Evans et al. (2010), a energia gerada a partir da DA apresenta diversas vantagens em relação a outras energias renováveis, como o armazenamento do biogás que pode ser feito, ao contrário da energia eólica ou solar, as quais a capacidade de geração de energia flutua muito ao longo do dia. Assim, existe uma estabilidade sobre a energia gerada, o que pode contribuir consistentemente para a matriz energética do país. Em termos de bioenergia, a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia é um processo bem conhecido, aplicado em muitas instalações de tratamento de resíduos em grande escala, com baixo custo de operação e necessidades energéticas.

Dessa forma, tem-se utilizado reatores anaeróbios no processo de DA, em especial o reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), devido a sua capacidade de tratar diversos tipos de águas residuárias de alta carga, permitindo a produção de biometano na maioria dos casos. Nas últimas décadas, o reator UASB vem sendo amplamente utilizado

em escala plena no tratamento de águas residuárias, sendo encontrado em várias indústrias que fazem seu próprio tratamento de efluentes ou parte dele (LI et al., 2014).

Uma característica interessante do UASB é o seu desempenho na manutenção de concentrações elevadas de biomassa, podendo reter os micro-organismos em forma de grânulos, flocos ou biomassa suspensa na sua parte inferior (SARTI et al., 2001). De acordo com Liu et al. (2015), a efetiva formação de grânulos pode melhorar significativamente a capacidade dos reatores UASB de tratar as altas concentrações de matéria orgânica, além de ter uma versatilidade em tratar diversos substratos, inclusive compostos recalcitrantes ou tóxicos.

Os estudos publicados até o momento não relataram a utilização de melaço de soja para produzir biogás pelo processo de digestão anaeróbia em reator UASB. Portanto, este trabalho busca testar a viabilidade de aplicação do reator anaeróbio (UASB), cuja tecnologia é consolidada, para um subproduto agroindustrial ainda não estudado para produção de biometano.

1.1. Soja

A soja (*Glycine Max L.*), assim como outras leguminosas como o feijão, a ervilha e outras leguminosas fazem parte da classe das dicotiledôneas. De origem asiática, o grão de soja tem sua composição química considerada única (Tabela 1), rico em proteína (35 a 45%), carboidratos (30 a 35%) e óleo (18 a 20%), além de conter cerca de 5% da sua composição de minerais, como fosforo, magnésio, ferro, potássio, dentre outros (EMBRAPA, 2019). A soja possui características de fácil adaptação a climas e solos diversos, em conjunto com seu alto valor nutricional e versatilidade de produtos derivados, tornou-se assim uma *commodity* com grande demanda mundial, o que valorizou a sua produção e atualmente é uma das culturas de maior importância agrícola no mundo, estando entre os 10 alimentos mais consumidos mundialmente. (MAPA, 2015; MISSÃO, 2006).

A diversidade de aplicações em que a soja pode ser utilizada colabora para justificar sua crescente procura e produção. A oleaginosa e seus subprodutos podem ser utilizados como matérias-primas em várias vertentes industriais de cosméticos, de plásticos, veterinária, farmacêutica, química e tintas. Pode ainda ser utilizados na fabricação de fibras, emulsificantes, adubos, dentre outros (HOFMANN, 2012).

O setor alimentício é o que mais demonstra interesse na soja, pois apresenta ampla funcionalidade, sendo encontrado na composição de embutidos, papinhas de crianças,

temperos prontos, cereais, pães, biscoitos, massas, chocolates, misturas para bebidas, sucos e leite a base de soja. Além disso, o farelo é largamente utilizado para produção de rações animais (peixes, suínos, bovinos, aves, etc.). O óleo extraído para produção da farinha de soja é utilizado para produção de óleos utilizados na alimentação humana, maioneses e margarinas. A lecitina, obtida durante o refino do óleo, é um agente estabilizador e emulsificante utilizado para produção de sorvetes, barras de cereais, salsichas e produtos congelados (HOFMANN, 2012; MISSÃO, 2006).

Tabela 1: Composição química dos grãos de soja

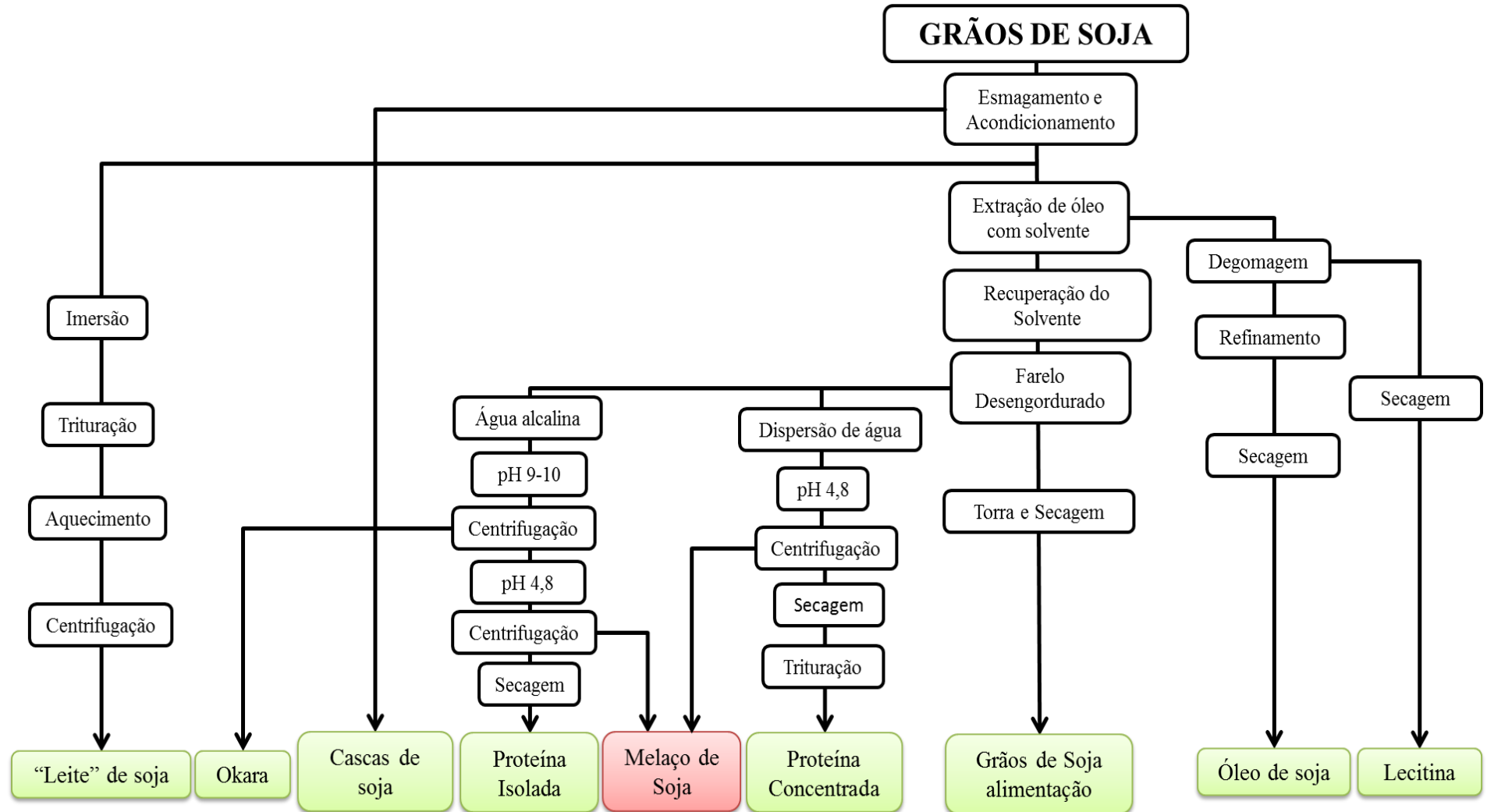
COMPOSIÇÃO	UNIDADE	CONCENTRAÇÃO MÉDIA
Carboidratos Totais	%	32,01
Proteína	%	39,52
Fibra	%	5,75
Óleo	%	23,04
Cinzas	%	5,41
Ferro	mg/100mL	16,50
Cálcio	mg/100mL	231,90
Fósforo	mg/100mL	472,70
Magnésio	mg/100mL	232,40
Potássio	mg/100mL	1.717,50
Manganês	mg/100mL	2,41
Sódio	mg/100mL	11,90

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2019).

Além da larga utilização da soja nos mais diversificados setores industriais e a qualidade nutricional, vários estudos tem sugerido que a soja possa ter outros aspectos benéficos a saúde. Segundo Liu (1997), a soja é uma fonte rica em fitoquímicos, apresentando teores superiores a outros alimentos, como isoflavonóides e compostos como vitamina E que são importantes para a prevenção de doenças crônicas. Barnes et al. (1999) relata a indicação do consumo de soja para tratamentos de vários problemas de saúde ligados ao período peri e pós-menopausa. Bau et al. (2000) relaciona a ingestão de produtos de soja com a prevenção de câncer de próstata em homens. Guias dietéticos citam a inclusão de produtos e grãos de soja para a saúde do coração (ANDERSON et al., 1999).

A soja também é considerada uma fonte de proteína de boa qualidade e de baixo custo, a proteína de soja na sua forma pura é equivalente em qualidade a proteína de origem animal (LIU, 1997), o que gera grande interesse por parte da indústria alimentícia na obtenção desse produto. Na Figura 1 está demonstrado um diagrama de fluxo do processamento da soja e seus vários produtos e subprodutos gerados.

Figura 1: Fluxograma do processamento dos grãos de soja.



Fonte: Adaptado de Loman e Ju (2016)

O farelo de soja, rico em proteínas, contém grandes proporções de carboidratos e a maioria destes são polissacarídeos estruturais e oligossacarídeos, como rafinose e estaquiase (SANNI et al., 1997). A presença desses açúcares de cadeia longa reduz o valor nutricional do farelo de soja, pois os seres humanos e os animais não possuem enzimas (α -galactosidase) necessárias para hidrolisar esses compostos à base de monômeros de galactose. A falta dessa enzima faz com que a digestão desses oligossacarídeos não ocorra, causando desconforto intestinal e flatulências. Assim, a presença desses carboidratos indesejáveis presentes na composição da soja, geram restrições ao uso como fonte proteica na alimentação humana e animal (PRICE et al., 1988; GUIMARÃES et al., 2001).

Dessa forma, a remoção de carboidratos indesejáveis para o enriquecimento proteico do farelo de soja vem sendo feito para melhorar a digestibilidade e seu teor nutricional. Com o processamento do farelo de soja para obter concentrados proteicos, grandes quantidades de melaço de soja, subproduto rico em carboidratos, é gerado e por vezes considerado como resíduo ou como fonte de energia em caldeiras (SIQUEIRA et al., 2008). Esse subproduto, a base de carboidratos, possui baixo valor agregado, isso devido à falta de metodologias efetivas e de larga escala para aplicações que resultem na valorização e empregabilidade sustentável dessa biomassa.

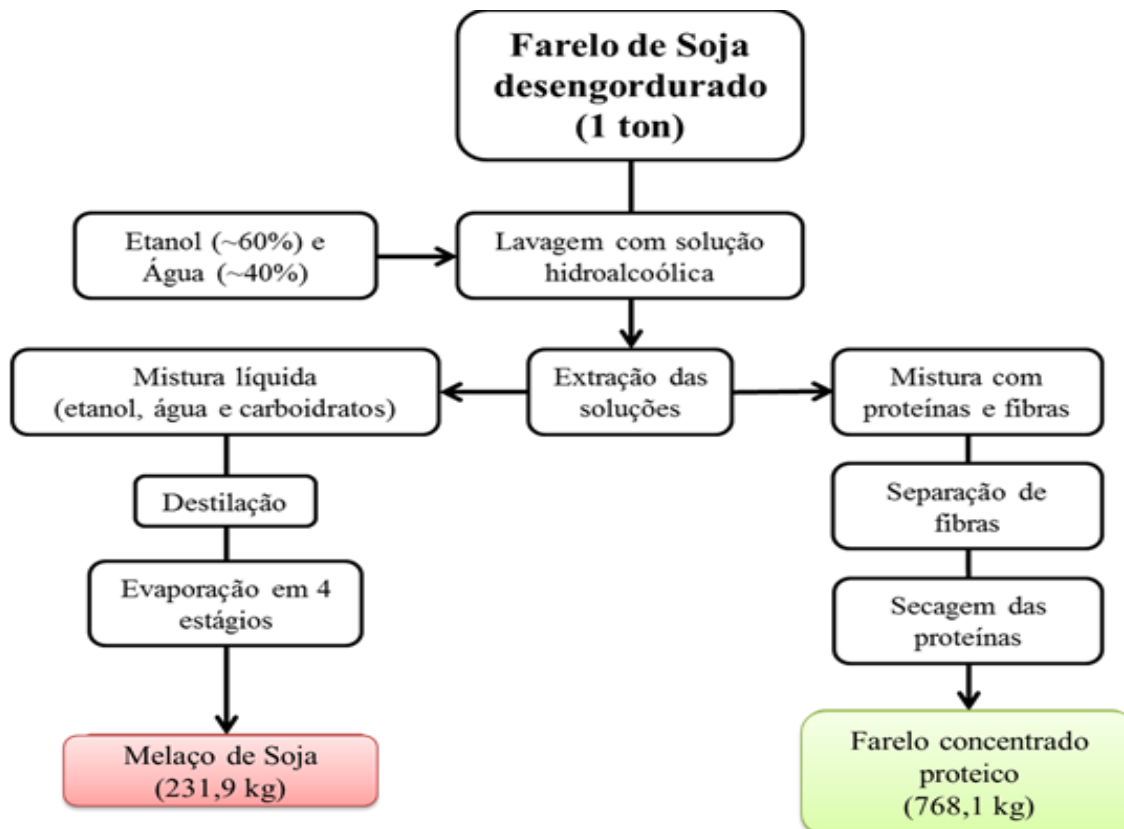
1.2. Melaço de Soja

O melaço de soja é um subproduto gerado durante o processamento do farelo desengordurado de soja para produção de concentrados proteicos a base de soja, que resulta em cerca de 30% do farelo de soja processado (SIQUEIRA et al., 2008). O enriquecimento proteico do farelo de soja é feito a partir da extração hidroalcoólica dos carboidratos presente no farelo. O processo consiste na lavagem do farelo de soja com uma mistura de cerca de 60% de etanol e 40% água, com isso é resultante duas frações: uma contendo as proteínas de soja e fibras insolúveis e outra contendo uma mistura de etanol, água e principalmente os carboidratos da soja, na forma de xarope marrom (JOHNSON et al., 1992).

Dessa forma, a fração contendo as proteínas é enviada para secagem, o qual torna-se um farelo concentrado proteico (cerca de 70% de proteína) e com valor comercial para a indústria. O xarope marrom passa por um processo de destilação para recuperação do etanol e posteriormente evaporação da água residual, gerando assim o melaço de soja, único subproduto resultante da extração de proteínas com etanol (JOHNSON et al., 1992;

MACHADO, 1999; YANG E YU, 2013; GUEDES, 2015). Na Figura 2 está apresentado o fluxograma da obtenção de proteína concentrada e melão de soja.

Figura 2: Fluxograma da produção de farelo concentrado proteico e obtenção do melão de soja.



Fonte: Adaptado de Guedes (2015).

Devido a sua composição rica em carboidratos, o melão de soja é considerado um subproduto com grande potencial de mercado, podendo ser precursor de vários processos na obtenção de produtos com valor agregado em diferentes setores industriais (GUEDES, 2015).

Estudos a respeito da composição química do melão de soja descrevem de forma semelhante que ele é constituído de cerca de 60% de carboidratos. Porém, apenas cerca de 35% dos carboidratos são relatados como digeríveis por animais e humanos, por terem sua composição de sacarose, glicose, frutose e galactose, os outros açúcares (cerca de 25%) estão nas suas formas não digeríveis em monogástricos, constituído de rafinose e estaquiose (GUEDES, 2015; SIQUEIRA et al., 2008; MONTAVANI, 2013). Na Tabela 2 está descrita a composição do melão de soja descrito na literatura.

Tabela 2: Composição do melaço de soja.

Composição	Concentrações (%)		
	Siqueira et al. (2008)	Montavani (2013)	Guedes (2015)
Carboidratos	57,30	53,20	36,40
Proteína bruta	9,44	4,60	5,30
Extrato etéreo	21,20	2,80	5,80
Fibra bruta	5,70	0,60	22,60
Cinza	6,36	12,50	5,80
Umidade	-	26,30	24,10

Fonte: Autora, 2019.

Esses açúcares quando utilizados na alimentação de animais e humanos não são digeríveis, fazendo-os entrar em contato com bactérias anaeróbias no intestino grosso, convertendo esses açúcares em grandes quantidades de gases, fato também conhecido como flatulências intestinais, que podem causar mal estar e outros sintomas de desconforto intestinal (SNYDER e KWON, 1987; SUAREZ et al, 1999). Dessa forma, varias pesquisas desenvolvidas ao longo dos anos vem investigando a conversão do melaço de soja em bioprodutos mais valiosos.

Cheng et al. (2017) relatam altos índices de produção de ácido málico por fermentação ($\sim 70\text{gL}^{-1}$) com leveduras de melaço de soja em relação a outros substratos de baixo custo (casca de soja e milho). Além da alta produtividade de ácido málico, os autores ainda relatam que a utilização do melaço de soja diminuiria os custos de produção, já que o substrato utilizado nesse tipo de processo custa cerca de 50% dos custos de produção e o melaço de soja é um dos substratos mais baratos relatados neste trabalho. Porém, o autor ainda relata que o desafio para tornar o melaço de soja competitivo para produção industrial de ácido málico é a redução do tempo de fermentação (cerca de 260h), isso devido aos oligossacarídeos (rafinose e estaquiose) que precisam ser hidrolisados para liberação dos monômeros fermentescíveis.

Qureshi et al. (2001) utilizaram melaço de soja para produção de butanol, acetona e etanol. No entanto, os autores relatam que dos 746 gkg^{-1} de açúcares totais presente no melaço de soja utilizado, apenas 434 gkg^{-1} eram fermentescíveis aos produtos de interesse relatados no trabalho. Isso indica que cerca de 300 gkg^{-1} de açúcares não foram utilizados.

Montelongo et al. (1993) utilizaram melaço de soja como substrato para produção de ácido láctico. O autor relata que com a utilização do melaço de soja e a suplementação do meio com extrato de levedura, foi possível reduzir de 36h para 10h o tempo de fermentação com aumento de 30% de rendimento. Caldeirão et al. (2015) relatam a utilização de melaço de soja para produção de bactérias lácticas, os autores avaliaram o desenvolvimento dessas

bactérias em melaço de soja e constataram que todas as estipes utilizadas (comerciais) cresceram satisfatoriamente, indicando que esse substrato é indicado para essa finalidade.

Moreira et al. (2016) utilizaram melaço de soja para produzir hidrogênio por fotofermentação em batelada (84h) a partir de culturas puras de bactérias. Os autores relatam que o longo período de fotofermentação se deu devido à adaptação das bactérias ao substrato. No entanto, 85% dos açúcares presente no melaço foram convertidos, ressaltando que apenas a frutose presente não foi consumida em sua totalidade.

Morais et al. (2016) otimizaram a produção de lipase por *Candida rugosa* e *Geotrichum candidum* em melaço de soja por fermentação submersa. Foram obtidos resultados significativos quando a fermentação foi mantida com pH a 3,5 e temperatura a 35°C, essas condições possibilitaram concentração e atividade das lipases de 300 gL⁻¹ e 11,55±0,05 UmL⁻¹, respectivamente. Esse valores estão dentro da faixa citada na literatura que os autores usaram de comparação, em que a atividade lipásica varia entre 0,35 a 19,51 UmL⁻¹, demonstrando que o melaço de soja é um bom candidato de baixo custo para esse tipo de processo.

Montavani (2013) utilizou o melaço de soja para recuperação de compostos isoflavonas. O autor relata que foi possível fazer a recuperação e a bioconversão de isoflavonas glicosídicas em agliconas. Porém, varias técnicas dispendiosas foram utilizadas para que o melaço se tornasse um substrato viável para essa funcionalidade. Técnicas de ultrafiltração, seleção de micro-organismos, comparação entre solventes para extração, dentre outras metodologias. O autor ainda relata que é necessário fazer alguns estudos de otimização para reduzir o tempo de bioconversão das isoflavonas e sua atividade antioxidante.

A utilização do melaço de soja para produção de bioetanol é o mais relatado na literatura, isso obviamente devido a sua composição rica em açúcares prontamente fermentescíveis. A rota metabólica utilizada é a fermentação alcoólica, utilizando leveduras, principalmente do gênero *Saccharomyces*. Machado (1999) utilizou melaço de soja *in natura* como substrato para fermentação alcoólica com *Saccharomyces cerevisiae* comercial. O autor relata que mais de 50% do melaço de soja foi convertido a etanol com pH e temperaturas controlados, 6,0 e 30°C, respectivamente. Porém, apenas os açúcares mais simples foram convertidos, sendo que a rafinose e a estaquiose não foram convertidas, o autor ainda indica que o melaço de soja pode ser utilizado como um aditivo da fermentação de caldo de cana para produção de etanol. Siqueira et al. (2008) também utilizaram melaço de soja *in natura* para conversão a etanol de forma escalonada (bancada, piloto e industrial), os autores relatam

os mesmos problemas enfrentados por Machado (1999), em que os oligossacarídeos não foram convertidos pelas leveduras durante a fermentação.

Romão et al. (2012) apresentaram conversão superior a 70% do melaço de soja a etanol. No entanto, foi necessário efetuar um pré-tratamento por hidrólise ácida do melaço de soja para posteriormente ser realizado o processo de fermentação. Silva (2011) comparou o rendimento da produção de etanol por melaço de soja *in natura* e hidrolisado enzimaticamente com α -glicosidase. A autora constatou que quando hidrolisado, a utilização do melaço de soja como substrato para fermentação alcoólica, aumenta significativamente o rendimento do processo.

Yang et al. (2018) utilizaram melaço de soja como substrato para produção de ácido propiônico. A escolha do melaço de soja nesse trabalho se deve a utilização de uma fonte de carbono e nitrogênio de baixo custo. Neste caso, devido a sua composição foi feita uma investigação para a possível substituição da glicose pura e extrato de levedura, componentes essenciais para geração do ácido propiônico, que correspondem a 30% dos custos de produção do ácido propiônico. Os autores notaram que a produção foi semelhante a de outras fontes de substrato, indicando assim que o melaço de soja pode ser um forte candidato para produção de baixo custo de ácido propiônico. No entanto, no estudo é ainda relatado que maior suplementação de nitrogênio no processo pode melhorar a sua eficiência.

Como é possível notar, o melaço de soja tem sido tratado como um potencial substrato para uma diversidade de aplicações industriais por vários anos. Mas é possível observar que a maior dificuldade para consolidar metodologias para a sua utilização é a presença dos oligossacarídeos da família rafinose, os quais necessitam ser hidrolisados por enzimas específicas e assim liberar monômeros que podem ser utilizados em vários bioprocessos. Etapas de pré-tratamentos ou hidrólises (ácidas, básicas, enzimáticas e físico-químicas) podem aumentar significativamente os custos de produção.

A utilização do melaço de soja em processos de digestão anaeróbia para geração de bioenergia ainda não é relatado na literatura, o qual pode ser uma alternativa simples e eficaz para destinação desse subproduto.

2.2 Digestão Anaeróbia

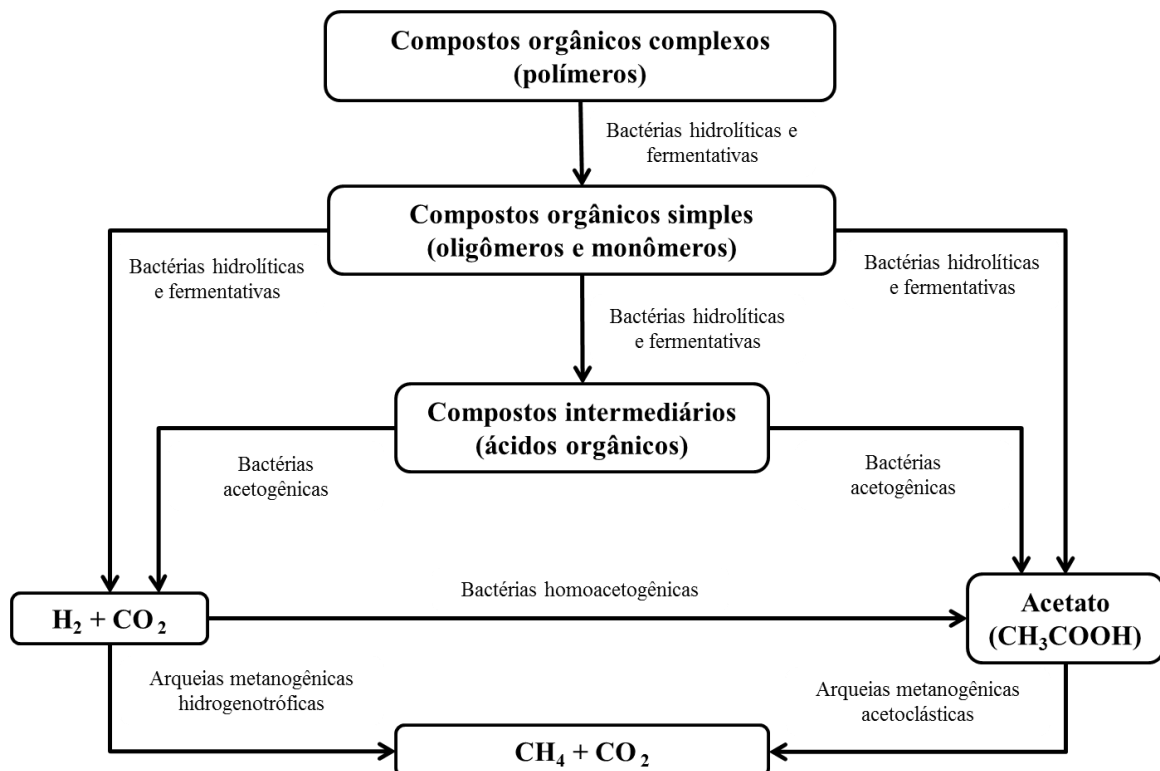
A digestão anaeróbia é um bioprocessos que ocorre naturalmente e atua na degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio livre, gerando biogás, que consiste numa mistura

gasosa, formada principalmente por metano (~70%) e dióxido de carbono (~30%). Esse processo é resultante da atividade sintrófica de uma diversidade populacional de micro-organismos, o qual garante uma bioconversão efetiva (FUESS, 2017).

Harpen e Pohland (1986) relatam que existem pelo menos nove mecanismos bioquímicos distintos envolvidos na degradação de substratos complexos durante a digestão anaeróbia, que ocorrem sequencialmente ou em paralelo. Para cada um desses mecanismos é necessário uma população microbiana específica e que esteja adaptada às condições do meio, de forma que o bioprocessamento ocorra plenamente. Porém, como as vias metabólicas no sistema anaeróbio são tão variadas tanto quanto a quantidade de micro-organismos envolvidos, o conhecimento em detalhes deste bioprocessamento é muito complexo, sendo consideradas de forma resumida, quatro principais etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, de modo que pelo menos cinco grupos microbianos estão envolvidos na digestão anaeróbia.

Na Figura 3 está apresentada as quatro principais rotas metabólicas e os subprodutos gerados durante cada etapa da digestão anaeróbia.

Figura 3: Principais rotas metabólicas da Digestão Anaeróbia.



Fonte: Adaptado de Fuess (2017).

No início da digestão anaeróbia, os polissacarídeos são expostos a bactérias hidrolíticas, que convertem esses compostos a monossacarídeos, e fermentativas que

convertem os monossacarídeos em compostos de cadeia curta (ácidos graxos voláteis, álcoois, CO₂ e H₂) que são mais facilmente absorvidos através da parede celular microbiana. Esses compostos mais simples são degradados por bactérias acetogênicas, produzindo principalmente ácido acético, H₂ e CO₂. Esses compostos são, por fim, utilizados como substrato pelas *arqueias* metanogênicas para produção de biogás, pelo processo de metanogênese (McCARTY e SMITH, 1986).

As *arqueias* metanogênicas são comumente designadas como hidrogenotróficas, que convertem o H₂ e CO₂ em metano, e as acetoclásticas que utilizam o acetato. A maior parte do metano produzido durante a digestão anaeróbia provém das vias metabólicas utilizadas pelas *arqueias* metanogênicas acetoclásticas. Porém, como a reação de conversão de acetato em H₂ e CO₂ não é termodinamicamente favorável em equilíbrio, apresentando ΔG° com valor positivo (+104 kJmol⁻¹), a presença das *arqueias* metanogênicas hidrogenotróficas é de extrema importância para a manutenção das reações de conversão a metano, uma vez que esses micro-organismos controlam a pressão parcial de hidrogênio a níveis muito baixos, favorecendo o deslocamento do sentido da reação de produção de H₂ e CO₂, caracterizando a relação sintrófica entre esses organismos (THAUER et al., 1977).

Rosa (2009) relata que nas etapas de hidrólise, acidogênese e acetogênese englobam tanto bactérias anaeróbias obrigatórias quanto facultativas. Os micro-organismos dessas etapas mais frequentemente isolados em reatores anaeróbios são *Clostridium spp.*, *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium spp.*, *Micrococcus spp.*, *Bacillus spp.*, *Desulphovibrio spp.*, *Corynebacterium spp.*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphylococcus spp.*, *Escherichia coli*, dentre outros (TCHOBANOGLIOUS et al., 2003; CHERNICHARO, 2007).

As *arqueias* metanogênicas são estritamente anaeróbias, ou seja, na presença de oxigênio (O₂) seu crescimento é inibido. Esse grupo de micro-organismos é considerado como limitante durante o processo devido a baixa taxa de crescimento, por possuir características físico-químicas desfavoráveis ao seu crescimento, o que causa alta sensibilidade a mudanças ambientais, principalmente temperatura e pH.

Dessa forma, o sucesso da digestão anaeróbia requer controle ambiental rigoroso e que privilegiem os requisitos da população metanogênica. Os principais grupos de *arqueias* metanogênicas incluem *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus*, *Methanospirillum*, *Methanosaeta*, *Methanothrix* e *Methanosarcina*, sendo os três últimos formados por micro-organismos acetoclásticos. Muito desses micro-organismos identificados em reatores anaeróbios se assemelham àqueles encontrados em sedimentos de corpos d'água,

em estômago de ruminantes e de seres humanos (TCHOBANOGLIOUS et al., 2003; CHERNICHARO, 2007).

Vale ressaltar que as *arqueias* metanogênicas são de extrema importância para o processo anaeróbio, pois sem sua participação a matéria orgânica não seria degradada totalmente. Os ácidos orgânicos gerados em etapas anteriores à metanogênese possuem similar concentração de matéria orgânica original ao substrato em termos de DQO (Demanda Química de Oxigênio), sendo que estes seriam acumulados no meio líquido na ausência deste grupo específico de microrganismos. Sendo assim, as *arqueias* realizam papel fundamental na estabilização da matéria orgânica presente no substrato (WIEGANT, 1986).

Speece (1996) relata que a formação microbiológica para a geração de metano pode ocorrer em uma ampla faixa de temperatura e pH. Entretanto, são relatados que o intervalo de temperatura ideal é entre 25 a 55 °C, que compreende as faixas mesofílicas e termofílicas (LETTINGA, 1996; CHERNICHARO, 1997). Apesar de possuir um amplo intervalo de temperatura, Moraes et al. (2015) relataram que os maiores índices de remoção em termos de DQO foram observados em reatores mesofílicos. No entanto, foram necessários longos tempos de detenção hidráulica, o que não seria interessante para aplicações industriais de larga escala industrial.

A respeito da manutenção do pH, o intervalo ótimo considerado é entre 6,5 a 8,2, devido a alta sensibilidade das *arqueias* metanogênicas a esse fator. Valores de pH fora dessa faixa, principalmente valores inferiores a 5,5 podem acidificar o meio, o que implica na necessidade de adequação do pH para neutralizar os ácidos formados no processo, pois estes podem inibir de forma irreversível o consórcio microbiano.

Não foram relatados problemas operacionais quando o processo anaeróbio apresentou pH superior a 8,0, já que a digestão anaeróbia gera alcalinidade naturalmente devido a conversão de ácidos voláteis intermediários. Na literatura a adição de álcali é extremamente recomendada para aplicação da digestão anaeróbia em reatores submetidos à altas cargas orgânicas, conseqüentemente a alta taxa de açúcares fermentescíveis (SPEECE, 1996; CHERNICHARO, 1997). Os sais, que fornecem alcalinidade a bicarbonato diretamente, mais utilizados para fazer o controle do pH podem ser NaOH, NaHCO₃, NH₄HCO₃ e os que reagem com gás carbônico para produzir alcalinidade bicarbonato são CaO, Ca(OH)₂ e NH₃ (LONGO, 2015).

Assim, quando em total equilíbrio, a digestão anaeróbia pode apresentar conversões significativas da porção inicial de matéria orgânica em biogás (superior a 60%). O metano é o

principal produto final do metabolismo do consórcio complexo anaeróbio, que pode ser utilizado principalmente para geração de energia (SPEECE, 1996).

Dessa forma, a utilização da digestão anaeróbia é uma alternativa para o aproveitamento de subprodutos como substratos para geração de bioenergia por produção de biogás rico em metano. Esse bioprocessos apresenta vantagens por ser considerado um processo industrial consolidado, economicamente viável (baixa demanda de energia) e efetivo meio de remoção da carga orgânica, sendo este estudado e utilizado por décadas (WILKIE et al., 2000). A geração de outros resíduos (lodo biológico) durante a digestão anaeróbia, em comparação a outros tratamentos aeróbios convencionais, é tida como vantagem por produzir baixas quantidades de biomassa, sendo que 50% da DQO convertida durante o processo anaeróbio é de biogás, enquanto nos tratamentos aeróbios essa mesma proporção é convertida em lodo biológico, o qual necessita de um pós-tratamento (SPEECE, 1996).

1.3.1. Potencial do biogás gerado a partir da Digestão Anaeróbia

A utilização do biogás para o aproveitamento energético apresenta uma sinergia importante com o saneamento básico, devido às vantagens ambientais e energéticas, uma vez que pode ser obtido a partir do tratamento de resíduos provenientes de áreas rurais, urbanas e de agroindústrias, auxiliando no gerenciamento desses resíduos. Além disso, a produção controlada e uso do biogás contribuem para a redução de emissões fugitivas de metano durante o tratamento desses resíduos (COELHO et al., 2018).

A digestão anaeróbia apresenta importantes vantagens a respeito da geração de energia a partir do biogás em relação a outras tecnologias sustentáveis. A capacidade de geração de energia por biodigestão gira em torno de 50 a 60% em relação ao potencial mínimo e médio que poderiam ser obtidos por meio da combustão do biogás em plantas industriais (BORZACCONI et al., 1995). Dessa forma, cerca de 90% da matéria orgânica utilizada no processo de digestão anaeróbia poderia ser convertida a metano sob condições operacionais ótimas (PANT e ADHOLEYA, 2007; WILKIE, 2008; CHERNICHARO, 1997).

Diversas são as possibilidades da utilização do biogás, mesmo com poucos estudos na literatura que estimem seu potencial (FUESS, 2017). Entre as principais aplicações do biogás para geração de bioenergia, incluem (SALOMON et al., 2011; MORAES et al., 2014; NOGUEIRA et al., 2015):

- Eletricidade, a partir da aplicação em acionadores primários;

- Calor ou vapor, por meio da queima em caldeiras;
- Injeção na rede de gás natural;
- Combustível automotivo, em substituição ao gás natural;

No entanto, Jeong et al. (2009) relatam que, dentre as opções, a utilização do biogás para geração de eletricidade é a melhor opção para maximizar o aproveitamento energético do biogás, em especial a plantas industriais que já possuem disponibilidade de tecnologias consolidadas e infraestrutura, podendo utilizar a eletricidade gerada e comercializar o excedente produzido.

Apesar da potencialidade que o biogás apresenta a sua utilização como bioenergia ainda não é difundida no Brasil, possuindo poucas usinas e indústrias que reaproveitam o biogás como fonte de energia (SOUZA et al., 1992; EPE, 2018). Garcilasso e Ferraz Jr. (2018) indicam que os maiores obstáculos para o uso do biogás no Brasil são:

1. Alto custo, devidos a investimentos iniciais necessários;
2. Condições imprevisíveis do mercado de biogás;
3. Incentivos governamentais direcionados;
4. Dificuldade da comercialização de créditos de carbono por pequenas unidades;
5. Falta de informação e financiamento para os agricultores;
6. Estudo de caso direcionado;
7. Falta de estudos especializados na literatura visando avaliação de viabilidade econômica.

Dentro desse cenário, vale destacar que em 2017 foi sancionada a Lei nº 13.576/2017 que cria a RenovaBio, que é a Política Nacional de Biocombustíveis. Essa nova política tem três principais objetivos:

- i. Fornecer uma importante contribuição para o cumprimento dos compromissos determinados pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris (COP 21);
- ii. Promover a adequada expansão dos biocombustíveis na matriz energética, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis;
- iii. Assegurar previsibilidade para o mercado de combustíveis, induzindo ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, comercialização e uso de biocombustíveis.

Essa nova política estabelece metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, incentivando o aumento da produção e da participação de biocombustíveis

na matriz energética do Brasil. A expectativa é que, quando consolidada, a RenovaBio dinamize o segmento e saneie os obstáculos do setor (ANP, 2019).

Segundo a Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABIOGÁS) (2019), o biometano é o único biocombustível com pegada negativa de carbono quando todo o ciclo de vida é analisado. O biogás oriundo de dejetos e de rejeitos agrossilvipastoris, por exemplo, é o biocombustível com o maior valor de descarbonização, com a RenovaBio. Neste caso, a produção do biogás será incentivada, não só de resíduos agrossilvipastoris, mas também de resíduos sólidos-urbanos e plantas de agroindústrias. Consequentemente, as plantas de agroindústrias que produzem biometano serão valorizadas por isso.

Pelo biometano ser um combustível mais competitivo, quando se trata de descarbonização, este acaba se tornando uma outra receita para o impulsionamento da produção do biogás. Assim, além de vender combustível, ter CO₂ e ter o biofertilizante oriundo do lodo digerido, terá o CBIO (Crédito de Descarbonização por Biocombustíveis) que vai ser outra fonte de receita para as usinas de geração de biogás, permitindo maior competitividade (ABIOGÁS, 2019).

Como a literatura ainda não contempla relatos da utilização de melaço de soja para geração de biogás, o seu potencial como substrato para geração de biogás ainda era uma incógnita até o presente trabalho.

1.4. Reatores Anaeróbios de Alta Taxa

Um dos primeiros reatores anaeróbios descritos na literatura para tratamentos de águas residuárias municipais foi projetado por Karl Imhoff em 1905 e até nos dias atuais ainda é utilizado em várias partes do mundo, principalmente em regiões com clima tropical. Mas a utilização de reatores anaeróbios para tratamento de águas residuárias industriais começou a ser investigado seriamente na década de 1920, por Arthur M. Buswell (van LIER, 2015). Buswell elucidou as reações bioquímicas de oxido-redução que ocorrem durante a digestão anaeróbia, o que possibilitou o entendimento básico do processo. van Lier (2015) relata que a partir dos estudos de Buswell, também foi possível calcular a geração teórica de metano de acordo degradação da matéria orgânica conhecida.

No início do desenvolvimento dos reatores anaeróbios e seu funcionamento, a capacidade de conversão anaeróbia estava estritamente associada à taxa de crescimento dos micro-organismos, já que o tempo de detenção hidráulica foi semelhante ao tempo de

retenção de sólidos (BUSWELL e SOLLO, 1948). Dessa forma, como a taxa de crescimento microbiano era muito baixa, os reatores anaeróbios eram muito grandes, o que foi considerada a maior desvantagem destes reatores denominados de baixa taxa. Os sistemas predominantemente utilizados até a década de 1960 foram os CSTR (do inglês *continuous stirred-tank reactor model*) ou reatores de batelada com mistura completa (RITTMANN e McCARTY, 2001; van LIER et al., 2008).

Com a necessidade de tornar viável a utilização de reatores anaeróbios para tratamento de águas residuárias, a alternativa foi desassociar o tempo de detenção hidráulica do tempo de retenção celular, caracterizando os reatores anaeróbios de alta taxa. Essa prática permitiu reduzir o volume operacional dos reatores anaeróbios, tornando o sistema interessante para tratamentos de resíduos domésticos e efluentes industriais com boa relação custo-benefício (van LIER, 2015).

Os reatores anaeróbios de alta taxa são geralmente classificados de acordo com o tipo de processo de imobilização de biomassa utilizado para permitir maior tempo de retenção celular. Esta imobilização pode ser natural pela formação de grânulos ou biofilmes ou imobilização física por meio de suportes inertes. A imobilização física é frequentemente utilizada quando grânulos ou biofilmes não ocorrem naturalmente devido a características específicas da água residuária (KHANAL, 2008). Com o aperfeiçoamento dessa tecnologia foi possível obter uma retenção de biomassa adequada ao sistema anaeróbio, e conseqüentemente viabilizaram o funcionamento de reatores anaeróbios com altas concentrações de biomassa, podendo ser aplicada altas taxas de carga orgânica volumétrica nessas unidades (LETTINGA et al., 2001).

A implantação efetiva de reatores anaeróbios de alta taxa se deu na década de 1970 na Europa Ocidental, a qual coincidiu com leis ambientais mais rígidas e a crise energética que elevou os preços da energia. Essas mudanças legislativas afetaram diretamente indústrias alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose, dentre outras, pois grandes quantidades de águas residuárias altamente concentradas eram geradas diariamente e necessitavam de tratamentos (van LIER, 2008).

Na operação das primeiras instalações anaeróbias foi possível observar que durante o tratamento dos efluentes, quantidades consideráveis de biogás eram geradas e que este poderia ser recuperado em energia útil para uso na própria planta industrial, além da baixa produção de lodo em relação a tratamentos aeróbios, que foi de extrema importância para a implementação das unidades. O excesso de lodo gerado no processo, do tipo granular, ganhou

valor comercial e é vendido no mercado para inoculação (van LIER, 2008; ERSAHIN et al., 2011).

Nas últimas quatro décadas várias configurações de reatores anaeróbios de alta taxa foram desenvolvidas e atualmente mais de 90% dos tratamentos de águas residuárias no mundo são caracterizados pela tecnologia com a presença de manta de lodo anaeróbia, ou seja, o emprego do reator UASB (CHERNICHARO et al., 2014). van Lier (2015) fez um levantamento a respeito da aplicação de tecnologia anaeróbia para efluentes industriais no mundo. O autor estimou que o número atual de reatores anaeróbios de alta taxa instalados é superior a 4.000 (quatro mil), e este ainda ressalta que atualmente são tratadas águas residuárias que antes não eram consideradas viáveis via processo anaeróbio, como efluentes químicos tóxicos ou composições complexas.

1.4.1. Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (UASB, do inglês Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor)

No final da década de 1970, uma equipe de pesquisadores da Universidade de Wageningen na Holanda, comandada pelo professor Gatzke Lettinga desenvolveram um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo, comumente chamado de UASB, sigla do inglês *upflow anaerobic sludge blanket reactor* (LETTINGA et al., 1980). No Brasil o uso de reatores UASB foi introduzido na década de 1980, por meio de pesquisas nacionais e de engenheiros que atuavam no setor de saneamento em conjunto com o professor Lettinga (CHERNICHARO et al., 2014). Este reator é considerado a principal configuração em termos de sistema de tratamento anaeróbio com aplicação para uma diversidade de águas residuárias industriais e agroindustriais.

De acordo com Metcalf e Eddy (2014), o desenvolvimento e aplicação do reator UASB se destaca como umas das principais tecnologias para o avanço de tratamento anaeróbio de efluentes de alta carga orgânica (alta taxa), além de poder ser utilizado para tratamentos de águas residuárias domésticas. Buuren (1996) relata que os reatores anaeróbios de alta taxa, em especial o reator UASB, são tecnologias reconhecidas como eficazes na proteção e preservação ambiental, pois é considerado um sistema sustentável e apropriado para países em desenvolvimento e com climas tropicais.

Por exemplo, Hulshoff Pol et al. (1997) investigaram a aplicabilidade do reator UASB para tratamento de efluentes petroquímicos (ácido tereftálico). Os autores observaram que foi

possível alcançar eficiência de remoção de cerca de 90% quando aplicado uma COV máxima de $4,4 \text{ kgDQOm}^{-3}\text{d}^{-1}$ contendo apenas ácido tereftálico em TDH de 24h, porém os autores relatam que o período para se obter esses valores foi superior a 100 dias, sugerindo que longos períodos de adaptação podem ser requeridos pelo processo para atingir resultados satisfatórios, de acordo com o substrato utilizado.

Já Santos et al. (2016) investigaram a remoção de cor e DQO de água residuária de indústria têxtil rica em corante verde malaquita em reator UASB, nesse caso os autores observaram, após 70 dias, eficiência de remoção superior a 80 e 96% de DQO e cor, respectivamente. Os autores utilizaram COV de $1,5 \text{ kgDQOm}^{-3}\text{d}^{-1}$ em TDH de 24h e verificaram a estabilidade do sistema após 35 dias. Nesse estudo, a utilização da tecnologia do reator UASB demonstrou ser adequado para remoção de DQO e cor de água residuária com características tóxicas e recalcitrantes.

Em contrapartida, Campos (2010) avaliou a eficiência do reator UASB para tratamento de efluente de laticínios. Diferente dos outros trabalhos já citados, os autores observaram eficiência de remoção em termos de DQO abaixo de 55%, o que foi considerado insuficiente para reatores UASB. Os autores utilizaram COV na faixa de 0,34 a $1,57 \text{ kgDQOm}^{-3}\text{d}^{-1}$ e variaram o TDH entre 20 e 12h, a melhor eficiência de remoção em termos de DQO (52%) foi observada quando aplicada COV de $0,41 \text{ kgDQOm}^{-3}\text{d}^{-1}$ em TDH de 18h. Os autores alegam que a baixa eficiência do reator UASB nesse projeto foi devido ao substrato utilizado que era rico em óleos e graxas, o que dificultou a granulação e sedimentação da manta de lodo. Os autores ainda relataram que o ponto positivo apresentado pelo sistema foi a sua condição de tamponamento natural, o que diminuiria os custos e ressalvam que unidades de polimento (pós-tratamento) devem ser consideradas para aumentar a eficiência de remoção de matéria orgânica.

Essa versatilidade de aplicabilidade do reator UASB está ligada diretamente no aperfeiçoamento do tratamento anaeróbio de altas cargas orgânicas presente no efluente, (COSTA, 2007). São aconselhados para reatores UASB em escala plena a aplicação de cargas orgânicas volumétricas de até $15 \text{ kgDQOm}^{-3}\text{d}^{-1}$, além disso, as características do efluente devem ser analisadas previamente para uma melhor adequação do sistema (LETTINGA et al., 1980; MOLETTA, 2005; van LIER et al., 2015). No entanto, na literatura existem vários relatos da utilização de cargas orgânicas volumétricas superiores ao recomendado, principalmente em estudos com o objetivo de produção de biogás como fonte energética sustentável.

Rodrigues et al., (2010) utilizaram COV entre 1,1 a 17,5 kgDQOm⁻³d⁻¹ em reator UASB de escala real (11,5 m³) para tratamento de águas residuárias de suinocultura com TDH entre 1,7 a 4,1 dias. Apesar dos autores não especificarem em quais condições foram obtidos os melhores resultados a respeito da eficiência de remoção de matéria orgânica, eles relatam que a média de eficiência do reator UASB foi de 85%. Porém, os autores citam que a adaptação do sistema ocorreu em 15 dias, já que utilizaram inóculo oriundo de lagoa anaeróbia de tratamento de rejeitos suínos. Fernandes e Oliveira (2006) também utilizaram reatores UASB para tratamento de águas residuárias de suinocultura com COVs superiores ao recomendado (0,11 a 34,40 kgDQOm⁻³d⁻¹) com TDH entre 0,75 e 2,25 dias, sendo que as eficiências médias de remoção obtidas variaram de 55 a 90%.

Ferraz Jr. et al. (2016) investigaram o tratamento de vinhaça de cana-de-açúcar em condições termofílicas (55°C). Os autores utilizaram COV entre 15 a 25 kgDQOm⁻³d⁻¹ com TDH que variou entre 56 a 23h. O reator UASB apresentou média de eficiência de remoção de 72%, e para essas condições específicas. Neste trabalho os autores conseguiram demonstrar que a tecnologia do reator UASB pode ser empregada em COVs superiores as recomendadas e obter resultados satisfatórios.

Como já mencionado, o pleno funcionamento de um reator UASB irá depender das características do substrato utilizado, podendo ou não ser aplicado para cargas orgânicas superiores a 15 kgDQOm⁻³d⁻¹. Contudo, o reator UASB, além de atender uma enorme gama de águas residuárias e suportar elevadas cargas orgânicas, ainda apresenta vantagens que justificam a crescente demanda de estudo a respeito da sua utilização.

Dentre as vantagens estão: baixo custo de implantação, operação e manutenção, baixa produção de excesso de lodo e pequena área de construção em comparação a sistemas convencionais aeróbios. Além disso, gera subprodutos como biofertilizante e bioenergia (metano), o que o torna atrativo economicamente para processos agroindustriais e pequenos agropecuaristas (KALOGO e VERSTRAETE, 1999). No entanto, de acordo com van Haandel e Lettinga (1994) o efluente do UASB exige um pós-tratamento para adequar as características de qualidade sanitária, porém, os autores ainda ressaltam que as quantidades dos nutrientes são adequadas, tanto no lodo gerado para utilização em compostagens, como do efluente líquido na fertirrigação.

Em questão de processo biológico de tratamento, o reator UASB apresenta como principais vantagens a capacidade de reter grandes quantidades de biomassa com elevada atividade microbiana e aplicação de baixos tempos de detenção hidráulica (TDH), sendo

recomendado 6h por Chernicharo (2007), mas pelas normas ABNT: NBR 12209:2011 (2011) é recomendado TDH médio de 8h. Tais vantagens estão ligadas às características hidrodinâmicas que favorecem a granulação da biomassa, sendo que esse processo de formação de grânulos possibilita desvincular o tempo de retenção celular do tempo de detenção hidráulica como já citado anteriormente. Neste caso, no reator podem ser aplicadas elevadas concentrações de carga orgânica volumétricas em curtos períodos de tempo com sucesso, dependendo das condições operacionais e das características do afluente (FORESTI, 1994).

Dentre as principais limitações que o reator UASB pode apresentar estão fatores que interferem no processo de granulação da biomassa, como elevadas concentrações de sólidos em suspensão no afluente e salinidade nas águas residuárias, cujas limitações podem prejudicar severamente o processo de digestão anaeróbia (LETTINGA e HULSHOFF POL, 1991).

A aplicação de elevadas concentrações de carga orgânica e elevados TDHs (baixa pressão hidráulica seletiva) podem dificultar a granulação da biomassa, o que favorece a lavagem da biomassa não granular (suspensa) (van LIER, 2015; WIEGANT et al., 1986). A presença de sólidos suspensos voláteis (SSV) no afluente também pode prejudicar o desenvolvimento do lodo granular, sendo que esta limitação causa maior efeito em tratamentos de resíduos sólidos, esterco, lodos e águas residuárias com presença de altas concentrações de sólidos em suspensão, como esgoto sanitário e de suinoculturas (OLIVEIRA, 1997).

1.4.2. Princípios e Aspectos de Funcionamento do Reator UASB

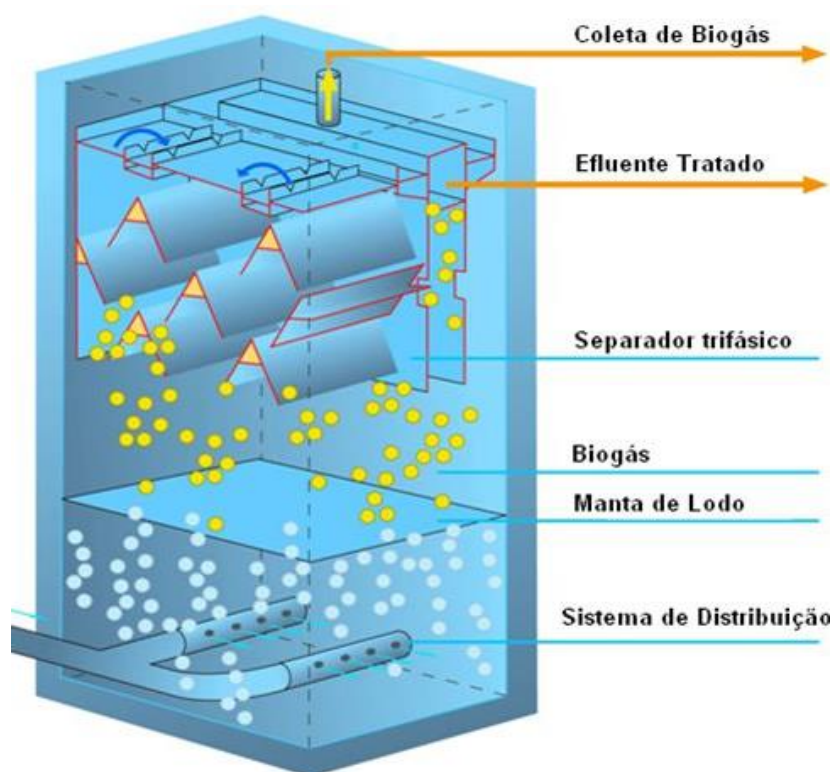
O reator UASB se baseia principalmente por suas características estruturais, possuindo um corpo principal e um secundário, e o fluxo em que a água resíduaria percorre seu interior. O reator apresenta basicamente duas zonas de manta de lodo acomodada no corpo principal do reator. A primeira zona é localizada no fundo do reator e formada por grânulos com elevada capacidade de sedimentação (leito de lodo) e a segunda zona é localizada acima do leito de lodo e se estende até próximo do corpo secundário do reator, sendo um lodo mais disperso e menos denso (manta de lodo) (CHERNICHARO, 2007).

Durante a alimentação do reator, a trajetória do afluente é ascendente, ou seja, o reator UASB é alimentado pela parte inferior (fundo) entrando em contato inicialmente com o lodo

no fundo do reator e depois percorrendo toda a manta de lodo, zonas com elevada atividade microbiana. Nestas zonas ocorrem todos os processos que compreendem a digestão anaeróbia, ocorrendo a estabilização da matéria orgânica, resultando na geração de biogás e no crescimento microbiano. O biogás e o efluente gerado seguem a trajetória ascendente até atingir o topo do reator (CAMPOS, 2004).

O corpo secundário geralmente é denominado de decantador interno, pois favorece a decantação de sólidos em suspensão no efluente arrastados pelo biogás gerado e pelo TDH. Na parte superior do reator, ainda é acomodado o separador trifásico (sólido/liquido/gás) com formato de funil invertido, essa estrutura garante a eficiência da recuperação de biogás, facilita a sedimentação de sólidos em suspensão por forças físicas e permite o escoamento de um efluente de maior qualidade, esse deixa o reator no topo, acima do separador trifásico (CAMPOS, 2004). A configuração descrita pode ser observada na Figura 4.

Figura 4: Esquema de um reator UASB.



Fonte: Hidrosul (2018)

Todas essas características do reator UASB permitem um bom desempenho no tratamento de águas residuárias com elevadas cargas orgânicas e a turbulência natural gerada pelo fluxo ascendente e biogás gerado no interior do reator garantem a mistura do meio,

permitindo um melhor contato entre o afluente (substrato) com a biomassa do reator (HEERTJES e MEER, 1978).

Porém, de acordo com Speece (1996), os micro-organismos envolvidos no processo de digestão anaeróbia são extremamente sensíveis a algumas condições ambientais, principalmente pH, temperatura, compostos tóxicos, dentre outros. Dessa forma, o monitoramento e o controle do processo no início da partida do reator UASB são de extrema importância (von SPERLING, 2006). Campos (1990) relata que o tempo de partida de reatores UASBs pode ser relativamente curto se o inóculo anaeróbio granular disponível estiver adequado e microbiologicamente ativo.

Quando o reator UASB está em plena operação, ou seja, quando as fases acidogênicas e metanogênicas estão em equilíbrio, o principal produto gerado é o metano que pode apresentar concentrações superiores a 60% (SPEECE, 1996). Com a facilidade de recuperação e armazenamento do biogás que reatores do tipo UASB possuem, atualmente, são cada vez mais comuns pesquisas que utilizam essa configuração de reator para produção de bioenergia (metano) gerada a partir de uma diversidade de águas residuárias e condições operacionais.

Ndobeni et al. (2019) utilizaram um reator UASB de 46L para produção de biogás a partir do melaço de cana-de-açúcar. Os autores aplicaram uma média de $4,1 \text{ gO}_2\text{L}^{-1}$ em TDH de 49h, no qual foram obtida vazões em termos de biogás de $1,1 \text{ Ld}^{-1}$ (66 a 71% de CH_4) e eficiência de remoção de matéria orgânica superior a 75%.

Já Hampannavar et al. (2010) e Cruz-Salomón et al. (2017) utilizaram reatores UASB em escala de bancada (máximo de 8 L) para geração de biogás a partir do efluente de agroindústria sucroalcooleira. Neste trabalho foi aplicada carga orgânica máxima de $16 \text{ kgDQOm}^{-3}\text{d}^{-1}$ com TDH entre 48 a 6h, atingindo eficiência de remoção em termos de DQO acima de 90% e produção de biogás acima de $4,0 \text{ Ld}^{-1}$ com concentrações de metano superiores a 80%.

Longo (2015) também utilizou resíduo de agroindústria sucroalcooleira (vinhaça de cana de açúcar) em reator UASB em escala piloto para geração de biogás. O autor variou a concentração de carga orgânica entre 0,7 a $7,0 \text{ kgDQOm}^{-3}\text{d}^{-1}$, atingindo eficiências de remoção superiores a 90%. A maior concentração de metano obtida no biogás (70%) foi com aplicação de carga orgânica entre 1,0 a $5,6 \text{ kgDQOm}^{-3}\text{d}^{-1}$ com produção de $5,0 \text{ m}^3\text{CH}_4\text{m}^{-3}$. No caso quando aplicado ao reator cargas superiores observou-se o aumento da concentração de ácidos orgânicos (AVT) no meio, o que acarretou na queda de eficiência (56%) e diminuição da produção de biogás.

Jiraprasertwong et al. (2019) investigaram a produção de biogás a partir de efluentes de mandioca utilizando um reator UASB. Os autores avaliaram diferentes concentrações de matéria orgânica (5,0 a 18,0 kgDQOm⁻³d⁻¹) e obtiveram níveis de eficiência de remoção superiores a 90%. Foi observada pelos autores a máxima produção de biogás foi atingida quando aplicada carga orgânica de 15,0 kgDQOm⁻³d⁻¹, com produção diária de 110,0 L e concentrações de metano superiores a 80%.

Prado (2007) obteve concentrações de metano bem inferiores aos estudos citados acima, com produção de biogás de 0,545 a de 0,602 m³kg⁻¹DBO₅ e concentrações de metano entre 48,60 a 68,14%. Investigou-se no trabalho a produção de biogás a partir do tratamento de águas residuárias do processamento de café coco em reator UASB com volume útil de 12,54 L e a concentração de carga orgânica aplicada variou de 0,14 a 20,29 kgDQOm⁻³d⁻¹ em TDH entre 69,67 a 8,04h. Os autores relatam que a eficiência de remoção de matéria orgânica no reator UASB variou entre 33 a 93%.

Rosa et al. (2018) avaliaram o potencial de fontes de energia renováveis (biogás e lodo) em uma estação de tratamento de esgoto (ETE) em UASB de escala real. A ETE citada no trabalho atende uma população de 70 mil habitantes e possui 4 reatores UASB com volume útil de 605m³, sendo estes mantidos com mantidos carga orgânica aplicada ao redor de 0,8 kgDBOm⁻³d⁻¹ e TDH médio de 8h. Os autores relataram que durante o monitoramento dos reatores, foi possível verificar que durante o processo era gerado 78 Ls⁻¹ de biogás com concentrações de 78% de metano. O potencial energético foi avaliado e considerado a eficiência de 30% do biogás em termos de poder calorífero, ou seja, a quantidade de energia que pode ser gerada. Com os valores obtidos, de acordo com os autores, seria possível suprir quase 60% da demanda energética das instalações da empresa que administra o saneamento básico da cidade em questão.

Dessa forma, a partir dos dados literários levantados, é possível observar que a utilização de reator UASB para tratamento de águas residuárias e resíduos agroindustriais ainda sem tratamento, visando a recuperação de bioenergia simultaneamente é uma boa alternativa economicamente e ecologicamente para diferentes setores industriais. Como não existem relatos na literatura sobre a utilização do melaço de soja para geração de metano como fonte energética, o presente trabalho traz novos levantamentos a respeito da utilização do reator UASB e do seu comportamento em relação à eficiência de geração de energia sustentável.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que a manutenção de alta eficiência de remoção de compostos orgânicos e produção de biogás, no reator UASB, alimentado com melaço de soja, dependeram do controle da variação de cargas orgânicas aplicadas.

Teve-se TDH de 24h como ótimo para as condições operacionais, sendo que a redução dessa variável acarretou em sólidos em suspensão e perda de biomassa devido à velocidade ascensional e compostos presentes no substrato que se aderiram nos grânulos.

Com o acréscimo dos valores de carga aplicada até COV máxima de 7,8 kgDQOm⁻³dia⁻¹ foi realizado com base no monitoramento do reator por meio da relação entre os parâmetros: eficiência de remoção de DQO, SST, SSV, AB, AVT e qualidade do biogás. Com isso, foi verificado que a produção de biogás aumentou significativamente (24,0 Ld⁻¹) quando aplicada elevadas concentrações de melaço de soja, melhorando também sua qualidade (teor de metano superior a 70%).

A utilização de alcalinizante no meio de alimentação demonstrou-se indispensável quando utilizado reator UASB alimentado com melaço de soja, o que garantiu a estabilidade do sistema ao longo do experimento.

O equipamento de medição de biogás de baixo custo (cerca de 150,00), desenvolvido ao longo do experimento se demonstrou um equipamento eficiente quando em pleno funcionamento.

Dessa forma, o melaço de soja demonstrou ser um resíduo agroindustrial com potencial para produção de CH₄ de boa qualidade em reator UASB.

REFERÊNCIAS

- ABIOGAS (Associação Brasileira de Biogás e de Biometano). **Renovabio**. Disponível em: <<https://www.abiogas.org.br/renovabio>>. Acesso em: 23 de Janeiro de 2019.
- ABUDI, Z. N. et al. Batch anaerobic co-digestion of OFMSW (organic fraction of municipal solid waste), TWAS (thickened waste activated sludge) and RS (rice straw): Influence of TWAS and RS pretreatment and mixing ratio. **Energy**. v 107. p 131 – 140. 2016.
- ADORNO, M.A.T. et al. Development and validation of a method (GC/TCD) to determine N₂, CH₄, CO₂ e H₂S in biogás. **XI Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia, Havana/Cuba**. 2014.
- ANDERSON, J.J.B. et al. Effects of phytoestrogens on tissues. **Nutrition Reviews**. v 12. p 75-116. 1999.
- ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). **RenovaBio**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/renovabio>>. Acesso em: 23 de Janeiro de 2019.
- APHA; AWWA; WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. **American Public Health Association, Washington**. 21 ed. 2005.
- ARDUINO. **Placas Arduino**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acessado em: 30 de Agosto de 2018.
- BARNES, S. KIM, H. XU, J. Soy in the prevention and treatment of chronic diseases. **In: Anais Congresso Brasileiro de Soja, Londrina, EMBRAPA-SPI**. p 295-308. 1999.
- BAU, H.M. VILLAUME, C.H. MÉJEAN, L. Effects of soybean (Glycine max) germination on biologically active components, nutritional values of seeds, and biological characteristics in rats. **Nahrung**. v 44. p 2-6. 2000.
- BORZACCONI, L. LÓPEZ, I. VIÑAS, M. Application of anaerobic digestion to the treatment of agroindustrial effluents in Latin America. **Water Science Technology**. v 32. p 105-111. 1995.
- BUSWELL, A.M. SOLLO, F.W. The Mechanism of the Methane Fermentation. **Journal of the American Chemical Society**. v 70. n 5. p 1778–1780. 1948.

BUUREN, J.C.L. Anaerobic wastewater treatment in developing countries: a sustainable core technology. In: **workshop on sustainable municipal wastewater treatment systems, Leusden**. 1996.

CALDEIRÃO, L. et al. Avaliação do Desenvolvimento de Bactérias Lácticas em Melaço de Soja. **V Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia, Londrina**. v 55. n 43. p 369–369. 2015.

CAMPOS, C.M.M. et al. Avaliação da eficiência do reator UASB tratando efluente de laticínio sob diferentes cargas orgânicas. **Ciência e Agrotecnologia**. v 28. n 6. p 1376–1384. 2010.

CAMPOS, C.M.M. **Physical aspects affecting granulations in UASB reactors**. Thesis (PhD) - University of Newcastle upon Tyne, Newcastle. 1990.

CAMPOS, C.M.M.; SALÉH, B.B.; CARMO, F.R. do. Determinação de parâmetros cinéticos utilizando reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) em escala laboratorial para remoção da carga orgânica de efluentes de suinocultura. **Ciência e Agrotecnologia**. v 29. n 5. p 1045-1051. 2004.

CHENG C. et al. Polymalic acid fermentation by *Aureobasidium pullulans* for malic acid production from soybean hull and soy molasses: Fermentation kinetics and economic analysis. **Bioresource Technology**. v 23. p 166–174. 2017.

CHENG, C. et al. Polymalic acid fermentation by *Aureobasidium pullulans* for malic acid production from soybean hull and soy molasses: Fermentation kinetics and economic analysis. **Bioresource Technology**. v 223. p 166–174. 2017.

CHERNICHARO, C.A.L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios. 2 ed. **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG**. Belo Horizonte . 1997.

CHERNICHARO, C.A.L. Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. **Belo Horizonte: Politécnica**. p 379. 2007.

CHERNICHARO, C.A.L. et al. UASB: Informação para formação Coletânea de Notas Técnicas. **Revista DAE - SABESP**. v 66. 2014.

COSTA, C.C. **Avaliação de sistema anaeróbio (RAC-UASB) no tratamento de água residuária de suinocultura e aplicação via fertirrigação, em feijão vagem cultivado em**

ambiente protegido. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2007.

COURAS, C.S. et al. Effects of operational shocks on key microbial populations for biogas production in UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) reactors. **Energy**. v 7. p 866–874. 2014.

CRUZ-SALOMÓN, A. et al. Biogas production from a native beverage vinasse using a modified UASB bioreactor. **Fuel**. v 198. p 170–174. 2017.

DILLALO, R. ALBERTSON, O.E. Volatile Acids by Direct Tritation. **Journal WPCF**. v 33. p 356-365. 1961.

ELEFSINIOTIS, D.G. WAREHAM, M.O. Effect of a starch rich industrial wastewater on the acid phase anaerobic digestion process. **Water Environ. Res**. v 77. p 366–371. 2005.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **A Soja**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/historia>>. Acesso em: 23 de Janeiro de 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa de Energia. **Biogás**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt>>. Acessado em: 30 de Agosto de 2018.

ERSAHIN M.E. et al. Anaerobic treatment of industrial effluents: an overview of applications. In: Einschlag FSG (ed) Waste water-treatment and reutilization. **InTech**. p 415–456. 2011.

EVANS, A. et al. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v 14. p 1419 – 1427. 2010.

FALK, H.M. **Monitoring the anaerobic digestion process**. Tese (Doctor of Philosophy in Biochemical Engineering) – Jacobs University. Bremen. 2011.

FAO/OECD. OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025. **OECD Publishing, Paris**. 2016.

FERNANDES, G.F.R.; OLIVEIRA, R.A. de. Desempenho de processo anaeróbico em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Agrícola**. v 26. n 1. p 243-256. 2006.

FERRAZ Jr, D.N. et al. Thermophilic anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse. **Renewable Energy**. v 89. p 245–252. 2016.

FERREIRA, P. Pioneirismo mundial troca resíduos de soja por soluções. **Inovação em Pauta**. v 3. p 41-43. 2008.

FIESP. Safra Mundial de Soja 2017/18 – 11º Levantamento do USDA. **Informativo DEAGRO**. Março de 2018.

FORESTI, E. Utilização de lodo anaeróbico como fonte de externa de carbono no processo de desnitrificação de águas residuárias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande**. v 3. n 1. p 69-73. 1994.

FUESS, L.T. **Biodigestão anaeróbia termofílica de vinhaça em sistemas combinados do tipo acidogênico-metanogênico Para potencialização da recuperação de bioenergia em Biorrefinarias de cana-de-açúcar de primeira geração**. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2017.

GARCILASSO, V.P. FERRAZ Jr, D.N. Considerações Gerais – Produção e Uso do Biogás. In: COELHO, S.T. et al. Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano: Part. I Biogás. **Serie RCGI/USP/SYNERGIA – Gases Combustíveis e Sustentabilidade**. cap 7. p 79. 2018.

GUEDES, A.R. **Determinação e Análise de Propriedades Termofísicas do Melaço de Soja**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná, Londrina. 2015.

GUIMARÃES, V.M. **Purificação e caracterização de α -galactosidases de sementes de soja em germinação e seu uso para hidrólise de oligossacarídeos**. Tese (D.S.) – Universidade de Brasília. 2001.

HAMPANNAVAR, U.; SHIVAYOGIMATH, C. Anaerobic treatment of sugar industry wastewater by Upflow anaerobic sludge blanket reactor at ambient temperature. **International Journal of Environmental Sciences**. v 1. n 4. p 631–639. 2010.

HARPER, S.R., POHLAND, F.G. Recent development in hydrogen management during anaerobic biological wastewater treatment. **Biotechnology and Bioengineering**. v 23. p 585-562. 1986.

HEERTJES, P.M. MEER, R.R. van der. Dynamics of liquid flow in an up-flow reactor used for anaerobic treatment of wastewater. **Biotechnology and Bioengineering, New York**. v 20.

n 10. p 1577-1594. 1978.

HIDROSUL. **Reator UASB**. Disponível em: <http://hidrosul.medialinesistemas.com.br/produto/reator-uasb>. Acessado em: 30 de Agosto. 2018.

HOFMANN, A.M.S. **Experimentos, modelagem, simulação e controle de uma operação contínua de secagem e resfriamento de soja (Glycine max) extrusada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. 2012.

HULSHOFF Pol, L.W. et al. Anaerobic treatment of sulphate-rich wastewaters. **Biodegradation**. v 9. p 213–224. 1997.

IMCOPA (Importação Exportação e Indústria de Óleos Ltda). **Texto sobre a soja**. Disponível em: <<http://www.imcopa.com.br/index.php>>. Acesso em: 24 de Março de 2017.

JEONG, C. et al. Generating efficiency and emissions of a spark-ignition gas engine generator fuelled with biogas–hydrogen blends. **Int. J. Hydrogen Energy**. v 34. p 9620–9627. 2009.

JIRAPRASERTWONG, A.; MAITRIWONG, K.; CHAVADEJ, S. Production of biogas from cassava wastewater using a three-stage upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. **Renewable Energy**. v 130. p 191–205. 2019.

JOHNSON, L.A. MYERS, D.J. BURDEN, D.J. Soy protein's history, prospectis in food. **Feed. Inform**. v 3. p 429-444. 1992.

KALOGO, Y. VERSTRAETE, W. Development of anaerobic sludge bed (ASB) reactor technology for domestic wastewater treatment: motives and perspectives. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**. v 15. n 5. p 523-534. 1999.

KAMDEM, L. TOMEKPE, K. THONART, P. Production potentielle de bioéthanol, de biométhane et de pellets a' partir des de'chets de biomasse lignocellulosique du bananier (Musa spp.) au Cameroun. **Biotechnol Agron Soc Environ**. v 3. p 461–73. 2011.

KHANAL, S.K. Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications, **Blackwell Publishing**. 1 ed. 2008.

LETTI, L.A.J. et al . Ethanol production from soybean molasses by *Zymomonas mobilis*. **Biomass and Bioenergy**. v. 44. p 80-86. 2012.

- LETTINGA, G. HULSHOFF POL, L.W. UASB Process design for various types of wastewaters. **Water Science and Technology**. v 24. p 87-107. 1991.
- LETTINGA, G. Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. **Antonie Van Leeuwenhoek, Amsterdam**. v 67. n 1. p 3-28. 1996.
- LETTINGA, G. et al. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. **Biotechnology and Bioengineering**. v 22. n 4. p. 699–734. 1980.
- LETTINGA, G. REBAC, S. ZEEMAN, G. Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. **TRENDS in Biotechnology**. v 9. p 363–370. 2001.
- LI, J. et al. Performance and granulation in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor treating saline sulfate wastewater. **Biodegradation**. v 25. p 127 – 136. 2014.
- LIU, K. Soybeans – Chemistry, technology and utilization. **Chapman e Hall**. p 532. 1997.
- LIU, Y. ZHANG, Y. NI, B. Zero valent iron simultaneously enhances methane production and sulfate reduction in anaerobic granular sludge reactors. **Water Research**. v 75. p 292 – 300. 2015.
- LOBATO, L.C.S. et al. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 3: Gerenciamento de lodo e espuma. **Revista DAE – edição especial**. v 66. n 214. p 30-55. 2018.
- LOMAN, A.A. JU, L.K. Soybean carbohydrate as fermentation feedstock for production of biofuels and value-added chemicals. **Process Biochemistry**. v 51, n 8. p 1046–1057. 2016.
- LONGO, R.R. **Geração de metano em reator UASB: Avaliação de parâmetros de monitoramento para controle do processo de tratamento anaeróbio de vinhaça**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Carlos, São Carlos. 2015.
- MACHADO, R.P. **Produção do etanol a partir do melão de soja**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1999.
- MONTAVANI, D. **Estudo da recuperação e hidrólise de isoflavonas e carboidratos obtidos a partir do melão de soja**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013.

- MAPA (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento). Projeções do agronegócio: Brasil 2014/15 a 2024/25. **Projeções de Longo Prazo, Brasília**. 6 ed. 2015.
- MCCARTY, P. L. SMITH, D. P. Anaerobic wastewater treatment. **Environ. Sci. Technol.** v 20. p 1200–1206. 1986.
- METCALF & EDDY. Wastewater engineering treatment, disposal and reuse. **New York: McGraw Hill**. 5 ed. 2014.
- METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. **McGraw Hill**. 4 ed. 2003.
- MISSÃO, M.R. Soja: Origem, classificação, utilização e uma visão abrangente do mercado. **Maringá Management: Revista de Ciências Empresariais**. v 3. n 1. p 7-15. 2006.
- MOLETTA, R. Winery and distillery wastewater treatment by anaerobic digestion. **Water Sci. Technol.** v 1. p 137–144. 2005.
- MONTELONGO, J.L. CHASSY, B.M. MCCORD, J.D. Lactobacillus salivarius for Conversion of Soy Molasses into Lactic Acid. **Journal of Food Science**, v. 58, n. 4, p. 863–866. 1993.
- MORAES, B.S. ZAIAT, M. BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: challenges and perspectives. **Renew. Sustain. Energy Rev.** v 44. p 888–903. 2015.
- MORAES, B.S. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: profit or expense? **Appl. Energy**. v 113. p 825–835. 2014.
- MORAIS, W.G. et al. Optimization of the production and characterization of lipase from *Candida rugosa* and *Geotrichum candidum* in soybean molasses by submerged fermentation. **Protein Expression and Purification**. v 123. p. 26–34. 2016.
- MOREIRA, F.S. Evaluation of Hydrogen Production Applying Soy Molasses by Pure Culture. **IV Simpósio de Tecnologia Sucroenergética e de Biocombustíveis**. p 59–64. 2016.

- NDOBENI, A. OYEKOLA, O. WELZ, P.J. Organic removal rates and biogas production of an upflow anaerobic sludge blanket reactor treating sugarcane molasses. **South African Journal of Chemical Engineering**. v 28. p 1–7. 2019.
- NETO, J.G. et al. Quantificação de biogás em reatores anaeróbios através do método de deslocamento de volume de água. **REA – Revista de estudos ambientais**. v 16. n 1. p 45–53. 2014.
- NOGUEIRA, C.E.C. et al. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. **Renew. Sustain. Energy Rev.** v 48. p 300–305. 2015.
- OBENDORF, R.L. KOSINA, S.M. Soluble Carbohydrates in Soybean. T.-B. Ng (Ed.). Soybean – Biochemistry, Chemistry and Physiology. **InTech**. p 201 – 228. 2011.
- OLIVEIRA, C.R. de. Cultivo em ambiente protegido. **Campinas: CATI**. v 31 p 232. 1997.
- ONU (Organização das Nações Unidas). Rio +20 o futuro que queremos. **Departamento de Informação Pública das Nações Unidas, Rio de Janeiro**. 2012.
- PANT, D. ADHOLEYA, A. Biological approaches for treatment of distillery wastewater: a review. **Bioresource Technology**. v 12. p 2321–34. 2007.
- PEREIRA-RAMIREZ, O. et al. Influência da recirculação e da alcalinidade no desempenho de um reator UASB no tratamento de efluente de suinocultura. **Revista Brasileira de Agrociência**. v 10. n 1. p 103–110. 2004.
- PRADO, M.A.C. **Produção de biogás no tratamento dos efluentes líquidos de Coffea arábica L. em reator UASB para o potencial aproveitamento na secagem do café**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2007.
- PRICE, K.R. et al. Flatulence-causes, relation to diet and remedies. **Nahrung**. v 32. p 609-626. 1988.
- QURESHI, N.; LOLAS, A.; BLASCHEK, H.P. Soy molasses as fermentation substrate for production of butanol using *Clostridium beijerinckii* BA 101. **J. Ind. Microbiol. Biotechnol.** v 26. p 290-295. 2001.

- RIPLEY, L.E. BOYLE, W.C. CONVERSE, J.C. Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of High-Strength Wastes. **Journal WPCF**. v 58. p 406-411. 1986.
- RITTMANN, B.E. McCARTY, P.L. Biotecnología del medio ambiente: principios y aplicaciones. **Madrid: McGraw Hill**. 2001.
- RODRIGUES, L.S. et al. Avaliação de desempenho de reator UASB no tratamento de águas residuárias de suinocultura 1 Evaluation of performance of UASB reactor in swine wastewater treatment. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 35, p. 94–100. 2010.
- ROMÃO, B.B. **Produção De Etanol Por Hidrólise Ácida De Melaço De Soja**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2012.
- ROSA, A.P. et al. Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale UASB-based treatment plant. **Renewable Energy**, v. 124, p. 21–26, 2018.
- ROSA, A.V. Fundamentals of renewable energy processes. **Elsevier Academic**. 2 ed. 2009.
- SALOMON, K.R. et al. Cost calculations for biogas from vinasse biodigestion and its energy utilization. **Sugar Ind.** v 4. p 217–223. 2011.
- SANNI, A.I. ONILUDE, A. A. OGUNDOYE, O. R. Effect of bacterial galactosidase treatment on the nutritional status of soybean seeds and its milk derivative. **Nahrung**. v 41. p 18-21. 1997.
- SANTOS, E.M.A. et al. Reator anaeróbio tipo UASB conjugado com processo Fenton para remoção de cor e demanda química de oxigênio de água residuária sintética de indústria têxtil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 285–292, 2016.
- SARTI, A. et al. Influence of the liquid-phase mass transfer on the performance of a packed-bed bioreactor for wastewater treatment. **Bioresource Technology**. v 3. p 231 – 238. 2001.
- SILVA, C.R. **Remoção de galactooligossacarídeos em melaço de soja para obtenção de produtos de interesse industrial**. Tese (Doctor Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa. 2010.
- SILVA, F.B. **Produção de Etanol a partir de Melaço De Soja Hidrolisado Enzimaticamente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2011.

- SIQUEIRA, P.F. et al. Production of bio-ethanol from soybean molasses by *Saccharomyces cerevisiae* at laboratory, pilot and industrial scales. **Bioresource Technology**. v 99. p 8156 – 8163. 2008.
- SNYDER, H.E. KWON, T.W. Soybean utilization. **AVI Book, New York**. p 346. 1987.
- SOUZA, M. FUZARO, G. POLEGATO, A. Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. **Water Sci Technol**. v 25. p 213–22. 1992.
- SPEECE, R.E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. **Archae Press, Nashville, Tennessee, EUA**. p 394. 1996.
- SUAREZ, F.L. et al. Gas production in humans ingesting a soybean flour derived from beans naturally low in oligosaccharides. **American Journal of Clinical Nutrition**. v 69. p 135-139. 1999.
- TCHOBANOGLIOUS, G. BURTON, F.L. STENSEL, H.D. Wastewater engineering: treatment and reuse. **Metcalf & Eddy**. 2003.
- THAUER, R.K. JUNGERMANN, K. DECKER, K. Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteria. **Bacteriol. Rev**. v 1. p 100–180.1977.
- UELLENDAHL, H. AHRING, B.K. Anaerobic Digestion as Final Step of a Cellulosic Ethanol Biorefinery: Biogas Production from Fermentation Effluentina UASB Reactor Pilot Scale Results. **Biotechnology and Bioengineering**. v 107. n 1. 2010.
- Van HAANDEL, A.C. LETTINGA, G. Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate. **Chichester: Wiley**. 1994.
- van LIER, J.B. et al. Advances in high-rate anaerobic treatment: staging of reactor systems. **Water Sci Technol**. v 8. p 15–25. 2001.
- Van LIER, J.B. et al. Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**. v 14. n 4. p 681–702. 2015.
- van LIER, J.B. MAHMOUD, N. ZEEMAN, G. Anaerobic biological wastewater treatment. In: Henze M, van Loosdrecht MCM, Ekama GA, Brdjamovic D (eds) Biological wastewater treatment: principles, modeling and design. **IWA Publishing, London**. 2008.

von SPERLING, M.. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental**. p 243. 2006.

WANG, Q. et al. Degradation of volatile fatty acids in highly efficient anaerobic digestion. **Biomass and Bioenergy**. v 16. n 6. p 407–416. 1999.

WIEGANT, W.M. HENNINK, M. LETTINGA, G. Separation of the propionate degradation to improve the efficiency of thermophilic anaerobic treatment of acidified wastewaters. **Water Res.** v 20. p 517–524. 1986.

WILKIE, A.C. Biomethane from biomass, biowaste and biofuels. In: Wall, J. D. Harwood, C. S. Demain, A. **Bioenergy**. p 195-205. 2008.

WILKIE, A.C. RIEDESEL, K.J. OWENS, J.M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**. v 19. p 63-102. 2000.

YANG, H. et al. Propionic acid production from soy molasses by *Propionibacterium acidipropionici*: Fermentation kinetics and economic analysis. **Bioresource Technology**. v 250. p 1–9. 2018.

YANG, S.T. YU, M. Integrated biorefinery for sustainable production of fuels, chemicals and polymers. El-Enshasy, H. A. Thongchul N. **Bioprocessing Technologies in Biorefinery for Sustainable Production of Fuels, Chemicals and Polymers**. p 1–26. 2013.