

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 17/02/2021.

BRUNA SAMPAIO DE MELLO

Viabilidade do uso do melaço de soja como substrato para a digestão anaeróbia/aeróbia em reator compartimentado

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

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Sarti

Araraquara
2020

FICHA CATALOGRÁFICA

M527v Mello, Bruna Sampaio de
Viabilidade do uso de melaço de soja como substrato
para a digestão anaeróbia/ aeróbia em reator
compartimentado / Bruna Sampaio de Mello. –
Arararaquara : [s.n.], 2020
111 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Química
Orientador: Arnaldo Sarti

1. Digestão anaeróbia. 2. Soja. 3. Biorreatores.
4. Resíduos orgânicos. 5. Biogás. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

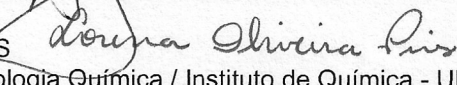
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "Viabilidade do uso do melão de soja como substrato para a digestão anaeróbia/aeróbia em reator compartimentado"

AUTORA: BRUNA SAMPAIO DE MELLO

ORIENTADOR: ARNALDO SARTI

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


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


Prof.^a Dr.^a LORENA OLIVEIRA PIRES
Departamento de Bioquímica e Tecnologia Química / Instituto de Química - UNESP - Araraquara


Prof. Dr. RONAN CLEBER CONTRERA
Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental / Universidade de São Paulo - USP - São Paulo

Araraquara, 17 de fevereiro de 2020

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO

Nome: Bruna Sampaio de Mello

Nome em citações bibliográficas: Mello, B.S. Mello, B.

ENDEREÇO PROFISSIONAL: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP Campus de Araraquara, Instituto de Química de Araraquara: Rua Prof. Francisco Degni, n. 55, Bairro Quitandinha, CEP: 14800-060 Araraquara/ SP Brasil.

FORMAÇÃO ACADÊMICA/TITULAÇÃO

2018-2020: Mestrado em Química

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP Araraquara, Brasil.

Título: Viabilidade do uso do melão de soja como substrato para a digestão anaeróbia/aeróbia em reator compartimentado

Orientador: Arnaldo Sarti

Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN/IQA)

Grande Área: Química

Área: Bioenergia.

2008 – 2012: Graduação em Engenharia Química

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

Título: Nature Paper – Produção de Papel Sintético

Orientador: Pedro Arroyo.

Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

FORMAÇÃO COMPLEMENTAR

2016 – 2018: Especialização em Auditoria e Perícia Ambiental

Universidade Estácio de Sá, Rio de Janeiro, Brasil.

Título: Programa de Coleta Seletiva no município de Penápolis – SP

Orientador: Edgard Joseph Kiriyaama

2013 – 2015: Especialização em Gestão Empreendedora

Centro Universitário Senac, São Paulo, Brasil.

Título: Brasil Papel – O papel do futuro.

Orientadora: Cintia Akiko Assato

2011-2012 - Iniciação Científica

Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Título: Imobilização do *Bacillus Firmus* cepa 37 para a produção da enzima CGTase.

Orientador: Prof. Flávio Faria de Moraes.

IDIOMAS:

Inglês em nível avançado (escrita, leitura e conversação).

Espanhol em nível básico.

PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Capítulos de livro:

Grangeiro, Luana Cardoso, Sâmilla Gabriella Coêlho de Almeida, **Bruna Sampaio de Mello**, Lucas Tadeu Fuess, Arnaldo Sarti, and Kelly J. Dussán. “New trends in biogas production and utilization.” In *Sustainable Bioenergy*, pp. 199-223. Elsevier, 2019.

Trabalhos publicados em anais de eventos (resumos expandidos)

1. Rodrigues, B. C. G.; **Mello, B. S.**; Araujo, M. L. G. C.; Silva, G. H. R.; Sarti, A. Biological treatment of soybean molasses in two different low-cost reactors. 16TH IWA WORLD CONFERENCE ON ANAEROBIC DIGESTION. Ghent – Belgium. 2019.
2. **Mello, B.**; Batista, F.; Rodrigues, B.; Medina, K.; Sarti, A. Low cost disposal of soybean molasses using anaerobic treatment. 27TH EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE AND EXHIBITION. Lisbon – Portugal. 2019.
3. Silva, L.; Batista, F.; Rodrigues, B.; **Mello, B.**; Sarti, A. Anaerobic Co-Digestion of Soybean Molasses and Glycerol in HAIS reactor. 27TH EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE AND EXHIBITION. Lisbon – Portugal. 2019.
4. Rodrigues, B. C. G. ; Araujo, M. L. ; **Mello, B. S.** ; Sarti, Arnaldo . Uso de Reator UASB para Geração de Biogás e Tratamento de Subproduto Gerado na Produção de Proteína Concentrada de Soja (melaço de soja) de Soja d. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES 2019), 2019, Natal - RN. XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES 2019), 2019.
5. Sarti, Arnaldo; Rodrigues, B. C. G. ; Costa, M. A. M. ; **Mello, B. S.** ; Oliveira, S. C. . Tratamento Biológico de D-Limoneno em Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo (RAHLF) - Estudo Experimental e Modelagem Matemática. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2019, Natal - RN. XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019.
6. **Mello, B. S.** ; Batista, F. K. ; Rodrigues, B. C. G. ; Sarti, Arnaldo . Tratamento Biológico de Subproduto Gerado na Produção de Proteína Concentrada de Soja (melaço de soja) em Reator Compartimentado Anaeróbio/Aeróbio (RCCA). In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES 2019), 2019, Natal - RN. XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES 2019), 2019.

Dedico este trabalho ao meu companheiro de aventuras, que há dez anos escolhi para minha vida. Gabriel, juntos somos os melhores de nós mesmos.

AGRADECIMENTOS

Ao Gabriel, que incrivelmente se tornou meu marido durante essa jornada, por sempre estar ao meu lado e me apoiar em todas as decisões, por mais malucas que possam parecer.

Aos meus pais Eduardo e Glauciane pela educação, honestidade e respeito que me ensinaram ao longo da minha vida, mas principalmente por entender que a vida é cheia de escolhas, e devemos escolher o que nos deixa feliz.

Ao meu irmão Filipe, por ser meu grande amigo desde sempre, a quem eu posso recorrer para reclamar da vida, discutir e brigar sem nenhum receio.

Aos meus sogros Edna e Marcos, por me abrigarem em sua casa e em sua família, por todo suporte, entendimento e colaboração.

Ao meu orientador prof. Arnaldo, que está me ensinando muito mais do que eu poderia imaginar, que não mede esforços para fazer as coisas acontecerem, que além de ser um excelente professor, é companheiro, incentivador e amigo.

Aos meus amigos de laboratório:

Brenda, meu grande grupo de pesquisa, que sem o apoio, conselhos e ajuda, com certeza, eu não iria conseguir terminar este trabalho.

Guilherme, um grande amigo, que sempre me escutou, ajudou e deu dicas valiosas, em qualquer assunto.

Amanda, por sempre me escutar, me animar, e me guiar nesse mundo da pós graduação.

Aos colegas que passaram por minha vida durante esses dois anos de muita aprendizagem, que contribuíram de forma significante, como o Felipe, o IC mais esquecido, porém prestativo, a prof. Kelly pela paciência em ajudar com as análises no HPLC, Luana por todo material que me passou, prof. Maria Angélica e prof. Lorena por me permitirem acompanhar as suas aulas, Gabriel por me emprestar tantas coisas do laboratório da engenharia.

Ao Laboratório de Processos Biológicos (LPB) da Universidade de São Paulo (USP – São Carlos) e ao Departamento de Engenharia Rural da Universidade Estadual Paulista (UNESP – Jaboticabal) por me ajudarem com as análises de cromatografia.

Ao Instituto de Pesquisas em Bioenergia (IPBEN).

Ao Instituto de Química, UNESP.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro durante o desenvolvimento da pesquisa.

“Toda transformação no mundo começa pela transformação das consciências.”

RESUMO

A soja é o maior produto de exportação do Brasil. Dentre os diversos produtos e subprodutos da cadeia da soja, o melaço de soja, obtido como subproduto da produção de proteína concentrada de soja, ainda não possui um processo consolidado de reaproveitamento e disposição final. Neste estudo, o objetivo principal foi avaliar o potencial do tratamento biológico do melaço de soja a partir da digestão em um reator compartimentado anaeróbio/aeróbio (RCAA) e a produção de biogás para aproveitamento energético. Para esta finalidade foi utilizado reator compartimentado composto de três câmaras anaeróbias e uma câmara aeróbia, sendo esta última para o polimento final do tratamento. O trabalho foi dividido em 2 etapas, nas quais foram testadas diferentes cargas orgânicas volumétricas (0,3 até 3,9 kgDQO m⁻³ d⁻¹), cada etapa dividida em fases nas quais variou-se o tempo de detenção hidráulica (48 e 36 horas) e concentração de matéria orgânica (800 mgO₂ L⁻¹ a 6000 mgO₂ L⁻¹). Na etapa I avaliou-se o desempenho do RCAA sem a recirculação do efluente tratado e os resultados obtidos mostram que o reator possui elevada capacidade de tratamento do melaço, com elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica, acima de 90%. A concentração de matéria orgânica do efluente final variou entre 34,4 ± 33,1 mgO₂ L⁻¹, para a fase 1, até 763,8 ± 707,9 mgO₂ L⁻¹, para a fase 6. Já na etapa II, foi aplicada a recirculação do efluente tratado anteriormente à entrada da segunda câmara do reator, a fim de avaliar o comportamento do sistema sem utilização de um meio alcalinizante no meio de alimentação. Resultados satisfatórios foram obtidos, com eficiências médias de remoção de 74,2% para a fase 1 até o máximo de 92,2% na fase 3. A produção de biogás foi calculada teoricamente, no qual a concentração de metano média foi acima de 80%. A utilização desse tipo de reator mostra-se eficaz para a solução de um problema para destinação efetiva e sustentável do melaço de soja.

Palavras chave: Reator compartimentado anaeróbio/ aeróbio; Melaço de soja; processos combinados anaeróbio e aeróbio; separação de fases; biogás.

ABSTRACT

Brazil soybean production generates a great number of by-products without an effective commercial value or sustainable destination. In this context, the main objective of this work was to evaluate the potential use of an anaerobic/aerobic baffled reactor (AABR) with an aerobic chamber (AC) in the biogas generation and treatment of soybean molasses which is a by-product derived from concentrated soybean protein processing industry. The entire bench scale AABR reactor consisted of three anaerobic chambers, one aerobic chamber and one settling tank. The reactor was fed with soybean molasses as substrate (103 days) for several operating conditions ($0.43 \text{ kgCOD m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ at $3.86 \text{ kgCOD m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) in which the substrate concentration was gradually increased (800 to $6,000 \text{ mg COD L}^{-1}$) and the hydraulic detention time (TDH) was maintained at 48 h and 36 h . The anaerobic system showed an excellent average efficiency in COD removal (total and filtered) as high as 91% . The mean concentration of $\text{COD}_{\text{Total}}$ and $\text{COD}_{\text{Filtered}}$ in effluent varied between 34.4 mg L^{-1} to 763.8 mg L^{-1} and 29.1 mg L^{-1} to 540.3 mg L^{-1} , respectively, after the aerobic chamber (phases 1 to 6). Considering the entire system (anaerobic + aerobic), the average value of COD removal efficiency was as high as 95.4% . No accumulation of volatile fatty acids (VFA) was found, as the VFA concentration remained between 30.6 and $226.4 \text{ mgHac L}^{-1}$ in the final effluent. The results show that AABR has great potential for a sustainable destination of soybean molasses.

Keywords: Anaerobic/Aerobic baffled reactor; Soybean molasses; combined anaerobic–aerobic process; phase separation; biogas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Destino da soja brasileira (em milhões de toneladas).....	18
Figura 2. Fluxograma simplificado da produção dos principais produtos (amarelo) e subprodutos (verde) da soja.....	20
Figura 3. Balanço de massa simplificado do processo de produção de melão de soja.....	22
Figura 4. Esquema do aparato experimental do RCA desenvolvido originalmente.....	29
Figura 5. Reator compartimento anaeróbio em sua configuração adaptada.....	29
Figura 6. Representação esquemática do aparato experimental.....	43
Figura 7. Vista geral do RCAA em funcionamento.....	44
Figura 8. Representação esquemática (a) e foto (b) do medidor de biogás em tubo de vidro em "U" conectado a placa Arduino.....	46
Figura 9. Carga orgânica volumétrica (COV) aplicada e eficiência de remoção de DQO_T do RCAA durante as fases de operação.....	54
Figura 10. Valores médios de DQO_T obtidos durante as 6 fases de operação.....	57
Figura 11. Variação temporal da concentração de SST e SSV no afluente e efluente final durante as fases da etapa I.....	58
Figura 12. Valores de AB do afluente e efluente final em todas as fases durante a etapa I.....	62
Figura 13. Valores médios de AB do afluente e efluente das câmaras durante as fases de operação da etapa I.....	63
Figura 14. Valores de AVT do afluente e efluente final nas fases de operação da etapa I.....	64
Figura 15. Valores médios de AVT do afluente e efluente das câmaras durante as fases de operação da etapa I.....	65
Figura 16. Perfis de ácidos orgânicos no afluente e do efluente das câmaras C1 e C2 durante as fases 1 (a), 3 (b), 4 (c) e 5(d) da etapa I do experimento.....	68
Figura 17. Valores diários de eficiência de remoção obtidos durante a fase 6 da etapa I para o RCAA.....	70
Figura 18. Carga orgânica volumétrica (COV) aplicada e eficiência de remoção de DQO_T do RCAA durante as fases de operação da etapa II.....	73
Figura 19. Valores médios de DQO_T obtidos para as câmaras do reator durante as 7 fases de operação da etapa II.....	77
Figura 20. Variação temporal da concentração de SST e SSV no afluente e efluente final durante as 7 fases da etapa II.....	78
Figura 21. Valores de AB do afluente e efluente final em todas as fases durante o período de operação da etapa II.....	81
Figura 22. Valores médios de AB do afluente e efluentes de câmaras durante as fases de operação da etapa II.....	82
Figura 23. Valores de AVT do afluente e efluente final em todas as fases durante o período de operação da etapa II.....	83
Figura 24. Valores médios de AVT do afluente e efluentes de câmaras durante as fases de operação durante a etapa II.....	84
Figura 25. Perfis de ácidos orgânicos no afluente e dos efluentes das câmaras do reator durante as fases 2 (a), 3 (b), 4 (c), 5 (d), 6 (e) e 7 (f) da etapa II do experimento.....	86
Figura 26. Curvas DTR para os ensaios com biomassa de 48h (a) e 36h (d), sem biomassa de 48h (b) e 36 h (e) e com reciclo de 48h (c) e 36 h (f).....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produtos de interesse comercial obtido experimentalmente a partir do melão de soja.	25
Tabela 2. Comparativo das principais características dos sistemas anaeróbio e aeróbios.....	27
Tabela 3. Vantagens associadas ao RCA quanto à construção, biomassa e operação.....	30
Tabela 4. Tratamento de efluentes de baixa e média carga orgânica em reatores compartimentados anaeróbios.	32
Tabela 5. Tratamento de efluentes de alta carga orgânica em reatores compartimentados anaeróbios.....	34
Tabela 6. Reatores integrados com e sem separação física entre as fases anaeróbia e aeróbia.	38
Tabela 7 - Principais características do melão de soja.....	42
Tabela 8. Condições operacionais aplicadas ao RCAA durante a etapa I.	47
Tabela 9. Condições operacionais aplicadas ao RCAA durante a etapa II.....	48
Tabela 10. Valores médios das vazões de alimentação, recirculação e total relativo aos TDHs médios aplicados durante a etapa II.....	49
Tabela 11. Parâmetros analisados, seus respectivos métodos, frequência e bibliografia utilizada.	50
Tabela 12. Valores médios e desvio padrão do afluente e efluente durante a etapa I.	53
Tabela 13. Valores médios de eficiência de remoção de DQO_T e DQO_F para os sistemas anaeróbio, aeróbio e completo para a etapa I.	55
Tabela 14. Valores médios de eficiência de remoção de DQO_T e DQO_F de cada câmara anaeróbia durante a etapa I.	56
Tabela 15. Valores médios e desvio padrão da concentração de SST e SSV para o efluente das câmaras anaeróbias durante as fases da etapa I.	58
Tabela 16. Valores médios e desvio padrão de OD para a câmara aeróbia em todas as fases na etapa I.	60
Tabela 17. Valores médios do pH do afluente e efluente de cada câmara durante todas as fases da etapa I.....	60
Tabela 18. Caracterização e quantificação dos ácidos voláteis totais presentes no afluente (A) e efluentes das C1 e C2 durante a etapa I.	67
Tabela 19. Valores diários de concentração de ácidos voláteis para a fase 6 da etapa I.	70
Tabela 20. Valores médios e desvio padrão dos principais parâmetros analisados para o afluente e efluente durante a etapa II.....	72
Tabela 21. Valores médios de eficiência de remoção de DQO_T e DQO_F para os sistemas anaeróbio, aeróbio e completo obtidos na etapa II.	74
Tabela 22. Valores médios de eficiência de remoção de DQO_T e DQO_F de cada câmara anaeróbia durante a etapa II.....	76
Tabela 23. Valores médios e desvio padrão da concentração de SST e SSV para o afluente das câmaras anaeróbios para a etapa II.	79
Tabela 24. Valores médios e desvio padrão de OD para a câmara aeróbia nas 7 fases da etapa II.	79
Tabela 25. Valores médios do pH do afluente e efluentes de cada câmara durante todas as fases da etapa II.	80
Tabela 26. Cálculo teórico da produção de biogás durante as fases de operação (etapa I e II).	88
Tabela 27 - Resumo dos dados obtidos a partir dos ensaios hidrodinâmicos.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABR – *Anaerobic baffled reactor*
- AB – Alcalinidade a bicarbonato
- AD – Alta dispersão
- AVT – Ácidos voláteis totais
- BD – Baixa dispersão
- C1 – Câmara 1
- C2 – Câmara 2
- C3 – Câmara 3
- C4 – Câmara aeróbia
- CSTR – Reator de mistura perfeita
- DQO – Demanda química de oxigênio
- DQO_T – Demanda química de oxigênio total
- DQO_F – Demanda química de oxigênio filtrada
- DBO – Demanda bioquímica de oxigênio
- Dp – Desvio padrão
- DTR – Distribuição do tempo de residência
- ETOH – Etanol
- ETE – Estação de tratamento de esgoto
- HAc – Ácido acético
- HBu – Ácido Butírico
- HVa – Ácido Valérico
- HFo – Ácido fórmico
- HLa – Ácido láctico
- HPo – Ácido propiônico
- M – Média
- TDH – Tempo de detenção hidráulica
- COV – Carga orgânica volumétrica
- θ_c – Tempo de retenção celular
- NH₄⁺ - N – Nitrogênio amoniacal
- NT – Nitrogênio total
- OD – Oxigênio dissolvido
- UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Bed*
- RCAA – Reator compartimentado anaeróbio/ aeróbio

ST – Sólidos totais

SV – Sólidos voláteis

SF – Sólidos fixos

SST – Sólidos em suspensão totais

SSV – Sólidos em suspensão voláteis

SSF – Sólidos em suspensão fixos

LISTA DE SÍMBOLOS

CH_4 – Metano

CO_2 – Gás carbônico

H_2 – Gás Hidrogênio

N_2 – Gás Nitrogênio

O_2 – Oxigênio

ψ – Índice de curto-circuito

τ – Tempo de detenção hidráulica médio

θ_h – tempo de detenção hidráulica real

V_d – Fração de zonas mortas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. Processamento da soja	18
2.2. Melaço de soja	21
2.3. Tratamentos Biológicos	24
2.3.1. <i>Reatores anaeróbios de alta taxa</i>	27
2.3.2. <i>Tratamento combinado anaeróbio + aeróbio</i>	35
2.3.3. <i>Reator compartimentado anaeróbio/ aeróbio</i>	39
3. OBJETIVOS.....	41
3.1. Objetivo geral	41
3.2. Objetivos específicos	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1. Substrato (melaço de soja)	42
4.2. Aparato experimental	43
4.3. Inóculo	46
4.4. Operação do Reator Compartimentado anaeróbio/aeróbio	47
4.4.1. <i>Etapa I: RCAA sem reciclo do efluente final</i>	47
4.4.2. <i>Etapa II: RCAA com reciclo do efluente final</i>	48
4.5. Métodos analíticos	49
4.6. Estudos hidrodinâmicos	50
4.7. Estimativa da produção de biogás	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1. Etapa I: RCAA sem reciclo do efluente final	53
5.1.1. <i>Desempenho e monitoramento do RCAA sem reciclo</i>	53
5.1.2. <i>Fase 6</i>	69
5.2. Etapa II: RCAA com reciclo do efluente final	71
5.2.1. <i>Desempenho e monitoramento do RCAA com reciclo</i>	71
5.4. Potencial de produção de metano e composição do biogás	87
5.5. Estudo hidrodinâmico	89
6. CONCLUSÕES.....	93
7. RECOMENDAÇÕES	95
8. REFERÊNCIAS	96
APÊNDICE – Metodologia e Roteiro de cálculos empregados para a determinação do parâmetros hidráulicos do reator.	108

1. INTRODUÇÃO

A soja é uma das culturas de maior importância econômica no Brasil e no mundo. Durante a safra 2018/2019, o Brasil ocupou o posto de segundo maior produtor do grão no mundo, com uma produção em torno de 122,2 milhões de toneladas. Do total a ser colhido, aproximadamente 44 milhões de toneladas do grão são destinadas para o consumo interno, sendo 17 milhões de toneladas direcionadas para produção de farelo de soja (Companhia..., 2020).

A cadeia produtiva da soja (plantação, produção e comercialização) está vinculada à geração de diversos produtos de alto valor agregado tais como óleos vegetais, margarinas, extratos proteicos, embutidos, rações animais, tofu, proteína (texturizada, concentrada, isolada), biodiesel, entre outros. Além disso, pode ser utilizada como matéria-prima em diferentes setores industriais, como de cosméticos, plásticos, veterinária, farmacêutica, química, vernizes e tintas.

Apesar de possuir um elevado valor comercial e grande importância socioeconômica, o processamento da soja está vinculado à geração de uma gama de subprodutos e resíduos que não possuem, até o momento, destinação adequada ou efetivo valor comercial. Dentre eles, destaca-se o melaço de soja, subproduto da concentração de proteínas do farelo de soja. Estudos apontam sua utilização como matéria-prima para ração animal, como substrato em processos fermentativos e até mesmo como combustível de caldeira industrial (LOMAN; JU, 2016).

Devido principalmente à composição deste subproduto, o processo de fermentação já foi estudado por diversos pesquisadores para a conversão dos carboidratos presentes no melaço de soja a bioprodutos tais como ácido lático (MONTELONGO; CHASSY; MCCORD, 1993) ácido málico e polimálico (CHENG et al., 2017), lipase (DE MORAIS et al., 2016); sorolipídios (SOLAIMAN et al., 2004), goma xantana (SILVA, 2010), entre outros. Além disso, a produção de biocombustíveis como o etanol (LETTI et al., 2012) e butanol (QURESHI; LOLAS; BLASCHEK, 2001) também foram pesquisadas.

Como opção alternativa e sustentável, a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia, tornou-se atraente uma vez que recentemente se verificou o potencial energético do melaço de soja (CITELLI et al., 2017; RODRIGUES; ARAUJO; SARTI, 2018). Esse subproduto agroindustrial, além de possuir alta concentração de açúcares, contém nitrogênio, e outros macros e micronutrientes como o potássio, fósforo, magnésio, essenciais para a digestão anaeróbia por microrganismos.

O processo de digestão anaeróbia esteve, por muitos anos, restrito ao tratamento de lodo de esgoto. Entretanto, com avanços na compreensão da microbiologia envolvida no processo, do controle e operação do mesmo, juntamente com o avanço das configurações dos reatores, o

processo anaeróbio passou a ser aplicado no tratamento de diversos efluentes industriais de alta carga orgânica, tais como efluentes de indústrias alimentícias (leveduras, farinha de trigo, cervejarias), farmacêuticas, suinocultura, avicultura, entre outros (SPEECE, 1983; BALOCH, 2011). Inclusive, com a crescente procura de fontes energéticas renováveis, o processo de digestão anaeróbia tem sido amplamente aplicado para conversão de resíduos orgânicos provindos de diversas fontes e prontamente biodegradáveis em biogás. Tal combustível pode ser utilizado para operar turbinas a gás combinadas com geradores elétricos, substituir parte do combustível usado na agroindústria, no aquecimento de boilers para gerar vapor, como fonte de energia, gerando calor e eletricidade, entre outros processos (ACHINAS; ACHINAS; EUVERINK, 2017).

Sistemas combinados que empregam reatores anaeróbios seguido por reatores aeróbios estão sendo cada vez mais utilizados no tratamento de efluentes municipais e industriais (CHAN et al., 2009). Segundo Vera et al. (1999), processos anaeróbios-aeróbios podem reduzir em até oito vezes os custos de operação quando comparados com tratamento aeróbio somente, enquanto simultaneamente resultam em alta eficiência de remoção de matéria orgânica e reduzida geração de lodo aliada a produção de bioenergia.

O reator compartimentado anaeróbio (*Anaerobic baffled reactor – ABR*), ou simplesmente RCA, foi desenvolvido por McCarty e colaboradores na Universidade Stanford em 1981 (BACHMANN; BEARD; MCCARTY, 1985). O RCA é considerado um promissor reator de alta taxa, que nos últimos anos, suas inúmeras vantagens têm se destacado, como por exemplo, sua resistência a choques orgânicos e hidráulicos, além da capacidade de separação das fases do processo anaeróbio. Entretanto, ainda não é possível encontrar muitos exemplos em grande escala em funcionamento (REYNAUD; BUCKLEY, 2016).

Devido a poucos estudos publicados até o momento relatarem a utilização de melaço de soja para produzir biogás, o presente trabalho se propôs a avaliar o desempenho e o potencial da bioconversão do melaço de soja em metano por meio da digestão anaeróbia em um reator compartimentado anaeróbio/aeróbio. Nesse sentido, conhecendo-se as vantagens de se utilizar sistemas combinados (anaeróbio + aeróbio), em conjunto com as vantagens que um reator compartimentado, foi avaliado a possibilidade de se obter elevada eficiência de remoção de matéria orgânica, juntamente com produção de um efluente adequado a Legislação vigente.

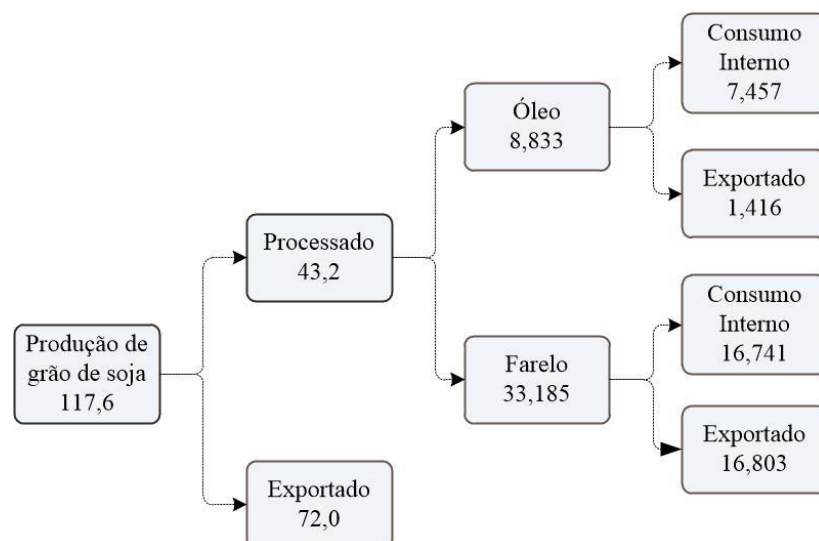
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processamento da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merr) pertence à classe das dicotiledôneas e família Fabaceae (leguminosa) sendo originária do leste da Ásia. Devido a sua versatilidade, juntamente com mutações genéticas e com o avanço da biotecnologia e engenharia genética, adquiriu a capacidade de crescer em diferentes climas e tipos de solos, sendo que sua produção e se expande ao redor do mundo (SPEHAR, 1995). É um grão com grande diversidade genética e morfológica, além de uma composição química única, rico em proteínas e lipídios, com aproximadamente 40 - 41 % de proteínas, 8 – 24 % de lipídios (óleo), 26 – 35 % de carboidratos (celulose, hemicelulose e pectinas), e 5 % de cinzas em base seca (MEDIC; ATKINSON; HURBURGH, 2014).

O Brasil ocupa o posto de segundo maior produtor e maior exportador de soja no mundo. Durante a safra 2018/2019 foram colhidas 122,2 milhões de toneladas do grão, ocupando uma área plantada de 64,17 milhões de hectares, que se espalham por quase todos os Estados brasileiros, com destaque aos Estados de Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás. Segundo dados do Brasil (2020), a exportação do grão em seu estado bruto (35% do total exportado), principalmente para a Ásia, e em especial a China, gera uma receita de aproximadamente 32 bilhões de dólares, enquanto a exportação de óleo e farelo geram 1 e 6 bilhões de dólares, respectivamente. Na Figura 1 estão apresentados os dados referentes à safra com relação à produção nacional e o destino desse importante agronegócio brasileiro.

Figura 1. Destino da soja brasileira (em milhões de toneladas).



Fonte: Associação..., 2020.

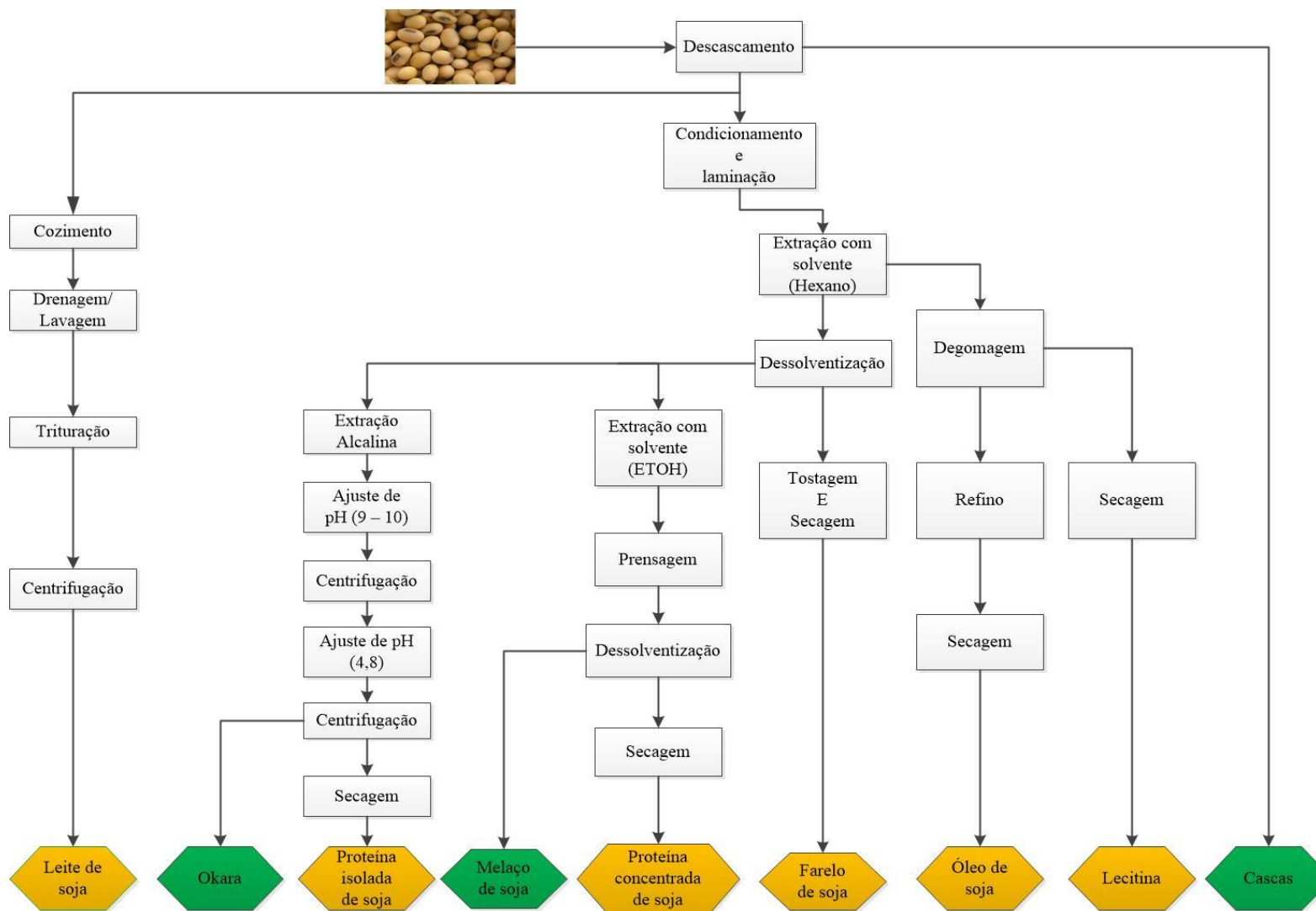
O processamento da soja até a obtenção do óleo e outros produtos de interesse comercial envolve diferentes operações unitárias divididas entre etapas principais e sub-etapas. Na Figura 2 está apresentado o fluxograma simplificado geral do processamento do grão e os principais produtos e subprodutos gerados. De forma geral, o processamento se inicia com a preparação do grão, no qual processos de limpeza, que envolvem a remoção de impurezas através da utilização de peneiras, secagem dos grãos para a redução da umidade (em torno de 10% em base seca) e descascamento dos grãos são realizados sequencialmente (MANDARINO; ROESSING, 2001).

A etapa de descascamento dos grãos gera como principal resíduo as cascas, que representam de 5 – 10% de todo o grão, sendo que para cada tonelada processada, são produzidos 50 kg da casca de soja. Elas contêm principalmente polissacarídeos, além de uma relativamente baixa concentração de lignina (1 - 4%) quando comparado aos outros resíduos agroindustriais (palha da cana de açúcar e do milho). Em termos comerciais, são vendidas em sua forma bruta ou peletizada, como complemento nutricional na alimentação animal (MIELENZ; BARDSLEY; WYMAN, 2009).

Com relação à produção de óleo e seus derivados, os grãos descascados são condicionados e aquecidos até uma temperatura entre 55° e 60°C. Posteriormente, sofrem os processos de laminação, trituração e cozimento, aplicados para aumentar a superfície de contato do grão para que, em seguida, seja realizada a remoção do óleo bruto por meio da extração (ERICKSON, 1995a). Atualmente, nos processos mais modernos, os grãos já preparados são introduzidos diretamente nos extratores e o óleo é extraído diretamente com o solvente químico orgânico - em geral hexano. A micela, mistura de solvente e óleo, é separada por evaporação do farelo desengordurado resultante da extração, que será utilizado posteriormente na extração de proteínas (WOERFEL, 1995; MACHADO, 1999). Inclusive, tal etapa é necessária para recuperação do solvente, portanto, a torta de sólidos segue para dessolventização e a micela para a destilação (TOMAZIN JUNIOR, 2008).

O óleo bruto é direcionado para a etapa de refino, cuja principais operações são degomagem, neutralização, clarificação e desodorização, as quais possui como objetivo a remoção de substâncias indesejáveis que podem afetar o sabor, odor e cor do óleo (WOERFEL, 1995).

Figura 2. Fluxograma simplificado da produção dos principais produtos (amarelo) e subprodutos (verde) da soja.



Fonte: Adaptado de Loman & Ju (2016).

A lecitina pode ser produzida a partir do processo de degomagem do óleo bruto, após sua secagem até ser atingido 1% de umidade. Se trata de um produto rico em fosfolipídios e glicolipídios, que pode ser encontrada em forma seca ou líquida, sendo largamente utilizada na indústria alimentícia, principalmente como emulsificante lipofílico, estabilizante e espessante em vários produtos tais como margarinas, biscoitos, rações, tintas, entre outros (ERICKSON, 1995b).

A farinha desengordurada é direcionada para os processos de obtenção das proteínas texturizada, concentrada e isolada, que variam conforme o método de separação empregado. Durante o processo de produção de proteína isolada e concentrada, são produzidos como subprodutos a *okara* e melão de soja, respectivamente (LOMAN; JU, 2016). O processo de extração varia conforme o tipo de solvente utilizado, no qual, o melão de soja é um subproduto proveniente somente da extração com etanol (solvente), enquanto a *okara* é proveniente da extração alcalina, em geral para a obtenção de tofu. A proteína texturizada é resultante de uma extrusão termoplástica, e a extração da proteína concentrada e isolada é geralmente realizada pela adição de ácidos (MACHADO, 1999).

Outro produto obtido a partir da farinha desengordurada é o farelo de soja, gerado a partir do processo de secagem da farinha, cuja principal utilização é como principal fonte de proteína na suplementação animal (WITTE, 1995).

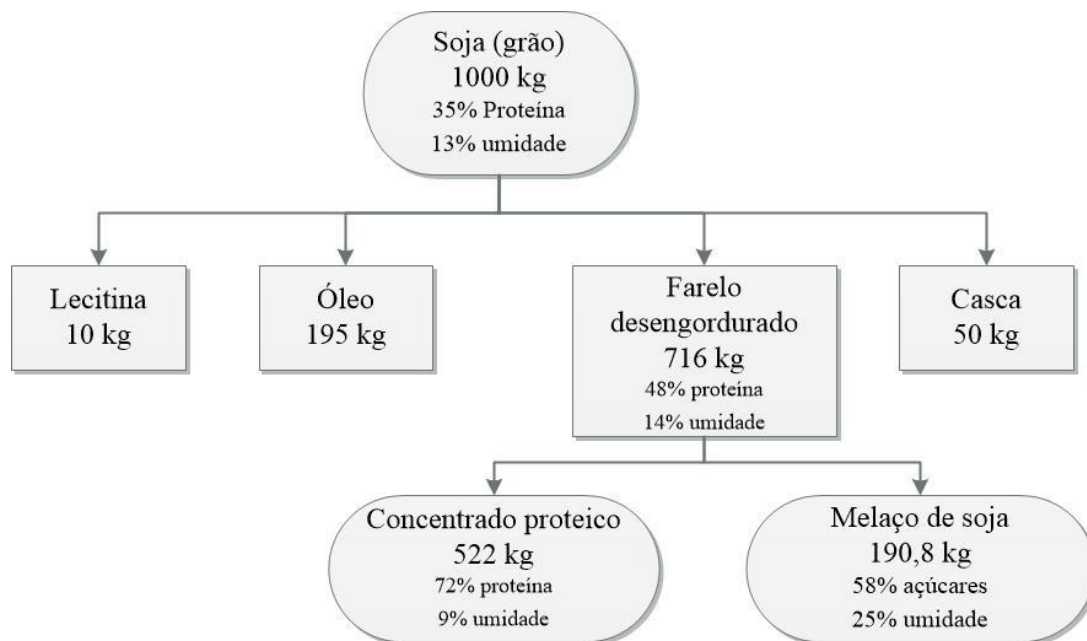
2.2. Melão de soja

A obtenção do concentrado proteico de soja pela extração alcoólica dos açúcares a partir do farelo de soja desengordurado resulta em um xarope marrom escuro rico em carboidratos, o melão de soja (YANG; EL ENSHASY; THONGCHUL, 2013). De forma simplificada, o processo consiste na dissolução do farelo desengordurado em uma solução hidroalcoólica (60% etanol + 40% água) (LUSAS; RHEE, 1995). Durante a extração são separadas duas frações, sendo uma composta por um concentrado alcoólico insolúvel com 66-70% de concentração de proteína enquanto a fração líquida contém principalmente açúcares. A fração líquida é então destilada para a recuperação da solução de etanol, restando o melão de soja, que é o único subproduto do processo de extração de proteína. Após a secagem, o concentrado alcoólico é comercializado na forma de proteína concentrada em pó (MACHADO, 1999).

Segundo Siqueira (2007), para cada tonelada de soja processada obtém-se 716 kg de farelo, sendo este utilizado para a obtenção de concentrados proteicos, e assim, gerando 190 kg de melão de soja (Figura 3). Tal subproduto se enquadra como um importante exemplo de

subproduto da indústria processadora de soja devido a sua elevada produção. Além de não possuir alto valor agregado, não há tratamento adequado, e consolidado, para sua disposição final, sendo, atualmente, destinado à queima em caldeiras nas indústrias processadoras.

Figura 3. Balanço de massa simplificado do processo de produção de melação de soja.



Fonte: Adaptado de Siqueira (2007).

Com relação a sua composição, cerca de 60% do total dos sólidos solúveis encontrados no melação são carboidratos, que incluem açúcares digeríveis como a sacarose, glicose, frutose, dextrose, lactose e galactose, além de açúcares não digeríveis como a rafinose, estaquiase e verbascose (QURESHI; LOLAS; BLASCHEK, 2001). Juntamente com a elevada concentração de carboidratos, o melação contém nitrogênio orgânico, na forma de proteína residual, lipídeos, flavonoides e outros macro e micro- nutrientes que favorecem o crescimento de microrganismos e síntese de bioprodutos (OBENDORF; KOSINA, 2008).

Além de ser destinado a queima em caldeiras, o melação de soja também é utilizado como ingrediente calórico para indústria de ração animal. Porém, sua utilização é limitada como suplemento energético devido em grande parte pela presença de tri e tetrassacarídeos como a rafinose e estaquiase, respectivamente, juntamente com a alta concentração de açúcares (SNYDER; KWON, 1987). Esses açúcares são digeridos pobremente por animais devido à incapacidade de sintetizar as α - galactosidasas, além de outros problemas que podem resultar em flatulência, náuseas, desconforto abdominal e diarreia, restringindo o seu uso na alimentação animal (SILVA, 2010).

Diversos pesquisadores estudaram o potencial do meloço de soja como matéria prima para obtenção de bioprodutos ou produtos químicos industriais que incluem: síntese de ácido láctico com *Lactobacillus salivarius* (MONTELONGO; CHASSY; MCCORD, 1993), síntese de soforolipídico com *Candida bombicola* (SOLAIMAN et al., 2004), fermentação para a produção de ácido acético a partir de uma cultura mista de bactérias (MIRANDA, 2017), ácido propiônico por meio de ensaios fermentativos em batelada utilizando a bactéria facultativa *P. acidipropionici* (YANG et al., 2018). Um estudo conduzido por Camilo (2016) analisou o potencial uso do meloço como fonte de carbono em cultivos para a produção de polihidroxialcanoatos (PHA), um biopolímero. O autor avaliou quatorze linhagens bacterianas, sendo que três foram isoladas de lodo de esgoto. Tais microrganismos foram capazes de utilizar a sacarose disponível no meloço, e gerar como material de reserva celular o PHA.

Além da produção de bioprodutos, estudos analisaram o potencial de produção de biocombustíveis. Qureshi et al. (2001) e Dong (2014) estudaram a produção de butanol por meio da fermentação por bactérias do gênero *Clostridium*. O maior rendimento do estudo conduzido por Qureshi et al. (2001) foi de $10,7 \text{ g L}^{-1}$ de butanol, com uma concentração aplicada de 80 g L^{-1} de meloço de soja. Os autores concluíram que elevada concentração de meloço resultou em menores rendimentos, devido principalmente a presença excessiva de sais minerais e outros componentes inibitórios ao crescimento bacteriano.

No Brasil, Romão et al. (2012) e Letti et al. (2012) avaliaram a utilização do meloço de soja na produção de etanol, por meio da fermentação alcoólica pela levedura *Saccharomyces cerevisiae* e *Zymomonas mobilis*, respectivamente, em escala de laboratório. Entretanto, foram obtidos baixos rendimentos de produção devido a levedura não conseguir hidrolisar por completo os oligossacarídeos (rafinose e estaquiose) presente no meloço.

Igualmente, Siqueira et al. (2008) ampliou o processo de fermentação do meloço para escala industrial, obtendo $162,7 \text{ L}$ de etanol absoluto por tonelada de meloço seco. Porém, foi necessário um pré-tratamento do meloço, além da aplicação antibióticos para o controle da contaminação do fermento e dispersante para controle de espuma, tornando o processo dispendioso e ainda mais complexo.

Recentemente, Rodrigues (2019) avaliou o potencial do meloço de soja como substrato para digestão anaeróbia em um reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Bed*) em escala de bancada (12 L). A autora utilizou o meloço diluído em diferentes concentrações de matéria orgânica em termos de carga orgânica volumétrica aplicada com valores entre $0,28$ a $7,82 \text{ kgDQO m}^{-3} \text{ dia}^{-1}$, e relatou uma produção superior a 20 L d^{-1} de biogás rico em metano.

A Tabela 1 apresenta, de forma resumida, diversos estudos conduzidos por pesquisadores com relação a utilização do melaço de soja como matéria prima principal, ou co-substrato, para produção de produtos de interesse comercial.

2.3.Tratamentos Biológicos

Os processos biológicos de degradação da matéria orgânica, que incluem carboidratos, proteínas, lipídios, ocorrem por meio de microrganismos diversos, principalmente bactérias, na presença ou não de oxigênio (O₂) livre (METCALF; EDDY, 2003).

A digestão anaeróbia consiste em um processo biológico natural promovido a partir da atividade sintrófica de diversas populações de microrganismos na ausência de O₂ (MOSEY, 1983). Os microrganismos oxidam, e convertem, a matéria orgânica carbonácea em produtos finais simples como o metano (CH₄), gás carbônico (CO₂), gás sulfídrico (H₂S), nitrogênio (N₂), amônia (NH₃), água e biomassa adicional (SPEECE, 1996).

Resumidamente, a biodigestão anaeróbia ocorre em três etapas básicas, de acordo com as transformações bioquímicas às quais os compostos orgânicos são submetidos: hidrólise, acidogênese e metanogênese.

A hidrólise é a primeira etapa do processo, que consiste na conversão do material particulado a compostos solúveis, que serão, posteriormente, hidrolisados a monômeros simples. A conversão é efetuada por enzimas excretadas por bactérias fermentativas, portanto, carboidratos são convertidos a açúcares solúveis, proteínas se degradam para formar aminoácidos e lipídeos são convertidos a ácidos graxos. Em sequência ocorre a acidogênese, que é efetuada por bactérias anaeróbias restritas e resulta na produção de substâncias intermediárias, tais como ácidos graxos voláteis, álcoois, gás carbônico e hidrogênio. Os componentes mais importantes da decomposição biológica da matéria orgânica são os ácidos voláteis de cadeia curta, tais como ácido fórmico, acético, propiônico, butírico, e, em menor quantidade, ácido valérico e isovalérico (METCALF; EDDY, 2003; CHERNICHARO, 2015).

A acidogênese pode ser seguida pela acetogênese, que consiste na conversão dos produtos intermediários produzidos na etapa anterior em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. A etapa limitante do processo anaeróbio, na grande maioria dos casos, é a metanogênese, no qual metano é produzido pelas arqueias metanogênicas acetotróficas e hidrogenotróficas, a partir dos produtos da acetogênese, reduzindo o acetato e o gás carbônico, pelo hidrogênio, a metano, respectivamente (METCALF; EDDY, 2003).

Tabela 1. Produtos de interesse comercial obtido experimentalmente a partir do melaço de soja.

Produto	Processo utilizado	Microrganismo	Referência
Ácido láctico	Fermentação	<i>Lactobacillus salivarius</i>	Montelongo; Chassy; Mccord, (1993)
Ácido málico	Fermentação em batelada via ácido polimálico	<i>Aureobasidium pullulans</i> ZX-10	Cheng et al., (2017)
Ácido propiônico	Fermentação em batelada sequencial	<i>Propionibacterium acidipropionici</i>	Yang et al., (2018)
Butanol	Fermentação	<i>Clostridium beijerinckii</i> BA101	Qureshi; Lolas; Blaschek, (2001)
Butanol	Fermentação	<i>C. acetobutylicum</i> ATCC 55025	Dong (2014)
Etanol	Hidrólise ácida seguida de fermentação submersa	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Romão et al., (2012)
Etanol	Fermentação em batelada	<i>Zymomonas mobilis</i>	Letti et al., (2012)
Etanol	Fermentação em escala de laboratório, piloto e industrial	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Siqueira et al., (2008)
Etanol	Fermentação em escala de laboratório	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Machado (1999)
Fermentado acético	Fermentação alcoólica	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Miranda (2017)
Lipase	Fermentação submersa (melaço como meio de cultura)	<i>Candida rugosa</i> <i>e Geotrichum candidum</i>	De Moraes et al., (2016)
Polihidroxicanoato	Biossíntese (melaço como fonte de carbono)	<i>Pseudomonas corrugata</i>	Solaiman et al., (2006)
Soporolipídeos	Fermentação (melaço como co-substrato)	<i>Candida bombicola</i>	Solaiman et al., (2004)
Biogás	Digestão anaeróbia	Cultura mista	Rodrigues (2019)

Fonte: Autora, 2019.

As etapas de hidrólise, acidogênese e acetogênese envolvem bactérias anaeróbias obrigatórias, ou estritas, e facultativas, cujo metabolismo funciona na ausência de O_2 , mas caso esteja presente, não há inibição (MCCARTY; SMITH, 1986). Em relação às arqueias metanogênicas, a presença de O_2 é inibitória ao crescimento, sendo microrganismos estritamente anaeróbios. Os principais grupos de arqueias metanogênicas incluem os microrganismos hidrogenotróficos *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus*, *Methanospirillum*, e os acetotróficos *Methanosaeta*, *Methanothrix* e *Methanosarcina* (ZINDER, 1993).

Em relação ao processo aeróbio, a estabilização da matéria orgânica ocorre na presença de O_2 , que é consumido pelos microrganismos aeróbios para as reações de oxidação/redução a fim de produzir energia para o crescimento celular e manutenção das células. Devido à obrigatoriedade da presença de O_2 para que ocorra a digestão, a aeração do sistema de tratamento pode ser realizada de forma natural, por meio de transferência de massa “gás-líquido” ou artificial, por meio de aeradores ou compressores (METCALF; EDDY, 2004). As principais unidades utilizadas nos processos aeróbios para o tratamento de efluentes diversos incluem lagoas aeróbias, filtros biológicos aeróbios, lodos ativados convencional e aeração prolongada, entre outros (VON SPERLING; CHERNICHARO, 2015).

Reatores anaeróbios produzem menor quantidade de lodo em relação ao aeróbio, quanto alimentados com a mesma carga orgânica (SPEECE, 1983). Entretanto, o processo aeróbio possui vantagens em comparação ao anaeróbio quando se trata das características finais do efluente gerado, que apresenta melhor qualidade e aparência, além de suportar tempos de detenção hidráulica relativamente menores, e conseqüentemente, menores áreas de implantação (GRADY, JR. et al., 2011). Porém, além de gerar maior quantidade de lodo não estabilizado, o processo aeróbio também necessita de uma operação relativamente mais sofisticada e maiores custos de implantação e operação, quando comparado ao sistema anaeróbio (CHERNICHARO, 1997).

Outras vantagens dos reatores anaeróbios em relação aos aeróbios incluem menor custo energético, em virtude de não se necessitar aeração, geração de lodo altamente estabilizado, baixo requerimento de nutrientes, resistência a altas cargas orgânicas, entre outros (MCCARTY; SMITH, 1986). Na Tabela 2 estão resumidas as principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios comparados aos processos aeróbios.

Tabela 2. Comparativo das principais características dos sistemas anaeróbio e aeróbios.

Característica	Aeróbio	Anaeróbio
Eficiência de remoção de matéria orgânica	Alta	Moderada a alta
Qualidade do efluente final	Excelente	Moderada a baixa
Carga orgânica volumétrica aplicada	Moderada	Alta
Produção de lodo	Alta	Baixa
Bioenergia e recuperação de nutrientes	Não	Sim
Necessidade de adição de nutrientes	Alta	Baixa
Necessidade de adição de alcalinizante	Baixa	Variável
Necessidade energética	Alta	Moderada a baixa
Sensibilidade à baixas temperaturas	Baixa	Alta
Período de partida do sistema	2 - 4 semanas	2 - 4 meses
Geração de odor	Baixa	Moderada a alta

Fonte: Chan et al., (2009); Grady, JR. et al., (2011).

2.3.1. *Reatores anaeróbios de alta taxa*

Reatores anaeróbios de alta taxa são caracterizados pela relação entre tempo de retenção celular (θ_c) e o tempo de detenção hidráulica superior (TDH) a 1, ou seja, $\theta_c/\text{TDH} \gg 1$. Tempo de retenção celular está relacionado ao período médio de tempo em que os sólidos (lodo) permanece no reator biológico. É um parâmetro fundamental para o desempenho do processo anaeróbio, pois, quanto maior o θ_c maior a quantidade de microrganismos no reator, o que confere melhor capacidade de manter em equilíbrio as fases de produção e consumo de ácidos da digestão anaeróbia. Já o TDH corresponde a relação entre a vazão volumétrica aplicada e o volume do reator, sendo um dos principais parâmetros de projeto de reatores biológicos (METCALF; EDDY, 2003).

O desenvolvimento dos reatores de alta taxa permitiu desvincular o TDH do θ_c por meio de mecanismos de retenção da biomassa, principalmente por granulação (lodo granular), sedimentação (lodo sedimentar), imobilização em meio suporte (lodo imobilizado), entre outros (VAN LIER, 2008). Tal característica promove um maior contato entre a biomassa ativa e o líquido no reator (WEILAND; ROZZI, 1991). Como resultado, tais reatores são mais compactos, com volumes menores em comparação aos reatores de baixa taxa (que incluem tanques sépticos e fossas sépticas) enquanto mantém alto grau de estabilização do lodo e maiores eficiências de remoção de matéria orgânica (RITTMANN; MCCARTY, 2001).

Tais sistemas podem ser divididos em duas categorias no que se refere ao crescimento microbiano, seja em suspensão, no qual o lodo biológico se encontra na forma de grânulos ou flocos; e aderido, no qual o consórcio de microrganismos é retido a meios suportes fixos ou

móveis (VAN LIER, 2008). Os principais exemplos de reatores com crescimento aderido são o reator anaeróbio de manta expandida (*expanded granular sludge blanket* – EGSB), reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF), reator anaeróbio de leito fluidizado (*anaerobic fluidized bed*), filtro anaeróbio (FAN) (RAJESHWARI et al., 2000). O reator UASB, e seus variantes, reator compartimentado anaeróbio (RCA), reator anaeróbio de contato e o processo anaeróbio com membranas são exemplos de reatores que apresentam o lodo biológico com crescimento suspenso (METCALF; EDDY, 2003).

O reator de manta de lodo (UASB) se apresenta como o reator de alta taxa mais utilizado no tratamento de efluentes, tanto municipais quanto industriais (MCCARTY, 2001). Desenvolvido por Lettinga na década de 1970, seu projeto envolve a separação entre as frações líquida (efluente), sólida (lodo) e gasosa (biogás), sendo que o fluxo do efluente escoar de forma ascendente, atravessando inicialmente a camada de lodo no fundo do reator, na qual ocorrem todos os processos biológicos. O biogás gerado e a fração líquida fluem de forma ascendente até o separador trifásico no topo do reator, ocorrendo a deposição dos sólidos carreados na porção externa e a coleta do biogás na parte interna do separador (LETTINGA, 1995). Uma das principais características do reator é a sua eventual capacidade de formar um lodo do tipo granular, que possibilita o tratamento de efluentes de elevada carga orgânica ao manter maiores θ_c , em menor volume de reator (HULSHOFF POL et al., 2004).

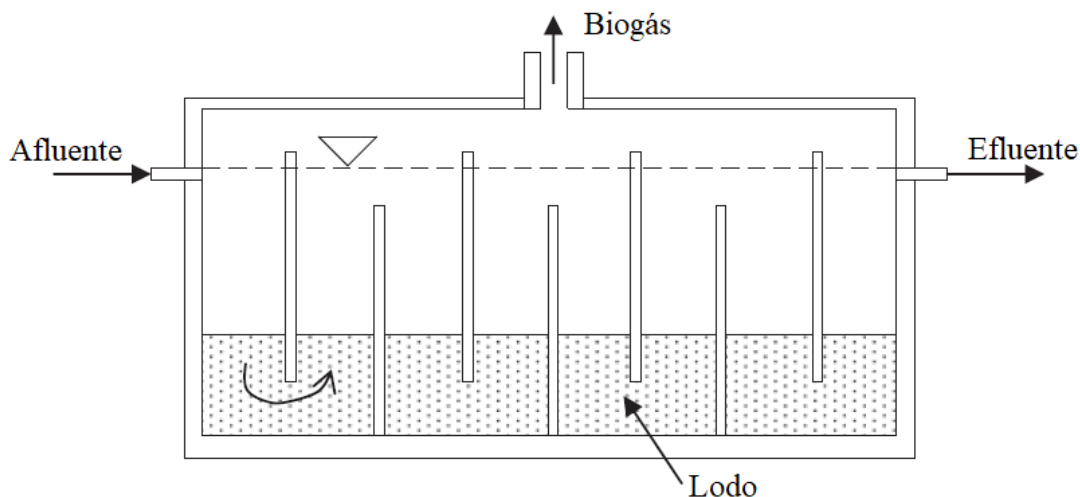
Devido a isso, inicialmente, utilizou-se um reator UASB (12 L) para o tratamento e produção de biogás a partir do melão de soja (Rodrigues, 2019). Eficiências de remoção da carga orgânica se manteve em torno de 80%, juntamente a uma elevada produção de biogás. Como alternativa de reator anaeróbio de alta taxa, no presente estudo foi utilizado o reator compartimentado anaeróbio.

O reator compartimentado anaeróbio (Anaerobic baffled reactor – ABR), ou simplesmente RCA, foi desenvolvido por McCarty e colaboradores na Universidade Stanford em 1981. O sistema consiste em um reator com múltiplos compartimentos em série, conforme é apresentado na Figura 4 no qual o líquido flui de forma sequencial descendente e ascendente (BACHMANN; BEARD; MCCARTY, 1985).

Diversos autores propuseram modificações ao modelo original desenvolvido por McCarty e colaboradores visando potencializar o desempenho do reator. Podem ser citados o reator anaeróbio compartimentado periódico (*periodic anaerobic baffled reactor* – PABR), *carried anaerobic baffled reactor* (CABR), *split feed anaerobic reactor* (SFAR), *modified anaerobic baffled reactor* (MABR), *hybrid membrane-aerated biofilm reactor* (HMABR) e o reator

compartimentado anaeróbio/aeróbio (RCAA) (SKIADAS; LYBERATOS, 1998; FAISAL; UNNO, 2001; SILVA, 2001; BODKHE, 2009; HU et al., 2009). Dependendo da configuração utilizada, o RCA também pode ser descrito como reatores UASB em série (CHERNICHARO, 1997).

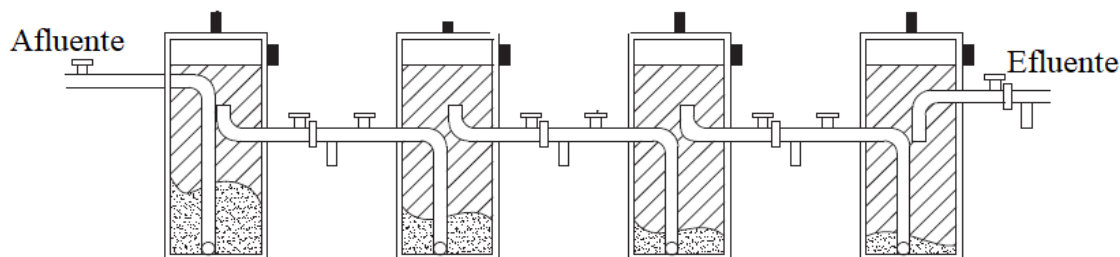
Figura 4. Esquema do aparato experimental do RCA desenvolvido originalmente.



Fonte: Adaptado de Baloch (2011).

Contudo, modelos mais recentes deste tipo de reator são compostos por câmaras perfeitamente isoladas entre si, conforme é apresentado na Figura 5. A comunicação entre as câmaras se dá por meio de tubulações de diâmetro reduzido, o que garante maior velocidade e TDH na comunicação entre os compartimentos inferior ao TDH das câmaras (HAHN; FIGUEROA, 2015; SILVA; SILVA; SARTI, 2016; VUITIK, 2017).

Figura 5. Reator compartimento anaeróbio em sua configuração adaptada.



Fonte: Hahn e Figueroa, (2015).

A configuração em câmaras individuais possibilita um maior contato entre a biomassa ativa presente na câmara e o líquido, que permanece livre de sólidos suspensos (BARBER; STUCKEY, 1999). Além disso, o sistema compartimentado confere ao reator inúmeras

vantagens, quando comparado a outros esquemas de reatores, conforme é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Vantagens associadas ao RCA quanto à construção, biomassa e operação.

Construção	Biomassa	Operação
Simple configuração	Baixa produção de lodo	Possibilidade de operação intermitente
Ausência de partes móveis e agitação mecânica	Elevados tempos de retenção de celular	Elevada estabilidade frente a choques de carga orgânica
Baixo custo de operação e construção	Não requer separação especial de gás ou lodo	Proteção contra materiais tóxicos no afluente
Entupimento pouco frequente	Capacidade de retenção de biomassa sem suportes móveis	Extremamente estável a choques hidráulicos
Reduzida expansão da biomassa	Suporta biomassa sem necessidades especiais de sedimentação	Longos tempos de operação sem perda de biomassa

Fonte: Adaptado de Barber e Stuckey, (1999).

Cabe ressaltar que o sistema em câmaras proporciona ao reator um caráter multifásico, possibilitando a mais significativa vantagem do RCA em relação aos outros sistemas: a separação parcial entre as etapas do processo anaeróbio, hidrólise/ acidogênese e metanogênese, permitindo que o reator se comporte como um sistema de duas fases (WEILAND; ROZZI, 1991). Tal separação permite que diferentes populações de bactérias dominem cada câmara, onde a hidrólise e acidogênese são predominantes nos compartimentos iniciais e a metanogênese nos compartimentos finais, nos quais condições favoráveis a cada espécie pode prevalecer (GROBICKI; STUCKEY, 1992).

Substratos contendo elevada concentração de carboidratos, como o melaço de soja, ao serem consumidos pelos microrganismos, são convertidos em uma alta concentração de ácidos voláteis durante a primeira etapa da digestão anaeróbia (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008). Logo, a operação em duas fases proposta pelo esquema compartimentado pode aumentar a atividade acidogênica, responsável pela conversão dos carboidratos, e, ao mesmo tempo, não inibir os microrganismos metanogênicos. Diversos autores ressaltam as vantagens oferecidas pela operação em duas fases (COHEN et al., 1980; KE; SHI; FANG, 2005), tais como maior estabilidade de operação, maiores taxas de conversão e eficiência de tratamento, possível

geração de hidrogênio durante a fase fermentativa (ALGAPANI et al., 2019), possibilidade de recirculação do efluente final para diluição da concentração dos ácidos (LUO; WONG, 2019).

Com relação à hidrodinâmica do RCA, Grobicki e Stuckey (1992) conduziram uma série de estudos de distribuição do tempo de residência (DTR) para diferentes TDH em um reator de quatro a oito compartimentos com e sem biomassa inoculada. Os autores concluíram que o modelo hidrodinâmico do RCA pode ser considerado o de fluxo em pistão ideal de acordo com o modelo desenvolvido por Levenspiel (1999). Além disso, os autores concluíram que o RCA apresenta menores níveis de zonas mortas (hidráulicas e biológicas) quando comparado a outros reatores anaeróbios (filtro biológico e reator de mistura perfeita (CSTR)).

Embora o RCA seja considerado um promissor reator de alta taxa, em quatro décadas após sua proposição, não conquistou visibilidade como opção de tratamento biológico. Entretanto nos últimos anos, suas inúmeras vantagens têm se destacado, mas ainda não é possível encontrar muitas unidades em grande escala e em funcionamento quando empregado para efluentes industriais (ZHU et al., 2015).

Segundo uma revisão da literatura conduzida por Reynaud e Buckley em 2016, a empresa alemã *Rotaria Energie und Umwelt-technik GmbH* instalou aproximadamente quarenta unidades de tratamento na América do Sul, as quais empregam o RCA como uma etapa de pré-tratamento de esgoto sanitário. Ainda segundo os autores, a organização não governamental *Bremen Overseas Research and Development Association* (BORDA) implementou mais de dois mil RCAs em comunidades de baixa renda do sul e sudeste asiático e sudoeste africano.

No Brasil, o primeiro RCA em escala real foi implantado por Barros e Campos, (1992) em Cosmópolis-SP, em um sistema que tratava esgoto sanitário em reator composto por três câmaras, e, segundo os autores, a separação entre as etapas da digestão anaeróbia foi perceptível, onde no primeiro compartimento a hidrólise e acidogênese foram predominantes, enquanto nas câmaras restantes prevaleceu a metanogênese.

Diversos estudos demonstraram a potencialidade do sistema compartimentado para o tratamento de efluentes de baixa e média concentração de matéria orgânica (500 – 1000 mgO₂ L⁻¹). Langenhoff et al., (2000) e Manariotis (2002) obtiveram eficiências de remoção de DQO entre 80 a 95%, sob condições ideais, no tratamento de efluente sintético simulando esgoto sanitário (300 – 500 mgO₂ L⁻¹) em RCAs de oito e três câmaras, respectivamente. Na Tabela 4 estão compilados alguns exemplos de reatores compartimentados utilizados no tratamento de efluentes com média e baixa carga orgânica.

Tabela 4. Tratamento de efluentes de baixa e média carga orgânica em reatores compartimentados anaeróbios.

Tipo de água residuária	TDH (h)	COV* (kgDQO m⁻³ dia⁻¹)	V_{reator} (L)	Número de compartimentos	Eficiência de remoção (%)	Período de operação (dias)	Referência
Esgoto sanitário ¹	12	1,02 ± 0,8	1.000*	4	43 ± 15	730	Hahn e Figueroa, (2015)
Esgoto doméstico	24 - 8	0,68 – 2,05	15	5	68 - 82	400	Nasr et al., (2009)
Efluente sintético diluído ²	80 - 10	0,15 – 1,2	10	8	80	260	Langenhoff et al., (2000)
Solução sintética ³	20 - 8	0,6 – 1,5	10	8	>90	544	Krishna et al., (2009)
Efluente diluído de abatedouro	26 - 2,5	0,44 – 7,2	12	4	75	NM***	Polprasert e Tran, (1992)
Efluente industrial ⁴	25 - 3,33	0,64 ± 0,05	100**	6	77	121	Torabian et al., (2010)
Esgoto sintético ⁵	24 - 12	0,3 – 0,8	14,7	3	87 - 91	730	Manariotis e Grigoropoulos, (2002)
Esgoto sanitário	16 - 13	0,77 – 0,95	750	4	78 - 83	365	Bodík et al., (2002)
Esgoto sanitário	22	0,78 ± 0,06	3000**	8	72	100	Lalbahadur et al., (2005)
Esgoto doméstico	33 - 8	0,07 – 1,14	597**	3	55	210	Da Silva et al., (2017)

* Valores calculados.

** Reatores em escala piloto.

*** Não mencionado.

Fonte: Autora, 2019.¹ Reator operado a baixas temperaturas (12 – 23°C).² Reator operado a baixas temperaturas (10 °C). Efluente consistia em uma solução diluída de leite semidesnatado pasteurizado.³ Efluente consistia em uma solução de sacarose + peptona (9:1), elementos traçadores e alcalinizante.⁴ Efluente coletado de um complexo industrial iraniano que agrega indústrias têxteis e de papel e papelão e frigorífico, juntamente com esgoto sanitário.⁵ Efluente consistia em uma solução sintética (açúcar, leite em pó, amido de milho, peptona, extrato de levedura).

Nota-se na Tabela 4 que diversos autores obtiveram um tratamento eficiente de efluentes de baixa carga orgânica, principalmente esgoto sanitário e doméstico, mesmo com baixas temperaturas, com valores de remoção variando de 43% até maiores que 90% (LANGENHOFF; STUCKEY, 2002; HAHN; FIGUEROA, 2015). Inclusive, nos estudos apresentados, é possível observar que baixos TDH foram aplicados, que variaram de 33 a 3 horas. Barber e Stuckey, (1999) sugerem que a capacidade de se utilizar menores TDH ao se tratar tais efluentes está relacionada a maior retenção de biomassa no reator, que, por sua vez, é favorecida devido à baixa produção de biogás. Além disso, elevadas vazões de alimentação proporcionam um aumento da carga hidráulica, a qual acarreta na redução dos valores da constante de saturação do substrato (K_s) e conseqüentemente, promove maiores eficiências de tratamento (NACHAIYASIT; STUCKEY, 1997).

Entretanto, o oposto é observado no tratamento de efluentes com maiores cargas orgânicas ou concentrações de substrato ($DQO > 1000 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$), no qual maiores TDH são necessários, como pode ser observado na Tabela 5. Segundo Boopathy e Tilche, (1991), a elevada mistura promovida pela geração de biogás resulta na expansão do leito de lodo, alterando a dinâmica de transferência de massa, reduzindo a eficiência do reator quando se aplica menores TDH. Ao se considerar a cinética microbiana, elevadas concentrações de substrato promove o desenvolvimento dos microrganismos de crescimento rápido, como as bactérias acidogênicas, e outros com elevados valores de K_s (BARBER; STUCKEY, 1999). Uma estratégia atualmente desenvolvida para se contornar tal problema envolve o uso de um primeiro compartimento maior em relação aos compartimentos posteriores do reator, que favorece o crescimento do consórcio acidogênico, sem inibir os microrganismos metanogênicos (SILVA, 2015).

Além disso, a recirculação do efluente é outra estratégia adotada para redução dos efeitos negativos causados pela elevada concentração do substrato. Recentemente, Vuitik, (2017) estudou os efeitos da recirculação em um RCA no tratamento de vinhaça. O autor concluiu que o reciclo do efluente possivelmente atenuou problemas associados à alcalinização do sistema, devido a vinhaça se tratar de um efluente tóxico e recalcitrante, que acarreta a formação de altos níveis de ácidos orgânicos em termos de concentração. Em outro estudo conduzido por Sayedin et al., (2019) também aplicado ao tratamento da vinhaça (no caso da produção de etanol a partir do milho), os autores avaliaram diferentes taxas de recirculação (20, 15 e 10%). Segundo os autores, embora a eficiência de remoção da carga orgânica seja reduzida com o aumento da taxa de reciclo, a redução da concentração de ácidos voláteis foi promovida. Por fim, para ambos os trabalhos, a recirculação tornou o reator mais resistente ao acúmulo de ácidos.

Tabela 5. Tratamento de efluentes de alta carga orgânica em reatores compartimentados anaeróbios.

Tipo de água residuária	TDH (dias)	COV* (kgDQO m⁻³ dia⁻¹)	V_{reator} (L)	Número de compartimentos	Eficiência de remoção (%)	Produção de biogás (L d⁻¹)	Referência
Alimentícia ⁶	30	0,58 ± 0,17	53,5	4	85,3	4,8	Ahamed et al., (2015)
Suinocultura	2 – 0,75	5,82 – 15,52	530*	3	42 - 68	0,261 - 0,454	Oliveira et al., (2015)
Papel e celulose	1	1,58 ± 0,33	45	4	60	NM**	Alighardashi et al., (2015)
Farmacêutico ⁷	2,5 – 1,25	0,4 – 16,0	12.000*	5	77 - 91	0,281 – 0,311	Zhou et al., (2006)
Destilaria de uísque	10 - 2	0,95 – 4,75	35	10	80 - 92	10 a 20	Akunna e Clark, (2000)
Fécula de mandioca	4 – 3,5	0,5 – 2,0	4	4	83 - 92	NM**	Ferraz et al, (2009)
Fermentação ⁸	1,5	2,97 – 6,00	8	4	88	0,16 - 0,25	Zhang et al., (2011)
Vinhaça	40	0,45 ± 0,04	20	4	90 - 95	NM**	Vuitik et al., (2019)
Amido de trigo	3 – 2,5	1,33 – 2,4	13,5	5	40-67	NM**	Movahedyan et al., (2007)
Biodiesel ⁹	10	0,5 – 3,0	22	5	99	2,1 - 14,1	Phukingngam et al., (2011)
Madeira ¹⁰	2,5	1,66 ± 0,07	20	5	49 – 82,5	3,4 ± 0,23	Laohaprapanon et al., (2014)
Laticínio	3-0,5	1 – 6	25	5	>90	0,5 - 2	Santos, (2016)

* Reatores em escala piloto.

** Não mencionado.

Fonte: Autora, 2019.

⁶ Resíduos coletados junto a cantina da universidade onde o estudo ocorreu. Após a desintegração dos sólidos, os resíduos eram diluídos em água de abastecimento público.

⁷ Água residuária contendo os seguintes antibióticos: ampicilina e aereomicina. Produção de biogás em termos de L gDQO_{removida}⁻¹.

⁸ Água residuária contendo acetona, butanol e etanol em proporções de 1:1:5. Produção de biogás em termos de L gDQO_{removida}⁻¹.

⁹ Água residuárias contendo elevada concentração de metanol, óleos e graxas e glicerol na proporção de 10:1:1.

¹⁰ Água residuária contendo elevadas concentrações de formaldeído e nitrogênio.

Efluentes recalcitrantes e tóxicos são caracterizados pela difícil degradação em meio anaeróbio devido à baixa biodegradabilidade (SPEECE, 1996). O RCA, devido principalmente a sua compartimentação, foi estudado no tratamento de compostos de difícil degradação como por exemplo os efluentes de indústrias têxteis (OZDEMIR et al., 2013), solução de óleo pesado/água (JI et al., 2009), tintas (CHEN et al., 2011), antibióticos (SPONZA; DEMIRDEN, 2010), entre outros. Bell e Buckley, (2003) avaliaram o potencial de um RCA de oito câmaras no tratamento de efluente sintético de indústria têxtil (DQO ~ 40.000 mgO₂ L⁻¹) operado com um TDH de 20 h, no qual variaram a concentração de corante (*CI Reactive Red 141*) de 100 a 500 mg L⁻¹, durante 160 dias. Ao final do estudo, foi observada uma remoção média de DQO e cor de 90% e 86%, respectivamente.

Contudo, apesar da eficácia do reator compartimentado no tratamento de uma ampla gama de águas residuárias, o efluente final gerado geralmente não possui as características necessárias para se enquadrar nos padrões de qualidade de lançamento exigida pelas agências reguladoras ambientais (ZHU et al., 2015). Principalmente em se tratando de substratos com elevada concentração de matéria orgânica, tal como o melaço de soja, o RCA pode ser utilizado como uma unidade de pré-tratamento associado a um sistema aeróbio, que pode atuar como etapa final de polimento do efluente anaeróbio.

2.3.2. Tratamento combinado anaeróbio + aeróbio

Conforme apresentado na Tabela 2 do item 2.3, os sistemas de tratamento anaeróbio e aeróbio apresentam diferentes vantagens e desvantagens quando comparados isoladamente. A integração de ambos os processos permite agregar as vantagens, ao mesmo tempo que as limitações dos mesmos são reduzidas. Segundo Vera et al. (1999), processos anaeróbio-aeróbio podem reduzir em até três vezes os custos de operação quando comparados com tratamento aeróbio somente, enquanto simultaneamente resultam em alta eficiência de remoção de matéria orgânica e reduzida geração de lodo, em função da presença do tratamento anaeróbio.

Dentre as principais vantagens do sistema integrado, é possível citar (CERVANTES; PAVLOSTATHIS; VAN HAANDEL, 2015):

- Alta eficiência global do tratamento, devido ao polimento final dado ao efluente geralmente pelo processo aeróbio;
- Grande potencial de recuperação de recursos, como o biogás e lodo estabilizado, por meio do processo anaeróbio;

- Menor geração de lodo, em virtude da possibilidade de biodigestão do excesso produzido pelo processo anaeróbico, resultando também em menores custo de disposição de lodo;
- Baixo consumo de energia, sendo que o sistema de pré-tratamento anaeróbico atua como tanque de equalização do afluente, reduzindo flutuações na alimentação e levando a menor consumo de oxigênio, reduzindo a aeração do processo aeróbico.

Além disso, Callado (2001) afirma que o sistema combinado anaeróbico-aeróbico tem se mostrado como uma opção viável para o tratamento de águas residuária devido principalmente ao fato desse sistema promover a oxidação carbonácea, nitrificação, desnitrificação, remoção biológica de fósforo e remoção de organismos patogênicos. E, portanto, permite que sejam atingidos os padrões ambientais de lançamento de efluentes.

Sistemas combinados que empregam reatores anaeróbios de alta taxa seguido por reatores aeróbios estão sendo cada vez mais utilizados no tratamento de efluentes municipais e industriais (CHAN et al., 2009). De fato, o tratamento combinado anaeróbico/aeróbico não é uma proposta recente. Indústrias alimentícias, cujas águas residuárias são caracterizadas pela presença elevada de compostos orgânicos, utilizam, há tempos, sistemas combinados, devido à melhor eficiência global do processo integrado (ECKENFELDER, 1989).

Em se tratando de esgoto sanitário, diversos estudos têm obtido sucesso e grande parte dos sistemas são associações de tecnologias consolidadas no tratamento biológico como reatores UASB seguidos de lodos ativados, filtros biológicos seguidos de lodos ativados, entre outros (GRADY, JR. et al., 2011).

Inclusive, diversas estações de tratamento de esgoto sanitário (ETE) no Brasil já empregam reatores anaeróbios combinados com aeróbios em suas unidades, principalmente reatores convencionais (sistemas de lagoas). Múltiplos exemplos podem ser citados, tais como, a ETE da cidade de Matão-SP utiliza um reator UASB seguido por um sistema de lodos ativos, ETE – Piracicamirim - SP (UASB+ lodo ativados por ar difuso); ETE de Dourado - SP (UASB + Filtro biológico aerado submerso); ETE de Conchas-SP (UASB + Filtro biológico aerado submerso); ETE de Chapadão do Sul-MS (UASB+ filtro percolador aeróbico); ETE de Aparecida do Taboado – MS (UASB+ biofiltro aerado submerso), entre outros.

Em relação aos efluentes de elevada carga orgânica, em um estudo conduzido por Bustillo-Lecompte e Mehrvar, (2017) para o tratamento de efluente de abatedouro (DQO de 87 a 2000 mgO₂ L⁻¹ e 161 – 255 mgN L⁻¹), os autores empregaram um sistema combinado de um reator compartimentado anaeróbico de cinco câmaras (volume útil de 36 L) seguido de um sistema de lodos ativados (volume útil de 14 L). Foram avaliados os efeitos de vazão, pH,

concentração do afluente relacionados a eficiência de remoção e rendimento da produção de biogás. Os autores obtiveram uma produção de biogás, remoção de matéria orgânica e nitrogênio total (NT) de 117 ml min^{-1} , 85% e 72%, respectivamente.

Sistemas de reatores de alta taxa que incorporam os processos anaeróbio e aeróbio em uma única planta estão sendo desenvolvidos e testados para reduzir custos e otimizar os processos. Estudos são focados, principalmente, em efluentes de unidades industriais, que geralmente apresentam elevada carga orgânica, alta concentração de sólidos e nutrientes, além de compostos recalcitrantes e tóxicos (LERNER; STAHL; GALIL, 2007).

A combinação das vias metabólicas anaeróbia e aeróbia em um único reator pode promover o aumento da eficiência global de degradação biológica. Reatores integrados geralmente apresentam melhor custo-benefício, maiores eficiências e menores pegadas ecológicas (*foot prints*) quando comparados aos sistemas não integrados (TARTAKOVSKY; MANUEL; GUIOT, 2005). Tais reatores podem ser divididos em duas categorias: sem ou com separação física dos processos biológicos. Alguns exemplos são apresentados na Tabela 6, na qual é possível observar que elevadas eficiência de remoção de matéria orgânica foram obtidas, variando de 84 até 99,7%, mesmo para baixos TDH (6 horas).

Yang e Zhou, (2008) avaliaram o tratamento de chorume, efluente caracterizado pela elevada concentração de compostos de difícil degradação, em um reator simultâneo anaeróbio–aeróbio em escala piloto (volume útil de 600 L + 200 L). Os autores obtiveram uma alta eficiência de remoção de compostos orgânicos tóxicos presentes no chorume, como compostos aromáticos, alcanos saturados e refratários que foram 100% removidos.

A investigação sobre tratamentos que integram o processo anaeróbio e aeróbio em um único reator integrado, seja com ou sem separação, são limitados a poucos estudos e conseqüentemente reduzida implantação em escala industrial. No entanto, conforme pode ser observado na Tabela 6, os resultados obtidos, seja em escala de laboratório ou piloto, indicam que tais reatores podem ser utilizados no tratamento de uma ampla variedade de efluentes (CHAN et al., 2009).

Tabela 6. Reatores integrados com e sem separação física entre as fases anaeróbia e aeróbia.

Reator integrado		Tipo de água residuária	DQO (mgO ₂ L ⁻¹)	Eficiência de Remoção geral (%)	Eficiência Anaeróbio (%)	Eficiência Aeróbio (%)	TDH (dias)	Referência
Com separação física	Reator radial anaeróbio/aeróbio com biomassa imobilizada	Esgoto sanitário	345 ± 33	84	NM*	NM	0,3 - 0,8	Garbossa et al., (2005)
	Reator integrado anaeróbio – aeróbio	Óleo de palma	13.700 - 68.550	99,7	92,6	7,1	13	Chan; Chong; Law, (2012)
	Reator de membranas compartimentado anaeróbio/aeróbio	Cervejaria	700 - 1200	NM	74	NM	0,9 - 1,8	Liu et al., (2017)
	Reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo	Esgoto sanitário	389 ± 70	76	65	30	0,25 – 0,5	Abreu; Zaiat, (2008)
	Reator simultâneo anaeróbio - aeróbio	Chorume diluído	1000 - 3000	94	NM	NM	2,5 - 1,7	Yang; Zhou, (2008)
Sem separação física	Reator integrado de leito fixo anaeróbio – aeróbio	Abatedouro	1190 - 2800	93	0,6-1,2	97	0,94 - 3,8	Del Pozo; Diez, (2005)
	Reator de leito fluidizado anaeróbio-aeróbio ¹¹	Esgoto municipal	350	> 80	NM	NM	1	Fdez-Polanco; Real; Garcia, (1994)
	Reator de membranas anaeróbio-aeróbio	Sintética	1300-10500	>99	60-80	95	1,6	Zhang et al., (2005)
	Reator de leito fixo de fluxo ascendente integrado anaeróbio-aeróbio	Sintética	365 - 3500	95-98	27-70	37-92	0,375	Moosavi et al., (2005)

* Não mencionado.

Fonte: Autora, 2019.

¹¹ Reator em escala real, com volume total de 5,3 m³, utilizado no tratamento de esgoto municipal.

2.3.3. *Reator compartimentado anaeróbio/ aeróbio*

Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio (RCAA) é um exemplo de reator integrado com separação física entre as fases. Porém, poucos exemplos são encontrados na literatura. Os principais estudos focaram no tratamento de esgoto sanitário (baixa a média carga orgânica), como em Zanella (1999), Silva (2001), Bodík et al. (2002) e Silva (2015).

Zanella (1999) avaliou a partida de um RCAA em escala piloto com o volume total de 2,5 m³ sem inoculação prévia para o tratamento de esgoto sanitário proveniente da rede pública da cidade de Limeira – SP. O reator era composto por quatro câmaras, sendo a última aeróbia. Variando o TDH de 30 a 10 horas, o autor concluiu que o reator apresentou boa eficiência de remoção de matéria orgânica (72% para DQO e 76% para DBO) e de sólidos totais (62%). Inclusive, o autor afirma que a câmara aeróbia proporcionou a obtenção de um efluente com bom aspecto visual e melhor odor quando comparado ao efluente anaeróbio.

Silva (2001) estudou um RCAA de quatro câmaras em escala piloto (2,5 m³) por um período total de 444 dias. Após a quarta câmara (aeróbia), foi instalado um decantador do tipo laminar, no qual o excesso de lodo gerado foi recirculado à última câmara. O TDH aplicado variou de 7 a 16 horas, no qual os melhores valores de remoção de DBO₅ (56,9 a 95,7%), DQO total (31,4 a 95,6%) e sólidos totais (21,0 a 97,3%) foram obtidos para o TDH de 8 horas. O autor pôde concluir que a configuração do sistema em compartimentos promove adequado tratamento do esgoto aliado a uma produção de lodo aeróbio de fácil gerenciamento.

Bodík et al. (2002) desenvolveram dois RCAA de sete câmaras (escala piloto) para o tratamento de esgoto sanitário e remoção de nitrogênio. A primeira câmara consistia em um tanque de sedimentação preliminar com um volume útil de 0,25 m³. As quatro câmaras anaeróbias foram preenchidas com um material plástico (tubos de diâmetro de 2 a 4 cm para o reator 1 e 8 cm para o reator 2). As duas últimas câmaras foram aeradas com um ar proveniente de um compressor, sendo que a última câmara atuou como um decantador. Os autores avaliaram a influência da temperatura, a qual variou de 4,5 a 23°C. Como resultado, 78,6 a 83% de eficiência de remoção de DQO foi obtida, além de intenso processo de nitrificação, mesmo para baixas temperaturas (5,9°C), no qual a remoção média de amônia variou de 46,4 a 87,3%.

Silva (2015) desenvolveu uma nova configuração de RCAA de quatro câmaras para o tratamento de esgoto sanitário proveniente de banheiros públicos e lavatórios do campus da Universidade de Bauru- SP. A carga orgânica aplicada variou de 0,06 a 0,61 kgDQO m³ d⁻¹. O reator foi construído com tubulação de policloreto de vinila (PVC), no qual a primeira câmara possuía um volume maior quando comparado às câmaras subsequentes (405 L e 96 L), sendo que na última câmara (aeróbia) foi adicionado anéis de bambu como meio suporte. A autora

avaliou quatro TDH (33; 22; 16,5 e 8,25 horas) e obteve uma eficiência média de remoção de DQO, DBO e sólidos em suspensão de 77%, 70% e 90%, respectivamente.

Em se tratando de efluente sanitário, os autores demonstraram que o RCAA é bastante promissor, e vantajoso, principalmente para o uso em pequenas comunidades, devido principalmente às vantagens citadas anteriormente (Item 2.3.2).

Com relação a efluentes com alta carga orgânica, como o melaço de soja, Wang et al. (2009) avaliaram o tratamento de efluente de indústria alimentícia ($1000 - 4500 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$) em um RCAA modificado com 3 compartimentos anaeróbios e 1 compartimento aeróbio, no qual a biomassa aeróbia foi imobilizada em carvão vegetal. Foi observada a remoção máxima de DQO de 98%, além de redução da concentração de ácidos voláteis ao longo do reator. Devido à câmara aeróbia, foi possível, segundo o autor, obter um efluente final com concentração de DQO menor que $200 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$, dentro dos padrões de emissão da legislação local.

Deng et al., (2019) desenvolveram um RCAA híbrido com quatro compartimentos aplicado no tratamento de água residuária de suinocultura, caracterizada pela elevada concentração de nitrogênio amoniacal e baixa concentração de material carbonácea (baixa relação DQO/NTK). O reator possuía um volume total de 24 L, sendo que os quatro compartimentos foram preenchidos com anéis de PVC de porosidade em torno de 98% como material suporte e o TDH foi mantido em 36 h. As duas últimas câmaras do reator foram supridas com oxigênio por meio de um compressor de ar controlado por um rotâmetro para manter a concentração de OD em $2,5 \text{ mg L}^{-1}$. Os autores obtiveram eficiências médias de remoção de DQO, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ e NT de 87%, 100% e 91,3%, respectivamente.

6. CONCLUSÕES

Baseando-se nos objetivos inicialmente propostos, juntamente com resultados obtidos, as principais conclusões oriundas do presente trabalho incluem:

O reator compartimentado anaeróbio/ aeróbio apresentou potencial para o aproveitamento do melaço de soja e produção de biogás, com destaque aos altos valores de remoção de carga orgânica obtidos, tanto com relação à remoção anaeróbia quanto aeróbia. Durante a etapa I, a fase 5 apresentou os melhores resultados em relação as médias de remoção de DQO, atingindo valores superiores a 95% no sistema anaeróbio e 97% no sistema completo, ao se aplicar uma carga máxima de $3 \text{ kgDQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Já a etapa II, os melhores resultados foram obtidos na fase 4, na qual as médias de remoção foram superiores a 82% no sistema anaeróbio e 88,4% no sistema completo, ao se aplicar uma carga máxima de $2,0 \text{ kgDQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$.

A câmara aeróbia teve fundamental importância ao atuar como etapa de polimento final do efluente proveniente das câmaras anaeróbias, garantindo a obtenção de um efluente com bom aspecto visual, melhor odor e baixas concentrações médias de DQO e SST, variando de 34,4 a 763,8 $\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ e 12,0 a 108,0 mgSST L^{-1} respectivamente, na etapa I; 147,1 a 1736,6 $\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ e 50,0 a 237,0 mgSST L^{-1} , respectivamente na etapa II.

Em termos operacionais, os resultados obtidos indicam que o RCAA se comporta como um sistema anaeróbio de duas fases. O acúmulo de ácidos voláteis devido às características do melaço de soja e ao aumento da COV permitiu uma diferenciação na função das câmaras ao longo do reator. Por meio de análise dos perfis de ácidos orgânicos, pode-se concluir que, a fase fermentativa-acidogênica do processo anaeróbio foi predominante na primeira câmara do reator, ao mesmo tempo que a segunda câmara atuou como uma etapa de transição da fase acidogênica-metanogênica, sendo esta última dominante na terceira câmara do RCAA.

Com relação aos efeitos da recirculação do efluente tratado, tal estratégia possivelmente atenuou maiores problemas associados à alcalinização do sistema principalmente ao se aplicar baixas cargas orgânicas, compensando os acúmulos de ácidos orgânicos observados na primeira câmara e dispensando o uso de um agente alcalinizante. No entanto, ao se utilizar maiores vazões de alimentação, observou-se elevado acúmulo de ácidos, prejudicando o efeito de tamponamento, sendo extremamente necessário a complementação ao meio de alimentação com um composto alcalinizante.

Logo, pode-se concluir que, devido a elevada concentração de carboidratos e açúcares fermentescíveis no melaço de soja, a etapa de hidrólise desses compostos é muito mais rápida, tornando a etapa metanogênica limitante do processo anaeróbio. O tamponamento do melaço

de soja com um composto alcalinizante é essencial para o processo de degradação anaeróbio do melaço de soja, principalmente em elevadas COV aplicadas.

Neste trabalho houve enorme dificuldade em mensurar continuamente e de forma confiável a produção de biogás. Além disso, não foi possível analisar a concentração em termos de metano presente no biogás gerado em todas as fases de operação. No entanto, para as fases 1, 3, 4 e 6 da etapa 1, verificou-se que biogás produzido foi composto principalmente por CO₂ e CH₄, apresentando porcentagens médias deste último entre 64,2 a 86%. Inclusive, não foi detectada a presença de gás sulfídrico (H₂S) em nenhuma das fases, o que evidencia o potencial de produção de biogás de excelente qualidade a partir do melaço de soja.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios hidrodinâmicos nas diferentes condições impostas ao reator mostraram adiantamento na resposta do traçador, devido principalmente a presença de curtos-circuitos (33 – 61%), zonas de estagnação hidráulicas e biológicas (17-37%) e a formação de caminhos preferenciais. Além disso, pode-se concluir que o padrão de escoamento se aproximou ao modelo do tipo intermediário entre o pistonado e o mistura perfeita, apresentando maiores graus de dispersão nos ensaios com presença de biomassa no reator, quando comparado aos ensaios sem a presença de biomassa.

8. REFERÊNCIAS

ABREU, S.; ZAIAT, M. Desempenho de reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo no tratamento de esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 181–188, 2008.

ACHINAS, S.; ACHINAS, V.; EUVERINK, G. J. W. A technological overview of biogas production from biowaste. **Engineering**, v. 3, n. 3, p. 299–307, 2017.

ADORNO, M.; HIRASAWA, J.; VARESCHE, M. Development and validation of two methods to quantify volatile acids. **American Journal of Analytical Chemistry**, v. 5, p. 406–414, 2014.

AHAMED, A. et al. Multi-phased anaerobic baffled reactor treating food waste. **Bioresource Technology**, v. 182, p. 239–244, 2015.

AHNERT, M.; KUEHN, V.; KREBS, P. Temperature as an alternative tracer for the determination of the mixing characteristics in wastewater treatment plants. **Water Research**, v. 44, n. 6, p. 1765–1776, 1 mar. 2010.

AHRING, B. K.; SANDBERG, M.; ANGELIDAKI, I. Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 43, n. 3, p. 559–565, 1995.

AKUNNA, J.; CLARK, M. Performance of a granular-bed anaerobic baffled reactor (GRABBR) treating whisky distillery wastewater. **Bioresource Technology**, v. 74, n. 3, p. 257–261, 2000.

ALGAPANI, D. E. et al. Bio-hydrogen and bio-methane production from food waste in a two-stage anaerobic digestion process with digestate recirculation. **Renewable Energy**, v. 130, p. 1108–1115, 1 jan. 2019.

ALIGHARDASHI, A.; MODANLOU, M.; JAMSHIDI, S. Performance evaluation of anaerobic baffled reactor (ABR) treating pulp and paper wastewater in start-up period. **Water Practice and Technology**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2015.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21st ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Estatística**. São Paulo: ABIOVE, 2020. Disponível em: <http://abiove.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 10 jan. 2020.

BACHMANN, A.; BEARD, V. L.; MCCARTY, P. L. Performance characteristics of the anaerobic baffled reactor. **Water Research**, v. 19, n. 1, p. 99–106, 1985.

BALOCH, M. I. Methanogenic granular sludge as a seed in an anaerobic baffled reactor. **Water and Environment Journal**, v. 25, n. 2, p. 171–180, 2011.

BALOCH, M. I.; AKUNNA, J. C.; COLLIER, P. J. Assessment of Morphology for

- Anaerobic-Granular Particles. **Water Environment Research**, v. 78, n. 6, p. 643–646, 2006.
- BARBER, W. P.; STUCKEY, D. C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review. **Water Resources**, v. 33, n. 7, p. 1559–1578, 1999.
- BARROS, F. G.; CAMPOS, R. Tratamento de esgoto sanitário por reator anaeróbio compartimentado. *In*: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 23., La Havana, 1992. **Anais** [...]. La Havana: [s.n.], 1992. p. 297-307.
- BELL, J.; BUCKLEY, C. A. Treatment of a textile dye in the anaerobic baffled reactor. **Water SA**, v. 29, n. 2, p. 129–134, 2003.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **AGROSTAT**: estatísticas de comércio exterior do agronegócio brasileiro. Brasília: MAPA, 2020. Disponível em: <http://indicadores.agricultura.gov.br/index.htm> Acesso em: 10 jan. 2020.
- BODÍK, I. et al. Municipal wastewater treatment in the anaerobic-aerobic baffled filter reactor at ambient temperature. **Water Science and Technology**, v. 46, n. 8, p. 127–135, 2002.
- BODKHE, S. Y. A modified anaerobic baffled reactor for municipal wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 8, p. 2488–2493, 2009.
- BOOPATHY, R.; TILCHE, A. Anaerobic digestion of high strength molasses wastewater using hybrid anaerobic baffled reactor. **Water Research**, v. 25, n. 7, p. 785–790, July 1991.
- BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; MEHRVAR, M. Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic–aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: An optimization study towards a cleaner production in the meat processing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 278–289, Jan. 2017.
- CALLADO, N. H. **Reatores sequenciais em batelada em sistema anaeróbio/ aeróbio tratando esgoto sanitário sintético em com remoção de nutrientes**. 2001. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001.
- CAMILO, B. F. **Seleção de isolados bacterianos para produção de polihidroxialcanoatos (PHA) a partir de melaço de soja Seleção de isolados bacterianos para produção de polihidroxialcanoatos (PHA) a partir de melaço de soja**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Instituto de Ciências Biomédicas, São Paulo, 2016.
- CERVANTES, F.; PAVLOSTATHIS, S.; VAN HAANDEL, A. **Advanced biological treatment processes for industrial wastewaters: principles & applications**. 5th ed. London: IWA, 2015. v. 5.
- CHAN, Y. J. et al. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 155, n. 1–2, p. 1–18, 2009.
- CHAN, Y. J.; CHONG, M. F.; LAW, C. L. An integrated anaerobic–aerobic bioreactor (IAAB) for the treatment of palm oil mill effluent (POME): Start-up and steady state performance. **Process Biochemistry**, v. 47, n. 3, p. 485–495, Mar. 2012.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4044–4064, July 2008.

CHEN, Z.-B. et al. Improving the simultaneous removal efficiency of COD and color in a combined HABMR–CFASR system based MPDW. Part 1: Optimization of operational parameters for HABMR by using response surface methodology. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 19, p. 8839–8847, Oct. 2011.

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**. 5. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. **Anaerobic reactors**. London: IWA, 2007.

CITELLI, I. R. et al. Avaliação da geração de metano por diferentes inóculos utilizando glicerol e melão de soja como substrato. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., 2017, São Carlos. **Anais [...]** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2017. p. 1503–1508.

COHEN, A. et al. Influence of phase separation on the anaerobic digestion of glucose—I maximum COD-turnover rate during continuous operation. **Water Research**, v. 14, n. 10, p. 1439–1448, Jan. 1980.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Brasília: CONAMA. 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso: 15 out. 2019.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília: CONAMA, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 15 out. 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Soja. **Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos**, v. 7, n. 4, p. 20-21, jan. 2020.

CONCEIÇÃO, V. M. **Reator anaeróbio serial (RAS) aplicado no processamento de vinhaça de cana-de-açúcar**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2016.

DA SILVA, J. et al. Performance of an anaerobic baffled reactor with an aerobic chamber treating low-strength wastewater. **Desalination and Water Treatment**, v. 100, p. 1–10, 2017.

DE 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.

DEL NERY, V. et al. Long-term operating performance of a poultry slaughterhouse wastewater treatment plant. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 102–114, Mar. 2007.

DEL POZO, R.; DIEZ, V. Integrated anaerobic–aerobic fixed-film reactor for slaughterhouse wastewater treatment. **Water Research**, v. 39, n. 6, p. 1114–1122, Mar. 2005.

DENG, K. et al. Practicing anammox in a novel hybrid anaerobic-aerobic baffled reactor for treating high-strength ammonium piggery wastewater with low COD/TN ratio. **Bioresource Technology**, v. 294, p. 122193, Dec. 2019.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O. E. Volatile acids by direct titration. **Water Pollution Control Federation**, v. 33, n. 4, p. 356–365, 1961.

DONG, J. **Butanol production from lignocellulosic biomass and agriculture residues by acetone-butanol-ethanol fermentation**. 2014. Dissertation (Doctor of Philosophy) - Ohio State University, Columbus, 2014.

ECKENFELDER, W. W. **Industrial water pollution control**. New York: McGraw-Hill, 1989.

ERICKSON, D. R. Overview of modern soybean processing and links between processes. *In*: ERICKSON, D. R. (ed). **Practical handbook of soybean processing and utilization**. Urbana: AOCS Press, 1995a. Chap. 5, p. 56–64.

ERICKSON, D. R. Degumming and Lecithin Processing and Utilization. *In*: ERICKSON, D. R. (ed). **Practical handbook of soybean processing and utilization**. Urbana: AOCS Press, 1995b. Chap. 10, p. 174–183.

FAISAL, M.; UNNO, H. Kinetic analysis of palm oil mill wastewater treatment by a modified anaerobic baffled reactor. **Biochemical Engineering Journal**, v. 9, n. 1, p. 25–31, Nov. 2001.

FALK, H. **Monitoring the anaerobic digestion process**. 2011. Thesis (Doctor of Philosophy in Biochemical Engineering) - Jacobs University, School of Engineering and Science, Bremen, 2011.

FDEZ-POLANCO, F.; REAL, F. J.; GARCIA, P. A. Behaviour of an anaerobic/aerobic pilot scale fluidized bed for the simultaneous removal of carbon and nitrogen. **Water Science and Technology**, v. 29, n. 10–11, p. 339–346, 1994.

FENG, H. et al. Anaerobic domestic wastewater treatment with bamboo carrier anaerobic baffled reactor. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 62, n. 3, p. 232–238, 2008.

FERRAZ, F. M.; BRUNI, A. T.; DEL BIANCHI, V. L. Performance of an anaerobic baffled reactor (abr) in treatment of cassava wastewater. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 40, n. 1, p. 48–53, 2009.

FUJIHIRA, T. et al. High-rate anaerobic treatment system for solid/lipid-rich wastewater using anaerobic baffled reactor with scum recovery. **Bioresource Technology**, v. 263, p. 145–152, 2018.

GARBOSSA, L. H. P. et al. Development and evaluation of a radial anaerobic/aerobic reactor treating organic matter and nitrogen in sewage. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 4, p. 511–519, 2005.

GOPALA KRISHNA, G. V. T.; KUMAR, P.; KUMAR, P. Treatment of low-strength soluble wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR). **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 1, p. 166–176, Jan. 2009.

GRADY, JR., C. P. L. et al. **Biological wastewater treatment**. 3rd ed. London: IWA, 2011.

GROBICKI, A. **Hydrodynamic characteristics and performance of the anaerobic baffled reactor**. 1989. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of London, Imperial College, London, 1989.

GROBICKI, A.; STUCKEY, D. C. Hydrodynamic characteristics of the anaerobic baffled reactor. **Water Research**, v. 26, n. 3, p. 371–378, Mar. 1992.

GROVER, R.; MARWAHA, S. S.; KENNEDY, J. F. Studies on the use of an anaerobic baffled reactor for the continuous anaerobic digestion of pulp and paper mill black liquors. **Process Biochemistry**, v. 34, n. 6–7, p. 653–657, 1999.

HAHN, M. J.; FIGUEROA, L. A. Pilot scale application of anaerobic baffled reactor for biologically enhanced primary treatment of raw municipal wastewater. **Water Research**, v. 87, p. 494–502, 2015.

HAYES, D. J. et al. The biofine process – production of levulinic acid, furfural, and formic acid from lignocellulosic feedstocks, in biorefineries-industrial processes and products: status quo and future directions. **Biorefineries: Industrial Processes and Products**, v. 1, p. 139–164, 2006.

HU, S. et al. The development of a novel hybrid aerating membrane-anaerobic baffled reactor for the simultaneous nitrogen and organic carbon removal from wastewater. **Water Research**, v. 43, n. 2, p. 381–388, 2009.

HULSHOFF POL, L. W. et al. Anaerobic sludge granulation. **Water Research**, v. 38, n. 6, p. 1376–1389, 2004.

Jl, G. D. et al. Anaerobic baffled reactor (ABR) for treating heavy oil produced water with high concentrations of salt and poor nutrient. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 3, p. 1108–1114, Feb. 2009.

JIMÉNEZ, A. M.; BORJA, R.; MARTÍN, A. Aerobic–anaerobic biodegradation of beet molasses alcoholic fermentation wastewater. **Process Biochemistry**, v. 38, n. 9, p. 1275–1284, Apr. 2003.

- KE, S.; SHI, Z.; FANG, H. H. P. Applications of two-phase anaerobic degradation in industrial wastewater treatment. **International Journal of Environment and Pollution**, v. 23, n. 1, p. 65, 2005.
- LALBAHADUR, T. et al. Microbiological studies of an anaerobic baffled reactor: Microbial community characterisation and deactivation of health-related indicator bacteria. **Water Science and Technology**, v. 51, n. 10, p. 155–162, 2005.
- LANGENHOFF, A. A.; INTRACHANDRA, N.; STUCKEY, D. C. Treatment of dilute soluble and colloidal wastewater using an anaerobic baffled reactor: influence of hydraulic retention time. **Water Research**, v. 34, n. 4, p. 1307–1317, Mar. 2000.
- LANGENHOFF, A.; STUCKEY, D. C. Treatment of dilute wastewater using an anaerobic baffled reactor: effect of low temperature. **Water Research**, v. 34, n. 15, p. 3867–3875, 2002.
- LAOHAPRAPANON, S.; MARQUESA, M.; HOGLAND, W. Anaerobic baffled reactor coupled with chemical precipitation for treatment and toxicity reduction of industrial wastewater. **Environmental Technology**, v. 35, n. 2, p. 154–162, 2014.
- LEITE, J. A. C. et al. Application of an anaerobic packed-bed bioreactor for the production of hydrogen and organic acids. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 2, p. 579–586, 2008.
- LERNER, M.; STAHL, N.; GALIL, N. Aerobic vs. anaerobic-aerobic biotreatment: Paper mill wastewater. **Environmental Engineering Science**, v. 24, n. 3, p. 277–285, 2007.
- 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. Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 67, n. 1995, p. 3–28, 1995.
- LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- LIU, J. et al. The brewery wastewater treatment and membrane fouling mitigation strategies in anaerobic baffled anaerobic/aerobic membrane bioreactor. **Biochemical Engineering Journal**, v. 127, p. 53–59, 2017.
- LOMAN, A. Al; 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.
- LUO, L.; WONG, J. W. C. Enhanced food waste degradation in integrated two-phase anaerobic digestion: effect of leachate recirculation ratio. **Bioresource Technology**, v. 291, p. 121813, Nov. 2019.
- LUSAS, E. W.; RHEE, K. C. Soy Protein Processing and Utilization. *In*: ERICKSON, D. R. (ed). **Practical handbook of soybean processing and utilization**. Urbana: AOCS Press, 1995. Chap. 8, p. 117–160.

- MACHADO, R. P. **Produção de etanol a partir de melão de soja**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química, Porto Alegre, 1999.
- MANARIOTIS, I. D.; GRIGOROPOULOS, S. G. Low-strength wastewater treatment using an anaerobic baffled reactor. **Water Environment Research**, v. 74, n. 2, p. 170–176, 2002.
- MANDARINO, J. M. G.; ROESSING, A. C. **Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos**. Londrina: Embrapa Soja, 2001.
- MCCARTY, P. L. The developmental of anaerobic treatment and its future. **Water Science and Technology**, v. 44, n. 8, p. 149–156, 2001.
- MCCARTY, P. L.; SMITH, D. P. Anaerobic wastewater treatment process. **Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 12, p. 1200–1206, 1986.
- MEDIC, J.; ATKINSON, C.; HURBURGH, C. R. Current knowledge in soybean composition. **JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 91, n. 3, p. 363–384, 2014.
- METCALF, L. .; EDDY, H. P. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- MIELLENZ, J. R.; BARDSLEY, J. S.; WYMAN, C. E. Fermentation of soybean hulls to ethanol while preserving protein value. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 14, p. 3532–3539, July 2009.
- MIRANDA, L. **Produção de fermentado acético a partir de melão de soja**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências de Alimentos) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Londrina, 2017.
- MONTELONGO, J. L.; CHASSY, B. M.; MCCORD, J. D. Lactobacillus salivarius for Conversion into Lactic Acid of Soy Molasses. **Journal of Food Science**, v. 58, n. 4, p. 863–866, 1993.
- MOOSAVI, G. R. et al. Feasibility of development and application of an up-flow anaerobic/aerobic fixed bed combined reactor to treat high strength wastewaters. **Journal of Applied Sciences**, v. 5, n. 1, p. 169–171, 2005.
- MORGAN-SAGASTUME, J. M.; JIMÉNEZ, B.; NOYOLA, A. Tracer studies in a laboratory and pilot scale uasb reactor. **Environmental Technology**, v. 18, n. 8, p. 817–825, 1997.
- MOSEY, F. E. Mathematical Modelling of the Anaerobic Digestion Process: Regulatory Mechanisms for the Formation of Short-Chain Volatile Acids from Glucose. **Water Science and Technology**, v. 15, n. 8–9, p. 209–232, 1983.
- MOVAHEDYAN, H.; ASSADI, A.; PARVARESH, A. Performance evaluation of an anaerobic baffled reactor treating wheat flour starch industry wastewater. **Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering**, v. 4, n. 2, p. 77–84, 2007.

NACHAIYASIT, S.; STUCKEY, D. C. The effect of shock loads on the performance of an anaerobic baffled reactor (ABR). 1. Step changes in feed concentration at constant retention time. **Water Research**, v. 31, n. 11, p. 2737–2746, 1997.

NASR, F. A.; DOMA, H. S.; NASSAR, H. F. Treatment of domestic wastewater using an anaerobic baffled reactor followed by a duckweed pond for agricultural purposes. **Environmentalist**, v. 29, n. 3, p. 270–279, 2009.

NASR, M. et al. Comparative performance between conventional and hybrid anaerobic baffled reactors for treating dairy wastewater. **International Journal of Chemical and Environmental Engineering**, v. 5, n. 4, 2014.

NETO, J. G. et al. Quantificação de biogás em reatores anaeróbios através do método de deslocamento de volume de água. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 16, n. 1, p. 45–53, 2014.

OBENDORF, R L.; KOSINA, S. M. Soluble carbohydrates in soybean. *In*: Ng, T. B. (ed.) **Soybean: biochemistry, chemistry and physiology**. Rijeka: InTech Open, 2008. Chap. 13, p. 201–228.

OLIVEIRA, R. A. de; DUDA, R. M.; FERNANDES, G. F. R. Reator anaeróbio compartimentado para o tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 383–391, 2015.

OZDEMIR, S. et al. Treatment of azo dye-containing synthetic textile dye effluent using sulfidogenic anaerobic baffled reactor. **Bioresource Technology**, v. 146, p. 135–143, Oct. 2013.

PEÑA, M. R.; MARA, D. D.; AVELLA, G. P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, v. 40, n. 3, p. 445–452, 2006.

PHUKINGNGAM, D. et al. Anaerobic baffled reactor treatment of biodiesel-processing wastewater with high strength of methanol and glycerol: Reactor performance and biogas production. **Chemical Papers**, v. 65, n. 5, p. 644–651, 2011.

POLPRASERT, C.; TRAN, F. T. Anaerobic baffle reactor (ABR) process for treating a slaughterhouse wastewater. **Environmental Technology**, v. 13, n. 9, p. 857–865, 1992.

QURESHI, N.; LOLAS, A.; BLASCHEK, H. P. Soy molasses as fermentation substrate for production of butanol using *Clostridium beijerinckii* BA101. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 26, p. 290–295, 2001.

RAJESHWARI, K. V. et al. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 4, n. 33, p. 1–7, 2000.

REYNAUD, N.; BUCKLEY, C. A. The anaerobic baffled reactor (ABR) treating communal wastewater under mesophilic conditions: A review. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 3, p. 463–478, 2016.

- RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of High-Strength Wastes. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 58, n. 5, p. 406–411, 1986.
- RITTMANN, B. E.; MCCARTY, P. L. **Environmental biotechnology: principles and applications**. Boston: Tata McGraw-Hill Education, 2001.
- RODRIGUES, B. C. G. **Aproveitamento do melaço de soja para produção de biometano em reator UASB**. 2019. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 2019.
- RODRIGUES, B. C. G.; ARAUJO, M. L. G. C.; SARTI, A. Aproveitamento do melaço de soja para produção de biogás em reator UASB. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA*, 22., 2018, São Paulo. **Anais [...]**. [S.l.:s.n.], 2018.
- ROMÃO, B. et al. Ethanol production from hydrolyzed soybean molasses. **Energy & Fuels**, v. 26, p. 2310–2316, 2012.
- SABRY, T. Application of the UASB inoculated with flocculent and granular sludge in treating sewage at different hydraulic shock loads. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4073–4077, 2008.
- SANTOS, C. C. A. dos. **Tratamento de efluente de laticínio em reator anaeróbio compartimentado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Pirassununga, 2016.
- SÃO PAULO (Estado). **Decreto n° 8.468, de 08 de setembro de 1976**. Aprova o Regulamento da Lei 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. São Paulo: Estado, 1976.
- SARATHAI, Y.; KOOTTATEP, T.; MOREL, A. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system. **Journal of Environmental Sciences**, v. 22, n. 9, p. 1319–1326, Sept. 2010.
- SARITPONGTEERAKA, K.; CHAIPRAPAT, S. Effects of pH adjustment by parawood ash and effluent recycle ratio on the performance of anaerobic baffled reactors treating high sulfate wastewater. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 18, p. 8987–8994, 2008.
- SAYEDIN, F.; KERMANSHAHI-POUR, A.; HE, Q. S. Evaluating the potential of a novel anaerobic baffled reactor for anaerobic digestion of thin stillage: Effect of organic loading rate, hydraulic retention time and recycle ratio. **Renewable Energy**, v. 135, p. 975–983, 2019.
- SAYEDIN, F.; KERMANSHAHI-POUR, A.; HE, S. (Quan). Anaerobic digestion of thin stillage of corn ethanol plant in a novel anaerobic baffled reactor. **Waste Management**, v. 78, p. 541–552, 2018.
- SILVA, C. R. **Remoção de galactooligosacarídeos em melaço de soja para obtenção de produtos de interesse industrial**. 2010. Tese (*Doctor Scientiae*) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Bioquímica e Biologia Molecular, Viçosa, 2010.

- SILVA, G. H. R. da. **Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio, tratando esgoto sanitário: desempenho e operação**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Limeira, 2001.
- SILVA, J. A. da. **Nova configuração de um reator compartimentado anaeróbio/aeróbio para o tratamento de esgoto sanitário de baixa carga**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015.
- SILVA, J. A. da; SILVA, G. H. R. da; SARTI, A. Tratamento de esgoto sanitário de baixa carga utilizando reator compartimentado anaeróbio/aeróbio em escala piloto. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 539–549, 2016.
- SIQUEIRA, P. F. **Production of bio-ethanol from soybean molasse by *Saccharomyces cerevisiae***. 2007. Dissertação (Mestrado em Processos Biotecnológicos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- 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, n. 17, p. 8156–8163, 2008.
- SKIADAS, I. V.; LYBERATOS, G. The periodic anaerobic baffled reactor. **Water Science and Technology**, v. 38, n. 8–9, p. 401–408, 1998.
- SNYDER, H. E.; KWON, T. W. **Soybean utilization**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987.
- SOLAIMAN, D. K. Y. et al. Production of sophorolipids by *Candida bombicola* grown on soy molasses as substrate. **Biotechnology Letters**, v. 26, n. 15, p. 1241–1245, 2004.
- SOLAIMAN, D. K. Y. et al. Biosynthesis of medium-chain-length Poly(hydroxyalkanoates) from soy molasses. **Biotechnology Letters**, v. 28, n. 3, p. 157–162, 2006.
- SPEECE, R. E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. **Environmental Science and Technology**, v. 17, n. 9, p. 416A-427A, 1983.
- SPEECE, R. E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters**. Nashville: Archae Press, 1996.
- SPEECE, R. E. et al. The role of process configuration in the performance of anaerobic systems. **Water Science and Technology**, v. 36, n. 6–7, p. 539–547, Jan. 1997.
- SPEHAR, C. R. Impact of strategic genes in soybean on agricultural development in the Brazilian tropical savannahs. **Field Crops Research**, v. 41, n. 3, p. 141–146, June 1995.
- SPONZA, D. T.; DEMIRDEN, P. Relationships between chemical oxygen demand (COD) components and toxicity in a sequential anaerobic baffled reactor/aerobic completely stirred reactor system treating Kemicetine. **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, n. 1–3, p. 64–75, Apr. 2010.

- TARTAKOVSKY, B.; GUIOT, S. R. Modeling and analysis of layered stationary anaerobic granular biofilms. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 54, n. 2, p. 122–130, 1997.
- TARTAKOVSKY, B.; MANUEL, M.-F.; GUIOT, S. R. Degradation of trichloroethylene in a coupled anaerobic–aerobic bioreactor: Modeling and experiment. **Biochemical Engineering Journal**, v. 26, n. 1, p. 72–81, Nov. 2005.
- THACKSTON, E. L.; SHIELDS JR, DOUGLAS, F.; SCHROEDER, P. R. Residence Time Distributions of Shallow Basins. **Journal of Environmental Engineering**, v. 113, n. 6, p. 1319–1332, 1987.
- TOMAZIN JUNIOR, C. **Extração de óleo de soja com etanol e transesterificação etílica na miscela**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2008.
- TOMLINSON, E. J.; CHAMBERS, B. **The effect of longitudinal mixing on the settleability of activated sludge**. Medmenham: Water Research Centre, 1979.(Technical Report TR; 122).
- TORABIAN, A. et al. Treatment of low-strength industrial wastewater using anaerobic baffled reactor. **Journal of Environmental Health Science & Engineering**, v. 7, n. 3, p. 229–240, 2010.
- VAN LIER, J. B. High-rate anaerobic wastewater treatment: diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques. **Water Science and Technology**, v. 57, n. 8, p. 1137–1148, 2008.
- VERA, M. et al. Optimization of a sequential anaerobic-aerobic treatment of a saline fishing effluent. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 77, n. 5, p. 275–290, 1999.
- VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. **Biological wastewater treatment in warm climate regions**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- VUITIK, G. A. **Efeitos da recirculação em reatores anaeróbios compartimentados no tratamento de vinhaça**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2017.
- VUITIK, G. A. et al. Effects of recirculation in anaerobic baffled reactors. **Journal of Water Process Engineering**, v. 28, p. 36–44, Apr. 2019.
- WANG, R. M. et al. Efficiency of porous burnt-coke carrier on treatment of potato starch wastewater with an anaerobic-aerobic bioreactor. **Chemical Engineering Journal**, v. 148, n. 1, p. 35–40, 2009.
- WEILAND, P.; ROZZI, A. The start-up, operation and monitoring of high-rate anaerobic treatment systems: Discusser's report. **Water Science and Technology**, v. 24, n. 8, p. 257–277, 1991.

- WOERFEL, J. B. Extraction. *In*: ERICKSON, D. R. (ed). **Practical handbook of soybean processing and utilization**. Urbana: AOCS Press, 1995. Chap. 6, p. 65–92.
- 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. *In*: YANG, S. T.; EL ENSHASY, H.; THONGCHUL, N. (ed.). **Bioprocessing technologies in biorefinery for sustainable production of fuels, chemicals and polymers**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. Chap. 1, p. 1-26.
- YANG, Z.; ZHOU, S. The biological treatment of landfill leachate using a simultaneous aerobic and anaerobic (SAA) bio-reactor system. **Chemosphere**, v. 72, n. 11, p. 1751–1756, Aug. 2008.
- YOUNG, H. W.; YOUNG, J. C. Hydraulic characteristics of upflow anaerobic filters. **Journal of Environmental Engineering**, v. 114, n. 3, p. 621–638, 1988.
- ZANELLA, L. Partida de um reator compartimentado hibrido anaerobio / aerobio tratando esgoto sanitario. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Limeira, 1999.
- ZHANG, D. et al. The integration of methanogenesis with simultaneous nitrification and denitrification in a membrane bioreactor. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 2, p. 541–547, Feb. 2005.
- ZHANG, J. et al. Performance and spatial community succession of an anaerobic baffled reactor treating acetone-butanol-ethanol fermentation wastewater. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 16, p. 7407–7414, 2011.
- ZHOU, P. et al. Treatment of high-strength pharmaceutical wastewater and removal of antibiotics in anaerobic and aerobic biological treatment processes. **Journal of Environmental Engineering**, v. 132, n. 1, p. 129–136, 2006.
- ZHU, G.-F. et al. The performance and phase separated characteristics of an anaerobic baffled reactor treating soybean protein processing wastewater. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 8027–8033, Nov. 2008.
- ZHU, G. et al. Recent developments and future perspectives of anaerobic baffled bioreactor for wastewater treatment and energy recovery. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 12, p. 1243–1276, 2015.
- ZINDER, S. H. Physiological ecology of methanogens. *In*: FERRY, J. G. (ed.). **Methanogenesis: ecology, physiology, biochemistry & genetics**. Boston: Springer, 1993. p. 128–206.