

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHAÇA E ÁGUAS  
RESIDUÁRIAS DA BOVINOCULTURA LEITEIRA EM  
REATORES UASB, EM SÉRIE**

**Michel de Santi Caraça**

Tecnólogo em Biocombustíveis

Jaboticabal

2022

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHAÇA E ÁGUAS  
RESIDUÁRIAS DA BOVINOCULTURA LEITEIRA EM  
REATORES UASB, EM SÉRIE**

**Discente: Michel de Santi Caraça**

**Orientadora: Profa. Dra. Rose Maria Duda**

**Coorientador: Prof. Dr. Roberto Alves de Oliveira**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias —UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Microbiologia Agropecuária.

C257c      Caraça, Michel de Santi  
Co-digestão anaeróbia de vinhaça e águas residuárias da  
bovinocultura leiteira em reatores UASB, em série / Michel de Santi  
Caraça. -- Jaboticabal, 2022  
56 p.  
  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal  
Orientadora: Rose Maria Duda  
Coorientador: Roberto Alves de Oliveira  
  
1. Bioenergia. 2. Biogás. 3. Metano. 4. Vinhoto. 5. Reatores  
Anaeróbios. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHAÇA E ÁGUAS RESIDUÁRIAS DA BOVINOCULTURA LEITEIRA EM REATORES UASB EM SÉRIE

**AUTOR: MICHEL DE SANTI CARAÇA**

**ORIENTADORA: ROSE MARIA DUDA**

**COORIENTADOR: ROBERTO ALVES DE OLIVEIRA**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Microbiologia Agropecuária, pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. ROSE MARIA DUDA (Participação Virtual)  
Produção de Biogás Tratamento de Águas Residuárias / FATEC Jaboticabal SP



Prof. Dr. LUCIANO DOS SANTOS RODRIGUES (Participação Virtual)  
Universidade Federal de Minas Gerais / Belo Horizonte/MG



Profa. Dra. SIMONE DAMASCENO GOMES (Participação Virtual)  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas / Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE - Cascavel



Jaboticabal, 29 de setembro de 2022

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

Michel de Santi Caraça — Filho de Celso Aparecido Caraça e Rosana Aparecida de Santi, nascido em Jaboticabal, no Estado de São Paulo, no dia 25 de março de 1992. Técnico em Agropecuária pelo Colégio Técnico Agrícola “José Bonifácio” na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal - SP, em dezembro de 2009. Tecnólogo em Biocombustíveis formado pela Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal (FATEC) - SP, em julho de 2019. Em agosto de 2019 iniciou o curso de Pós-Graduação em Microbiologia Agropecuária, em nível de Mestrado, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal - SP no Laboratório de Saneamento Ambiental (Departamento de Engenharia e Ciências Exatas).

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por estar presente em minha vida.

À Professora Dra. Rose Maria Duda, pela orientação, confiança depositada, por sua paciência, conselhos, inúmeras contribuições e pelo apoio em momentos difíceis e pela oportunidade de realização do curso de Pós-Graduação ao nível de Mestrado.

Ao Professor Dr. Roberto Alves de Oliveira pela co-orientação, por ceder o espaço do laboratório de Saneamento Ambiental, permitindo a realização da pesquisa, pelos conselhos e pelas contribuições à pesquisa.

Aos docentes Dr. Luciano dos Santos Rodrigues e a Dr<sup>a</sup>. Ana Cláudia Ruggieri pela participação da banca examinadora de qualificação. Agradeço-os pelas valiosas contribuições feitas ao trabalho.

A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP), em particular, o Laboratório de Saneamento Ambiental e o Departamento de Engenharia e Ciências Exatas, disponibilizando recursos e instalações para realizar este trabalho.

Aos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação pela disposição e ajuda sempre prestada, em especial à Branca, Eliana, Márcia, Diego e Moyses.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Microbiologia Agropecuária da UNESP – FCAV, pelas disciplinas ministradas e pelo aprimoramento acadêmico.

Aos Funcionário do Departamento de Engenharia Rural: Ailton, pelo auxílio prestado.

Também agradeço a Renata, Eliane, Jorge, Valciney, Vivian e Stella, obrigado pela amizade, e ajuda prestada.

Aos meus pais Celso e Rosana, por todo apoio.

À usina “Pitangueiras” pelo fornecimento de vinhaça.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro (código financeiro 001).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo n°: 2019/19443-6.

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	v
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	4
2.1 Objetivo Geral.....	4
2.2 Objetivos Específicos.....	4
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	5
3.1 Produção de etanol de cana-de-açúcar.....	5
3.2 Vinhaça de cana-de-açúcar.....	6
3.3 Bovinocultura leiteira.....	9
3.4 Digestão anaeróbia.....	11
3.4.1 Hidrólise.....	12
3.4.2 Acidogênese.....	12
3.4.3 Acetôgenese.....	13
3.4.4 Metânogênese.....	13
3.5 Reatores anaeróbios.....	14
3.5.1 Reatores UASB em série.....	15
3.6 Co-digestão.....	16
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	19
4.1 Instalações experimentais.....	19
4.2 Condições operacionais.....	20
4.3 Afluente.....	21
4.4 Lodo de inóculo.....	22
4.5 Exames e determinações.....	22
4.6 Potencial de produção de metano e energia elétrica.....	24
4.6.1 Potencial de produção de metano.....	24
4.6.2 Potencial de produção de energia elétrica.....	25
4.7 Análise de componentes principais.....	25
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	26
5.1 pH, alcalinidade e ácidos voláteis.....	26

5.2 Demanda química de oxigênio (DQO), sólidos, nitrogênio, fósforo e coliformes .....	28
5.3 Produção de biogás e energia elétrica.....	31
5.4 Análise de componentes principais.....	34
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>36</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>37</b>

## CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHAÇA E ÁGUAS RESIDUÁRIAS DA BOVINOCULTURA LEITEIRA EM REATORES UASB, EM SÉRIE

### RESUMO

A digestão anaeróbia pode ser uma alternativa atraente para o aproveitamento energético da vinhaça e das águas residuárias da bovinocultura leiteira (ARBL) e redução dos problemas ambientais. O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da co-digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar com ARBL, em dois reatores UASB (R1 e R2), em série, na produção de biogás e efluente de qualidade. Foi utilizado a vinhaça e as ARBL, na proporção de 3/1, sendo 75% do volume de vinhaça e 25% do volume de ARBL. Também foi realizado a recirculação do efluente do R2 para adequação do pH do afluente. As melhorias nas condições nutricionais da vinhaça em virtude da co-digestão com as ARBL, aliada a recirculação do efluente proporcionaram remoções médias de DQO<sub>total</sub> de 77% para o sistema (R1+R2) e produção volumétrica e específica de metano de 0,451 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup> d)<sup>-1</sup> e 0,15 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (kg DQO<sub>total</sub> removida)<sup>-1</sup> para o R1, respectivamente. Foram observados o consumo dos ácidos voláteis totais e aumento da alcalinidade parcial nos reatores UASB. No efluente do R2 foram observadas concentrações de NTK, P-total, Ca, Mg e Fe de 70; 31; 21; 7,4 e 3,5 mg L<sup>-1</sup>, o que indica que esses elementos permaneceram no efluente e essa característica é interessante, pois o efluente poderá ser utilizado na fertirrigação da cana-de-açúcar. A partir do potencial teórico de produção de energia elétrica, verificou-se a possibilidade da produção de energia elétrica nos reatores UASB de 10,65 kWh d<sup>-1</sup> por m<sup>3</sup> de vinhaça, ou seja 39% da energia elétrica necessária para processar uma tonelada de cana-de-açúcar. Portanto, a co-digestão da vinhaça e das ARBL pode ser uma opção para a melhoria nas condições operacionais dos reatores anaeróbios e seu aproveitamento energético.

**Palavras-chave:** Bioenergia. Biogás. Metano. Vinhoto. Reatores anaeróbios.

## ANAEROBIC CO-DIGESTION OF VINASSE AND WASTEWATER FROM DAIRY CATTLE IN UASB REACTORS, IN SERIES

### ABSTRACT

Anaerobic digestion can be an attractive alternative for the energy use of vinasse and dairy cattle wastewater (DCW) and reducing environmental problems. The objective of this work was to evaluate the effect of anaerobic co-digestion of sugarcane vinasse with DCW, in two UASB reactors (R1 and R2), in series, on the production of biogas and quality effluent. Vinasse and DCW were used, in the proportion of 3/1, being 75% of the vinasse volume and 25% of the DCW volume. The recirculation of the R2 effluent was also carried out to adjust the pH of the influent. The improvements in the nutritional conditions of the vinasse due to the co-digestion with the DCW, combined with the recirculation of the effluent, provided average removals of total COD of 77% for the system (R1+R2) and volumetric and specific production of methane of  $0.451 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$  and  $0.15 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg COD}_{\text{total removed}})^{-1}$  for R1, respectively. It was observed the consumption of total volatile acids and increase of partial alkalinity in the UASB reactors. In the R2 effluent, concentrations of TKN, total-P, Ca, Mg and Fe of 70 were observed; 31; 21; 7.4 and 3.5  $\text{mg L}^{-1}$ , which indicates that these elements remained in the effluent and this characteristic is interesting, since the effluent can be used in the fertigation of sugarcane. From the theoretical potential of electric energy production, it was verified the possibility of producing electric energy in the UASB reactors of  $10.65 \text{ kWh d}^{-1}$  per  $\text{m}^3$  of vinasse, that is, 39% of the electric energy needed to process a ton of sugar cane. Therefore, the co-digestion of vinasse and DCW can be an option for improving the operational conditions of anaerobic reactors and their energy use.

**Keywords:** Bioenergy. Biogas. Methane. Vinasse. Anaerobic reactors.

### LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACP	Análise de componentes principais
AGV	Ácidos graxos voláteis
AI	Alcalinidade intermediária
AP	Alcalinidade parcial
AT	Alcalinidade total
AVT	Ácidos voláteis totais
ARBL	Águas residuárias da bovinocultura leiteira
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
DQO	Demanda química de oxigênio
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
COV	Carga orgânica volumétrica
FAO	Food and Agriculture Organization
GEE	Gases de efeito estufa
GWh	Gigawatt hora
kWh	Quilowatt hora
N-am	Nitrogênio amoniacal
NPK	Nitrogênio, fósforo e potássio
NTK	Nitrogênio total Kjeldahl
Ptotal	Fósforo total
pH	Potencial hidrogeniônico
PEM	Produção específica de metano
PVM	Produção volumétrica de metano
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
TDH	Tempo de detenção hidráulica
UASB	Upflow anaerobic sludge blanket

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos.....7
- Tabela 2.** Condições operacionais dos reatores UASB (R1 e R2) em série, utilizados na co-digestão anaeróbia da vinhaça e das águas residuárias da bovinocultura de leite.....20
- Tabela 3.** Características da vinhaça e águas residuárias da bovinocultura leiteira (ARBL).....22
- Tabela 4.** Exames e determinações, frequência e fontes das metodologias utilizadas nas amostras do afluente e efluente dos reatores anaeróbios UASB em série, R1 e R2.....23
- Tabela 5.** Valores médios da demanda química de oxigênio total (DQO<sub>total</sub>), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), relação SV/ST, nitrogênio amoniacal (N-am.), nitrogênio total kjedahl (NTK), fósforo total (P-t), K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, Co, relação entre DQO:NTK:P e respectivos coeficientes de variação (c.v.), do afluente e efluentes dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), R1 e R2 durante a co-digestão anaeróbia de vinhaça e águas residuárias da bovinocultura leiteira.....29
- Tabela 6.** Valores médios da produção volumétrica de metano (PVM) estimada e produzida, produção volumétrica específica de metano e produção de energia elétrica do biogás, a partir da co-digestão da vinhaça e águas residuárias da bovinocultura de leite, em dois reatores UASB, R1 e R2, em série.....33

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Fluxograma simplificado da produção de açúcar e etanol e a geração de vinhaça. (Araujo, 2017).....6
- Figura 2.** Estábulo com vacas leiteiras localizado na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista - UNESP, em Jaboticabal-SP..... 10
- Figura 3.** Representação esquemática das instalações com os reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB, R1 e R2), em série, utilizados para a co-digestão da vinhaça e águas residuárias da bovinocultura de leite..... 19
- Figura 4.** Foto do esquema de preparo da água residuária da bovinocultura leiteira (ARBL) utilizada no experimento.....21
- Figura 5.** Carga orgânica volumétrica (COV), (B) pH, (C) alcalinidade parcial (AP), (D) relação da alcalinidade intermediária pela alcalinidade parcial (AI/AP), (E) ácidos voláteis totais (AVT) durante o período experimental nos reatores UASB, R1 e R2, utilizados na co-digestão anaeróbia de vinhaça e águas residuárias da bovinocultura leiteira.....27
- Figura 6.** Eficiências de remoção da demanda química de oxigênio total (DQO total), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), nitrogênio total kjedahl (NTK) e fósforo total (P-t) durante o período experimental, nos reatores UASB, R1, R2 e R1+R2.....31
- Figura 7.** (A) Demanda química de oxigênio total (DQO total) e eficiência de remoção de DQO total nos reatores UASB (R1 + R2), (B) Produção volumétrica de metano (PVM) e temperatura média do ar durante o período experimental, nos reatores UASB, R1 e R2.....32
- Figura 8.** Análise dos componentes principais dos reatores UASB, R1 e R2. AVT: ácidos voláteis totais; PVM: produção volumétrica de metano; P-total: fósforo total; N-am.: nitrogênio amoniacal; AT: alcalinidade total; AP: alcalinidade parcial; DQO: demanda química de oxigênio.....35

## 1. INTRODUÇÃO

O etanol é um importante biocombustível no setor de energias renováveis. No Brasil e no estado de São Paulo, na safra dos anos 20/21 foram produzidos 32,5 e 14,4 bilhões de litros de etanol de cana-de-açúcar, respectivamente (ÚNICA, 2021), e pode ser uma opção para a substituição dos combustíveis fósseis (OLIVEIRA et al., 2015).

No entanto, na produção de etanol a partir da cana de açúcar são produzidas quantidades significativas de vinhaça, de 10 a 14 litros para cada litro de etanol destilado (ORTEGÓN et al., 2016). A vinhaça possui pH ácido na faixa de (pH 3,5 – 4,5) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) de 15.000 a 65.000 mg L<sup>-1</sup> (FUESS; GARCIA, 2014). A vinhaça normalmente é aplicada ao solo, seguindo a norma CETESB (P 4.231/2015), como fonte principalmente de potássio, substituindo parcialmente o uso de fertilizantes químicos.

A atratividade da fertirrigação para os tomadores de decisão na cadeia de processamento da cana-de-açúcar baseia-se nos investimentos mínimos necessários para transporte da vinhaça, que pode ser facilmente realizado por dutos ou caminhões (FUESS et al., 2021). Porém essa prática poderá, se utilizada inadequadamente, ocasionar uma série de impactos ambientais, como lixiviação de metais para as águas subterrâneas, odor desagradável (CHRISTOFOLETTI et al., 2013; DE OLIVEIRA et al., 2013), além de estimular a atividade biológica indesejada, induzida pelo aumento de disponibilidade de material orgânico, contribuindo com a liberação de metano e óxido nitroso, por exemplo (OLIVEIRA et al., 2015).

A digestão anaeróbia pode ser uma alternativa atraente para o aproveitamento energético da vinhaça e redução dos impactos ambientais. No processo de digestão anaeróbia os compostos orgânicos da vinhaça serão convertidos em biogás, que poderá ser utilizado, por exemplo, para a secagem de levedura e produção de energia elétrica (BARROS et al., 2016; MADALENO et al., 2020; PARSAEE et al., 2019). E a vinhaça biodigerida nos reatores anaeróbios, poderá ser aplicada nos canaviais com mais segurança e sem perder o potencial de fertilização (DEL NERY et al., 2018). A quantidade de emissões de metano e óxido nitroso da vinhaça obtida da produção de etanol de beterraba co-digerida anaerobicamente em um reator de mistura completa (CSTR) com dejetos de vaca e palha (em proporções de 61:2:37% respectivamente em termos de SV total) foi reduzida em 100% e 78%, respectivamente, em

comparação com quando aplicada diretamente ao solo (MORAES et al., 2017), indicando a importância ambiental da digestão anaeróbia da vinhaça.

No entanto, a digestão anaeróbia da vinhaça da cana-de-açúcar, ainda possui limitações e desafios, principalmente em virtude das variações nas características da vinhaça (BARROS; DUDA; OLIVEIRA, 2016a; MOTA; SANTOS; AMARAL, 2013), dificuldade na partida dos reatores anaeróbios e a manutenção da biomassa ativa nos reatores (DEL NERY et al., 2018). As características da vinhaça dependem da matéria prima e do processo de produção do etanol, e podem ser desfavoráveis para a digestão anaeróbia, sendo necessárias adequações (BARROS; DUDA; OLIVEIRA, 2016a; JANKE et al., 2016; PRADO; CAIONE; CAMPOS, 2013). A vinhaça é constituída principalmente por água, de 94 a 97%, alguns macronutrientes como K, Ca, N, Mg, S e resíduos de açúcar e etanol (BARROS et al., 2017). De acordo com Parsaee et al. (2019), a digestão anaeróbia da vinhaça como único substrato pode ser ineficiente, com uma baixa conversão em biogás, em virtude da carência de nutrientes.

A co-digestão da vinhaça com outros resíduos foram relatados recentemente e incluem a utilização de soro de queijo (ALBUQUERQUE; RATUSZNEI; RODRIGUES, 2019a), bagaço de cana-de-açúcar (GONZÁLEZ et al., 2017), resíduos da produção de café (PINTO et al., 2018), torta de filtro (BARROS et al., 2017). Alguns benefícios da co-digestão anaeróbia da vinhaça são a melhoria no equilíbrio de nutrientes, aumento da concentração de matéria orgânica biodegradável e conseqüentemente a melhoria no rendimento de biogás por volume digerido, além de reduzir os custos de operação dos reatores anaeróbios (ALBUQUERQUE; RATUSZNEI; RODRIGUES, 2019a).

A co-digestão de vinhaça oriunda da produção de etanol da cana de açúcar e águas residuárias da bovinocultura de leite (ARBL) pode ser uma alternativa interessante em regiões produtoras de etanol e leite. A co-digestão da vinhaça e das ARBL pode ser uma nova opção para a melhoria nas condições operacionais dos reatores anaeróbios utilizados no tratamento da vinhaça e fornecer uma alternativa para o manejo de ARBL, principalmente para a diminuição dos surtos da mosca *Stomoxys Calcitrans* (Diptera: Muscidae), conhecida como mosca dos estábulos.

O dejetos proveniente de bovinocultura de leite possui, em termos de massa seca total, aproximadamente 3,03% de nitrogênio, 2,41% de cálcio, 1,24% de potássio e 1% de outros compostos, incluindo magnésio, fósforo, enxofre, ferro, sódio, zinco,

manganês, cobre e cobalto, sendo estas dependentes da dieta e das condições em que os animais são mantidos (ZHU et al., 2021). Muitas instalações destinadas a bovinocultura de leite utilizam água para o manejo dos dejetos, seguido por tratamento primário (peneiramento mecânico ou sedimentação ou ambos) para remover sólidos em suspensão (HARRIS et al., 2008). Portanto o uso das ARBL, pode ser uma alternativa interessante, para melhorar as condições nutricionais da vinhaça necessárias para a digestão anaeróbia estável, propiciando o aumento na produção de metano (MAO et al., 2015).

O reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) é utilizado mundialmente no tratamento de diversas águas residuárias industriais e agroindustriais (DORN et al., 2012; JANKE et al., 2016; JIANG et al., 2016; SANTANA JUNIOR et al., 2019). E a utilização de reatores UASB em dois estágios em série, se mostrou eficiente, em vários estudos (CAMARILLO; RINCÓN, 2012; DEMIREL; YENIGÜN, 2006; GOMES et al., 2017; ZHONG; STEVENS; HANSEN, 2015), evitando sobrecargas orgânicas e ácidas, reduzindo o efeito inibitório de compostos tóxicos, promovendo a estabilidade e o controle do processo, permitindo a aplicação de altas cargas orgânicas, com maior produção de energia, sendo interessante a sua utilização para o tratamento da vinhaça.

Diante do exposto esse trabalho visou a co-digestão anaeróbia da vinhaça e das ARBL em dois reatores UASB (R1 e R2), em série, para a produção de biogás e efluente com menor impacto poluidor.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho de dois reatores UASB em série (R1 e R2), na co-digestão de vinhaça com águas residuárias da bovinocultura leiteira.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar os reatores UASB (R1 e R2), em série, quanto a remoção de nitrogênio, fósforo, Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg, Na e K.

- Verificar a produção volumétrica de metano nos reatores UASB, em série (R1 e R2) e estimar o potencial teórico da produção de energia elétrica obtida a partir do metano produzido na co-digestão de vinhaça e águas residuárias da bovinocultura leiteira.

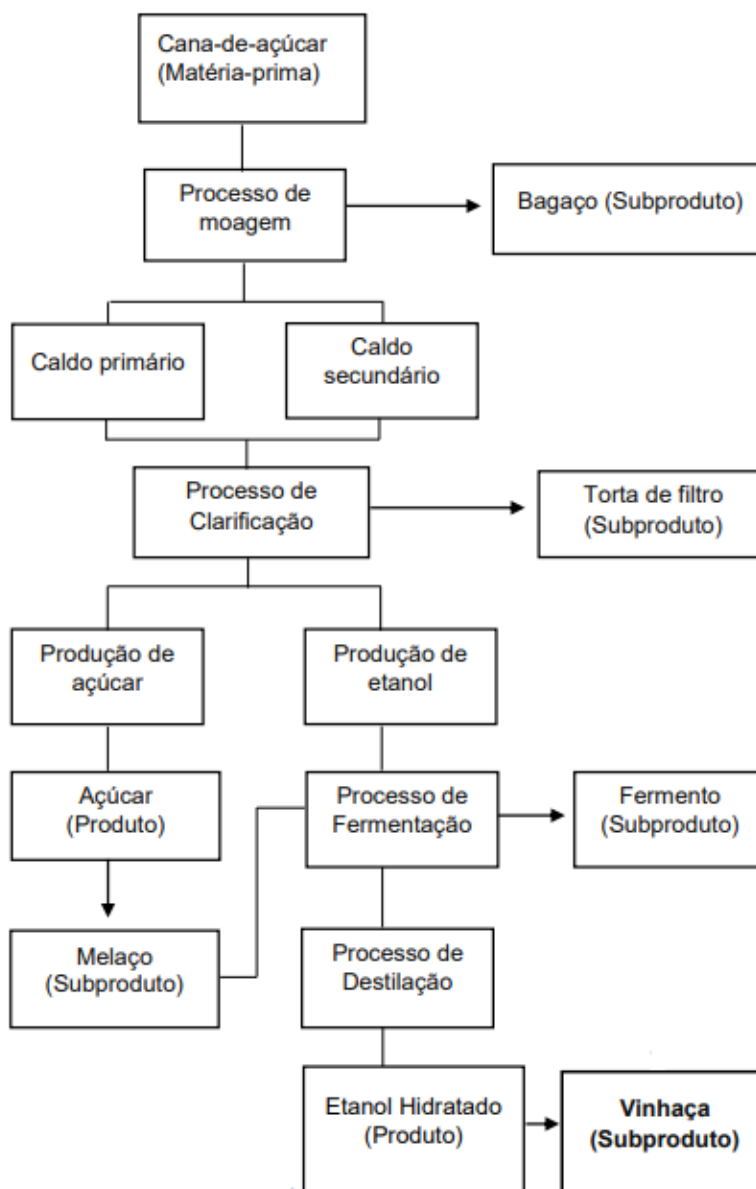
### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Produção de etanol da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar vem sendo cultivada no Brasil há muito tempo, principalmente para a produção de açúcar. Porém, com o início do Proálcool nos anos 80, a indústria sucroalcooleira sofreu grande expansão (XAVIER, 2012). Na virada do século, esse tipo de agroindústria passou a ser vista como uma das melhores opções de fonte de energia renovável, se destacando no cenário agrícola brasileiro (MAULE et al., 2001). Atualmente o Brasil destaca-se no cenário mundial como produtor de cana-de-açúcar. Na safra 2021/22 foi cultivada uma área de 8,317 milhões de hectares, com uma produtividade média de 70,357 toneladas por hectare e uma produção total de 585,179 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2022). Dessa produção, 324,724 milhões de toneladas, que correspondem a 55,5% do total de cana-de-açúcar produzidos, foram destinados a produção de etanol, sendo gerados 32,5 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2022).

O processo de produção de etanol se inicia com a moagem da cana-de-açúcar, dando origem ao caldo de cana-de-açúcar e ao bagaço, subproduto da produção. O caldo de cana-de-açúcar pode ser destinado a produção de etanol ou açúcar dependendo de sua qualidade (ARAUJO, 2017).

Posteriormente o caldo passa pelo processo de clarificação, gerando como subproduto a torta de filtro. O caldo que será destinado a produção de açúcar, passa por um processo de concentração em evaporadores e cozedores, após esse processo ocorre a centrifugação, gerando açúcar e melaço como subproduto. O melaço contém grandes quantidades de glicose, portanto é destinado como matéria prima para produção de etanol. O melaço e o caldo de cana-de-açúcar são enviados para biorreatores, denominados de dornas de fermentação e recebem o nome de mosto. Nesse processo são adicionadas leveduras (*saccharomyces cereviseae*), que após a fermentação transformam o mosto em um líquido denominado vinho. As leveduras são retiradas pela centrifugação, gerando como subproduto o fermento. O vinho possui teor alcóolico de 8 a 10% e é enviado para destilação e retificação, gerando como subproduto a vinhaça e o etanol hidratado como produto final (PACHECO, 2010) (Figura 1). Segundo Ortegón et al., (2016), para cada litro de etanol destilado, são gerados de 10 a 14 L de vinhaça.



**Figura 1.** Fluxograma simplificado da produção de açúcar e etanol e a geração de vinhaça (Araujo, 2017).

### 3.2 Vinhaça de cana-de-açúcar

A vinhaça, também conhecida por vinhoto é composta por aproximadamente 93% de água e 7% de sólidos, dos quais 75% correspondem a matéria orgânica. Na fração sólida, entre os minerais presentes, aproximadamente 20% é constituída de potássio (K), nutriente responsável pela determinação da dose a ser aplicada no solo (SANTANA JUNIOR, 2018).

A composição da vinhaça varia ao decorrer da época de colheita, em virtude principalmente da matéria prima e aos processos industriais. Os fatores como a

moagem de diferentes variedades de cana-de-açúcar, com diferentes índices de maturação, cultivadas em solos com níveis diferentes de fertilidade e variações nos processos de fermentação e destilação podem influenciar na composição da vinhaça, e por isso é considerada um efluente complexo dentro do mesmo processo de produção (MORAES et al., 2014 apud SANTANA JUNIOR, 2018).

Na Tabela 1 estão descritos os principais constituintes da vinhaça. A concentração encontrada varia de acordo com o tipo de mosto que foi fermentado.

**Tabela 1.** Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos.

PARÂMETRO	MELAÇO	CALDO	MISTO
pH	4,2 a 5,0	3,7 a 4,6	4,4 a 4,6
Temperatura	80 a 100	80 a 100	80 a 100
DQO	65000	15000 a 33000	45000
DBO	25000	6000 a 16500	19800
Sólidos Totais	81500	23700	52700
Sólidos Voláteis	60000	20000	40000
Sólidos Fixos	21500	3700	12700
Nitrogênio total	450 a 1600	150 a 700	480 a 710
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	100 a 290	10 a 210	9 a 200
Potássio (K <sub>2</sub> O)	3740 a 7830	1200 a 2100	3340 a 4600
Cálcio (CaO)	450 a 5180	130 a 1540	1330 a 4570
Magnésio (MgO)	420 a 1520	200 a 490	580 a 700
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	6400	600 a 760	3700 a 3730
Carbono	11200 a 22900	5700 a 13400	8700 a 12100
Relação C/N	16 a 16,27	19,7 a 21,07	16,4 a 16,43
Matéria Orgânica	63400	19500	38000

Fonte: SOPRAL (1996) apud PINTO (1999). Unidades: mg L<sup>-1</sup> exceto pH e C/N. Temperatura (°C). DQO: demanda química de oxigênio. DBO: demanda bioquímica de oxigênio.

A vinhaça possui vários nutrientes, entre eles o potássio, portanto é comumente utilizada na fertirrigação da cana-de-açúcar, como substituto aos fertilizantes convencionais, sendo aplicada ao solo, segundo as especificações da Norma Técnica P 4.231\2015 (Cetesb, 2015). No entanto, em virtude aos grandes volumes gerados, essa prática acarreta altos custos com transporte, não permitindo uma aplicação

adequada, podendo causar danos ao solo e águas subterrâneas, por conta do alto teor de componentes orgânicos, elevada demanda química de oxigênio (DQO) e baixo pH, podendo se tornar um efluente de grande poder poluidor, se não aplicado de maneira correta (CHRISTOFOLETTI et al., 2013; DE OLIVEIRA et al., 2013).

Apesar da vinhaça ser utilizada principalmente na fertirrigação, existem alternativas para a sua disposição final, dentre elas o tratamento físico-químico e a incineração do efluente concentrado. Entretanto, esses métodos transferem a poluição do meio líquido para o meio sólido (ZENG; LIU; QIN, 2009).

Outro método promissor é a concentração da vinhaça por evaporação, utilizando o vapor gerado na indústria, sendo que a vinhaça concentrada também pode ser aplicada ao solo. A vinhaça concentrada pode ser utilizada no processo de digestão anaeróbia, sendo necessário para iniciar o processo a diluição da vinhaça concentrada. No entanto após um período de operação, a vinhaça biodigerida poderá ser utilizada para diluição da vinhaça. Constituindo um sistema cíclico e independente de água, capaz de gerar biogás na digestão anaeróbia e vapor no processo de evaporação e ambos os produtos serem utilizados como fonte lucrativa para a indústria (ARAUJO, 2017).

O potencial de energia da vinhaça, conforme citado por (FUESS; GARCIA, 2014) é a digestão anaeróbia, onde pode-se gerar o biogás, que complementa a energia co-gerada na combustão do bagaço, portanto a associação de ambos os processos (digestão anaeróbia + combustão) e pode aumentar a capacidade de recuperação de energia. O potencial energético dos resíduos gerados pela indústria tende a compensar, praticamente, todo o consumo de energia gasto na cadeia produtiva (FUESS; GARCIA, 2014). Na perspectiva energética, a digestão anaeróbia de materiais orgânicos, promove a produção de biogás, constituído principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) de 60 a 70%, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), sendo uma alternativa como fonte de energia, muito atraente devido principalmente ao metano presente no biogás (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015 apud SANTANA JÚNIOR, 2018).

A utilização da digestão anaeróbia, na perspectiva ambiental, reduz a concentração da matéria orgânica biodegradável presente na vinhaça e não remove os nutrientes inorgânicos presentes, que permanecem no efluente oriundo da digestão anaeróbia (vinhaça biodigerida). Dessa forma a vinhaça biodigerida pode ser disposta ao solo como biofertilizante na cultura da cana-de-açúcar, com maior segurança,

reduzindo seu poder poluente e sem perder suas propriedades nutricionais. (MORAES et al., 2014; MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015 apud SANTANA Jr., 2018).

A disponibilidade de nutrientes é um fator importante no tratamento anaeróbio; em virtude das elevadas concentrações de material orgânico da vinhaça, a suplementação de nutrientes é necessária. A vinhaça possui elevada concentração de potássio, porém as concentrações de outros macros e micronutrientes normalmente não atendem as quantidades recomendadas para a digestão anaeróbia (BARROS; DUDA; OLIVEIRA, 2016).

Portanto, soluções tecnicamente e economicamente mais apropriadas para os tratamentos anaeróbios de resíduos industriais devem ser exploradas para a suplementação dos nutrientes (VILLA-MONTOYA et al., 2016), e uma alternativa seria a co-digestão da vinhaça com outras águas residuárias, como as águas residuárias da bovinocultura leiteira.

### **3.3 Bovinocultura leiteira**

O Brasil se apresenta, como uma consolidada potência mundial na produção de leite. Segundo dados da Organização das nações unidas para a alimentação e a agricultura (FAO), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de leite, precedido apenas dos Estados Unidos e Índia (FAO, 2022), com uma evolução constante na atividade leiteira, nas últimas quatro décadas. No ano de 2020 foram produzidos 35,44 bilhões de litros de leite (EMBRAPA, 2022).

As principais mesorregiões produtoras de leite no Brasil no ano de 2020, foram, Noroeste Rio-Grandense, com uma produção de 2,90 bilhões de litros, seguido pelo triangulo mineiro, Alto Parnaíba, que obtiveram uma produção de 2,45 bilhões de litros, oeste Catarinense com produção de 2,41 bilhões de litros e sul e sudoeste de Minas Gerais com produção de 1,5 bilhões de litros, sendo o estado de Minas Gerais o maior produtor, com uma produção de 5,64 bilhões de litros de leite. O estado de São Paulo está em quinto lugar na produção de leite (EMBRAPA, 2022).

Os sistemas de manejo para produção de leite no Brasil são diversificados, desde sistemas mais rudimentares até sistemas que utilizam tecnologias mais modernas. Existe uma grande diferença nos sistemas utilizados pelos pequenos, médios e grandes produtores (BORGES et al., 2016). A atividade leiteira no Brasil está

a caminho da profissionalização e tecnificação, a exemplo de outras atividades bastante competitivas da agropecuária brasileira (EMBRAPA, 2022).

As vacas leiteiras produzem volumes maiores de dejetos, que o gado de corte, mesmo se os animais forem mantidos a pasto, pois é necessário manter os animais retidos em estábulos durante a ordenha (FREITAS, 2019), ocorrendo dessa forma o acúmulo de dejetos (fezes e urina), restos de alimentos (Figura 2) e resíduos da limpeza dos equipamentos utilizados na ordenha (XAVIER, 2009).



**Figura 2.** Estábulo com vacas leiteiras localizado na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista - UNESP, em Jaboticabal-SP.

Segundo Freitas (2019) nos confinamentos de vacas leiteiras, o manejo dos dejetos geralmente é realizado a partir da lavagem do piso tornando-o mais diluído e os dejetos apresentam cerca de 5 a 6% de sólidos totais (ST).

A aplicação de dejetos não tratados ao solo deve ser evitada, pois o despejo inadequado desses dejetos pode acarretar na contaminação de cursos de água, devido ao escoamento superficial, em lavouras e pastagens, adubadas com dejetos, além da contaminação do solo e águas subterrâneas por lixiviação de macro e micronutrientes, sendo os nutrientes de maior preocupação o nitrogênio e o fósforo. O despejo desses dejetos, quando feito de forma incorreta pode contribuir para poluição do ar, pela liberação de amônia e metano, compostos que causam odores (BARBOSA E LANGER, 2011).

A agropecuária no Brasil é considerada como uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE), diferente dos países considerados mais desenvolvidos, nos quais o transporte e a produção de energia são as maiores fontes de emissão desses gases poluentes. O Brasil tem a capacidade de seguir se desenvolvendo e reduzindo o impacto ambiental, pois grande parte do volume de resíduos gerados pela agropecuária, tem sido considerado um subproduto, com potencial para geração de bioenergia e insumos para a produção agrícola, por meio do biogás e do biofertilizante (TIM MAY, MALCOLM WILLIAMS, RICHARD WIGGINS, 2021).

A utilização das ARBL como co-substrato da digestão anaeróbia da vinhaça poderá diminuir a emissão de gases de efeito estufa (GEE). As preocupações com o aquecimento global aumentaram a pressão sobre os sistemas produção de gado leiteiro e de corte no Brasil e no mundo, para promover uma produção pecuária ambientalmente sustentável, pois essas atividades são responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa (CUNHA et al., 2016).

A obtenção de biogás pelo processo de digestão anaeróbia pode atender necessidades básicas dos produtores rurais, por possuir propriedade combustível o biogás, pode ser utilizado na geração de energia elétrica. Outra vantagem é a destinação de grandes volumes de dejetos, que serão convertidos em efluente biodigerido, que por sua vez, pode ser utilizado de maneira mais segura, como adubo para os cultivos, devido as suas propriedades fertilizantes (MONTROYA et al., 2017).

AKAMINE (2021), estimou a produção de biogás para o rebanho bovino leiteiro no ano de 2019. O potencial de geração de biogás calculado foi de  $0,038 \text{ m}^3 \text{ biogás kg}_{\text{dejetos}}^{-1}$  e considerando o valor de geração de energia elétrica de  $1,43 \text{ kWh m}^3 \text{ biogás}$ , obtiveram os valores de  $1.128.372.421 \text{ m}^3 \text{ biogás ano}^{-1}$  e  $1.614 \text{ GWh ano}^{-1}$  de energia elétrica, que é capaz de suprir, a demanda anual de energia elétrica de 829 mil residências brasileiras.

### **3.4 Digestão anaeróbia**

A digestão anaeróbia tem sido considerada como um método de biodegradação para o tratamento de resíduos orgânicos em larga escala e consiste em um processo que ocorre na ausência de oxigênio molecular. Um conjunto de microrganismos simbióticos específicos metaboliza a matéria prima, por meio de complexas reações

bioquímicas (LI; CHEN; WU, 2019). Durante o processo de digestão anaeróbia, compostos orgânicos complexos, como proteínas, carboidratos e lipídios, são metabolizados em substâncias mais simples, até a formação de gases. Os gases gerados se desprendem do meio, formando o biogás, que é constituído principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (XIN; HE; QIU, 2018).

A digestão anaeróbia possui quatro estágios, que podem ser divididos em, extracelular (hidrólise) e intracelular (acidogênese, acetogênese e metanogênese), e eles ocorrem sequencialmente e simultaneamente, por meio de um grupo de microrganismos que metabolizam as matérias primas em biogás, composto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), na ausência de oxigênio (UÇKUN KIRAN et al., 2016).

### **3.4.1 Hidrólise**

A hidrólise da matéria prima, tem sido relatada como a etapa limitante na digestão anaeróbia, geralmente é a razão pela qual, a digestão anaeróbia pode necessitar de um longo tempo (MEEGODA et al., 2018). A velocidade da hidrólise depende do tipo de macronutriente, por exemplo, a biodegradação da celulose amorfa, ocorre mais rapidamente do que a biodegradação da celulose cristalina, outros fatores, como a concentração de substrato, tamanho da partícula, pH e temperatura alteram essa velocidade (POLMAN et al., 2021).

As bactérias hidrolíticas acidogênicas são responsáveis pela hidrólise de macronutrientes em substratos, através da produção de enzimas extracelulares, como a celobiase que quebra cadeias de carboidratos em glicose, proteases que quebram a proteína em aminoácidos e lipase que quebram lipídios em glicerol e ácidos graxos (RAVEENDRAN et al., 2018).

### **3.4.2 Acidogênese**

A acidogênese é a fermentação de aminoácidos e açúcares simples, por exemplo, glicose, e a oxidação anaeróbica de álcoois, por exemplo, glicerol e ácidos graxos de cadeia longa, como, ácido oleico, por bactérias formadoras de ácidos, por exemplo, ácido acético e produtos intermediários, como, ácido propiônico, butírico e valérico, chamados de ácidos graxos voláteis (AGV). As bactérias acidogênicas

preferem a degradação em ácido acético pois dessa forma produzem maior energia e aceleram seu crescimento, tipicamente, o tempo mínimo de duplicação dura 30 minutos, essas bactérias podem tolerar um valor de pH de 5 a 6 (MANYI-LOH et al., 2013). Embora esse crescimento rápido possa inibir a digestão anaeróbia devido ao declínio do pH, especialmente quando os ácidos não são metabolizados rapidamente. A acidogênese pode produzir grandes quantidades de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ , com matérias primas ricas em carboidratos (ZHANG; WANG; WANG, 2016).

### **3.4.3 Acetogênese**

A acetogênese envolve a oxidação anaeróbica, de intermediários, por exemplo, ácidos graxos voláteis e álcoois produzidos na acidogênese, para ácido acético e  $\text{H}_2$  por bactérias acetogênicas. A inibição da metanogênese pode ocorrer se o  $\text{H}_2$  produzido, não for rapidamente metabolizado por bactérias metanogênicas. O crescimento de bactérias acetogênicas é lento, com um tempo mínimo de duplicação de 2 a 4 dias (RAVEENDRAN et al., 2018).

### **3.4.4 Metanogênese**

A metanogênese ocorre de algumas formas, a primeira é a transformação da matéria orgânica para metano, a partir de ácido acético que possui lento e baixo rendimento de energia, sendo realizada por microrganismos metanogênicos acetoclásticos, com um tempo mínimo de duplicação, de 2 a 3 dias, a segunda forma ocorre com a transformação em  $\text{H}_2$ , por microrganismos metanogênicos hidrogenotróficos, com um tempo mínimo de duplicação de 6 horas. Além desses grupos, existem os metanogênicos formatotróficos, metilotróficos e alcoolotróficos que utilizam compostos metilados por exemplo, metanol, metilaminas e dimetilenxofre e álcoois, respectivamente. Os metanogênios acetoclásticos são sensíveis ao pH, nutrientes e concentrações de oligoelementos e são responsáveis por cerca de 70% da produção de metano. Em geral, os microrganismos metanogênicos são responsáveis pela estabilidade da digestão anaeróbia, pois controlam a alcalinidade do sistema através da utilização de ácido acético e  $\text{CO}_2$ .

### 3.5 Reatores anaeróbios

Os reatores anaeróbios, por meio da degradação da matéria orgânica por microrganismos tem a função de transformar a matéria orgânica em efluente biodigerido. Porém, para que essa transformação aconteça com sucesso, existem condições específicas, como pH e temperatura, em relação a reprodução desses microrganismos, decomposição da matéria orgânica e produção de biogás (MENG et al., 2022)

A variação do pH afeta a taxa de crescimento microbiano e a faixa ideal para o processo de digestão anaeróbia ocorre entre pH 6,8 a 7,4. É importante destacar ainda que quando não há uma alcalinidade suficientemente elevada no sistema, há a possibilidade de predominância de produção de ácidos voláteis e consequente queda do pH, o que influenciaria diretamente no crescimento dos microrganismos e decomposição da matéria orgânica (MAO et al., 2015).

Relacionada diretamente a condição metabólica dos microrganismos envolvidos no processo, a temperatura é fator primordial em relação ao seu crescimento, mas também influencia no estado dos substratos, quanto a sua solubilidade e no equilíbrio de ionização. O aumento da temperatura aumenta significativamente as taxas de reação microbiana (MAO et al., 2015). Portanto considerando que cada microrganismo exerce função metabólica específica, a temperatura ideal de proliferação, também se mantém única, variando com os tipos de microrganismos. Os psicrófilos, são capazes de viver e se reproduzir em temperaturas baixas, variando de 4°C à 15°C. Já os mesófilos, exercem maior condição de vida e reprodução microbiana, já que sua temperatura ideal de proliferação, varia de 20°C à 40°C. E são menos sensíveis às mudanças ambientais do que os termófilos. Os termófilos que são microrganismos que necessitam de altas temperaturas para a sua ação de desenvolvimento com variação de 45°C a 70°C, gerando por vezes em condições não naturais, custos excessivos para se manter em temperatura ideal (VAN et al., 2020).

O projeto e operação do reator anaeróbio é definido por dois parâmetros, sendo eles a carga orgânica volumétrica (COV) e o tempo de detenção hidráulica (TDH). A COV, indica uma medida que determina a quantidade de matéria orgânica a tratar-se diariamente por um volume determinado de reator. Já o TDH indica o tempo médio em que o afluente a ser tratado permanece no reator, devendo ser longo o bastante

para assegurar que no mínimo uma ou várias etapas da digestão anaeróbia, sejam concluídas (LEITÃO et al., 2006).

Existem diversas configurações de reatores anaeróbios, e entre os sistemas de alta taxa destacam-se os reatores UASB utilizados principalmente para o tratamento da vinhaça.

### **3.5.1 Reatores UASB em série**

O reator de fluxo ascendente UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) é um reator bioquímico, e o tratamento biológico ocorre de forma anaeróbia, onde a metabolização da matéria orgânica é realizada por microrganismos presentes na manta de lodo (KHAN; MEHROTRA; KAZMI, 2015). O efluente a ser tratado é introduzido pelo fundo do reator e flui para cima através de uma manta de lodo biologicamente ativa, geralmente na forma de grânulos. Esses grânulos de lodo têm uma estabilidade muito boa e não são lavados em condições práticas, portanto, proporcionam uma boa eficiência de tratamento quando o efluente entra em contato com os grânulos. Os gases (metano e dióxido de carbono) produzidos na digestão anaeróbia promovem a mistura interna, o que auxilia na formação e manutenção dos grânulos (CHONG et al., 2012).

O reator UASB, denominado também como reator de manta de lodo, é um reator de fluxo ascendente, que promove o deslocamento do afluente a ser tratado, por uma camada com alta concentração de microrganismos anaeróbios. O que diferencia os reatores UASB de outros reatores, como principal característica é não possuir material de enchimento para formação de biofilme, dessa forma os microrganismos são imobilizados na forma de flocos ou grânulos, ocorrendo por meio de auto adesão e estão dispostos nas camadas de lodo a partir do fundo do reator (Campos., 1985). O tratamento de águas residuárias em reatores UASB se apresenta como uma tecnologia comprovada e sustentável, sendo utilizada em uma série de resíduos industriais com diferentes características, englobando resíduos que contenham compostos tóxicos e inibidores, sendo utilizado também para tratamento de águas residuárias domésticas (LETTINGA G., 1992).

O perfil de sólidos no reator varia, de mais disperso e leve, próximo a parte superior do reator, chamado de manta de lodo, a um perfil muito denso com partículas granulares com grande capacidade de sedimentação, próximo a parte inferior do

reator, chamado de leito de lodo, onde a degradação da matéria orgânica, ocorre nas duas camadas, e a mistura dentro do reator é realizada de duas formas, com o fluxo ascendente do afluente e pela formação de bolhas de gás (CHERNICHARO, 2016).

A digestão anaeróbia pode ser realizada em sistemas simples, onde um único reator é responsável por realizar as quatro etapas da digestão, sendo denominado de sistema de digestão de estágio único. Porém, com o desenvolvimento da ciência e da biotecnologia foi descoberto que cada etapa da digestão anaeróbia possui diferentes condições ideais (MAO et al., 2015). Portanto, como solução para melhoria e para alcançar um maior desempenho de transformação da matéria orgânica, a ideia da separação física das etapas da digestão é descrita com o objetivo de aperfeiçoar cada uma delas. Atualmente, os sistemas de digestão com mais de um estágio são divididos, em sistemas de dois estágios, onde a hidrólise e a metanogênese são realizadas em dois reatores diferentes e um sistema mais complexo, com três estágios, onde a hidrólise a acidogênese/acetogênese e a metanogênese são realizadas em vários reatores (VAN et al., 2020).

O crescimento da hidrólise, acidogênese, acetogênese e da metanogênese são muito diferentes, com características distintas. Portanto, o conceito da digestão em dois estágios, possui como fundamento a otimização de cada etapa da digestão. Dessa forma a separação em dois reatores, presume que no primeiro reator ocorra a hidrólise e a acidogênese, e o segundo reator otimize a acetogênese e a metanogênese (ASLANZADEH et al., 2013).

Em virtude de diferentes condições ambientais existentes entre dois reatores, frequentemente é utilizado um tanque tampão ente eles, com intuito de remover materiais não hidrolisáveis e também controlar a concentração orgânica e o pH (KIM et al., 2013). Em sistemas com dois reatores, uma grande vantagem e a recirculação do efluente, trazendo como benefícios, mistura e diluição da matéria prima, corrigindo a carga a ser aplicada aos reatores e maior controle do pH, devido à redução da acidez, pelo uso do efluente de alta alcalinidade do segundo reator, proporcionando melhora na atividade do microrganismos (ASLANZADEH et al., 2013).

### **3.6 Co-digestão**

O processo de co-digestão é definido como o tratamento anaeróbio onde se utiliza da junção de pelo menos dois resíduos diferentes. Resultando em uma mistura

homogenia. Onde para uma maior eficiência da digestão anaeróbia e melhor produção de biogás, sem correr o risco de inibição dos microrganismos pela transformação dos ácidos orgânicos em metano é necessário estabelecer o melhor e/ou ideal teor de mistura dos resíduos envolvidos no processo. (ÁLVAREZ; OTERO; LEMA, 2010).

A junção de materiais vegetais ou co-substratos nos sistemas de digestão anaeróbia proporciona maior equilíbrio na relação Carbono/Nitrogênio (C/N), oferecendo carbono adicional. (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Devido às suas características particulares de composição, a co-digestão de dejetos provenientes da produção animal e de resíduos agroindustriais vem sendo estudada. Desta forma a junção dos dois resíduos melhora alguns fatores. Como o equilíbrio da relação C/N, diluição de compostos inibidores e tóxicos, correção do pH e o aumento na disponibilidade de macros e micronutrientes de relevância para este processo (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Outro benefício da aplicação dessa técnica, está relacionado à melhoria na relação custo-benefício, das unidades de tratamento, devido uma maior variedade de resíduos, que permitem melhorar a eficiência da degradação do substrato, em decorrência de efeitos sinérgicos e da melhora na concentração de nutrientes que tende a estar mais próximo dos valores considerados ótimos para digestão anaeróbia, proporcionando maior produção de biogás (BELLE et al., 2015).

Vários estudos recentes relataram a co-digestão de vinhaça e outros resíduos. Entre eles, destaca-se o realizado por Adarme et al., (2022), tratando uma mistura de vinhaça de cana-de-açúcar com hidrolisado de hemicelulose, em um sistema experimental de dois estágios. O primeiro reator acidogênico de leito estruturado era seguido por reator metanogênico UASB, e demonstraram que a separação de fases em reatores distintos, permitiu que a fase acidogênica, atuasse como etapa biodesintoxicante, melhorando o desempenho da fase metanogênica e obtiveram remoção total de DQO superior a 80% com rendimento de metano de  $0,243 \text{ N L CH}_4 \text{ g DQOr}^{-1}$ .

Volpi et al., (2021) trataram uma mistura de vinhaça de cana-de-açúcar, torta de filtro e licor de desacetilação que é um produto do pré-tratamento da palha da cana, para produção de etanol de segunda geração. Os autores utilizaram um reator semi-contínuo de tanque agitado (s-CSTR), em temperatura termofílica e obtiveram a estabilização da metanogênese a partir de uma COV de  $3,20 \text{ g SV (L d)}^{-1}$  sendo o maior rendimento de metano  $0,23 \text{ N L CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ SV}$  com eficiência média de remoção

de matéria orgânica de 83%, aplicando uma COV de  $4,16 \text{ g SV (L d)}^{-1}$ . De acordo com os autores esse rendimento foi superior, quando comparado ao rendimento da digestão anaeróbia somente da vinhaça relatado por SANTANA JUNIOR; DUDA; OLIVEIRA (2019).

ALBUQUERQUE; RATUSZNEI; RODRIGUES (2019), investigaram o tratamento de uma mistura de vinhaça de cana-de-açúcar e soro de queijo, em um reator termofílico com biomassa imobilizada, mecanicamente agitado e operado em batelada sequencial e batelada alimentada e obtiveram o melhor resultado, com mistura de 25% de soro de queijo e 75% de vinhaça, no modo descontínuo alimentado, com uma COV de  $25 \text{ g DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  e rendimento de metano  $343,3 \text{ mL CH}_4 \text{ g DQO}^{-1}$ .

BARROS et al., (2017) relataram em seu estudo, tratando uma mistura de vinhaça de cana-de-açúcar e torta de filtro, utilizando uma configuração de dois reatores UASB em série, na temperatura termofílica, que o uso da torta de filtro como suplementação da vinhaça e a utilização da recirculação do efluente, contribuiu para o aumento da conversão de vinhaça em metano e para a estabilidade do processo. A maior produção de metano alcançada foi de  $4,0 \text{ L CH}_4 \text{ (L d)}^{-1}$ , com uma COV aplicada de  $45 \text{ g DQO (L d)}^{-1}$ .

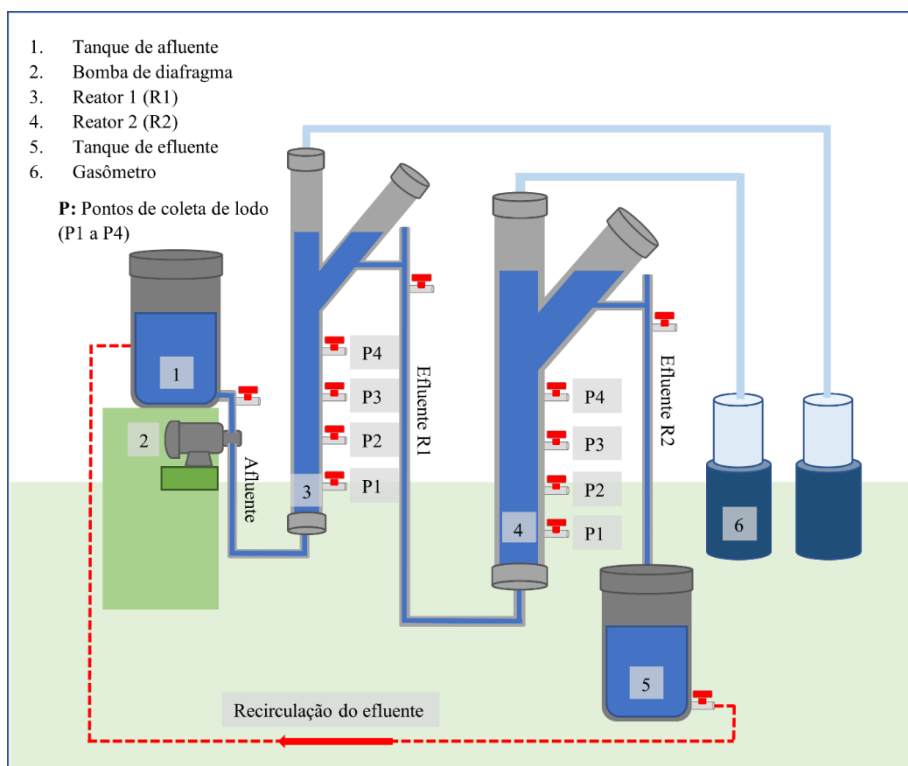
A co-digestão anaeróbia da vinhaça e das ARBL pode ser uma alternativa interessante para regiões produtoras de etanol e leite, para o aumento da produção de biogás além de contribuir para a diminuição dos surtos da mosca dos estábulos. As moscas dos estábulos adultas são hematófagas e sua picada dolorosa causa mudanças comportamentais e consequentes perdas na produção animal (MULLENS et al., 2006). A proliferação de maneira desordenada da mosca dos estábulos está sendo relacionada a aplicação de vinhaça ao solo, e a proibição das queimadas dos canaviais (DOMINGHETTI et al., 2015). De acordo com a CATI (2022), estudos e resultados de pesquisas revelaram a estreita associação da infestação de moscas com subprodutos da indústria sucroalcooleira, torta de filtro e palha com vinhaça e confirmando o potencial desses ambientes no desenvolvimento larval desta espécie.

Na pecuária os criadouros das moscas estão relacionados principalmente à presença de matéria orgânica em fermentação (RODRÍGUEZ-BATISTA et al., 2005). De acordo com Dominghetti et al., (2015), o controle bem-sucedido de moscas em instalações de gado de corte e bovinocultura leiteira depende de práticas de manejo sanitário adequadas para eliminar ou tratar adequadamente dejetos dos animais.

## MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Instalações experimentais

O sistema de tratamento utilizado foi composto por dois reatores UASB (R1 e R2), instalados em série, conforme demonstrado na Figura 3.



**Figura 3.** Representação esquemática das instalações com os reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB, R1 e R2), em série, utilizados para a co-digestão da vinhaça e águas residuárias da bovinocultura de leite.

Os volumes totais dos reatores UASB, R1 e R2, foram de 16,0 e 36,7 L, respectivamente. O intuito da utilização do reator UASB – R1 menor que o R2, é permitir a separação de fases, com a hidrólise principalmente no primeiro reator e a metanogênese no segundo reator. Os reatores, R1 e R2, foram construídos de tubos de PVC, com diâmetros de 100 e 150 mm e alturas de 2.030 e 2.080 mm, respectivamente, com separadores de fase em forma de Y, com um ângulo de 45° em relação a vertical, conforme descrito por (CAVALCANTI et al., 1999) e adaptado por (BRUNO E OLIVEIRA, 2013 e VILLA-MONTOYA et al., 2017). Para o monitoramento da produção de biogás, foram instalados gasômetros de fibra de vidro com volume de 35 L em cada reator.

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Saneamento Ambiental, do Departamento de Engenharia e Ciências Exatas da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Jaboticabal.

## 4.2 Condições operacionais

O tempo de detenção hidráulica (TDH) aplicado foi de 24 e 55 h, no reator UASB, R1 e R2, respectivamente. A carga orgânica volumétrica (COV), utilizada na condução do experimento foi de 5,64 e 1,07 kg DQO ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ), para R1 e R2 respectivamente (Tabela 2).

**Tabela 2.** Condições operacionais dos reatores UASB (R1 e R2) em série, utilizados na co-digestão anaeróbia da vinhaça e das águas residuárias da bovinocultura de leite.

	R1	R2
<b>Volume (L)</b>	16	36,7
<b>TDH (h)</b>	24	55
<b>COV (kg DQOtotal <math>\text{m}^{-3} \text{d}^{-1}</math>)</b>	5,64	1,07

TDH: tempo de detenção hidráulico; COV: carga orgânica volumétrica; DQOtotal: demanda química de oxigênio total.

A carga orgânica volumétrica foi calculada, conforme descrito por Chernicharo (2016) e representado na equação 1:

$$COV = \frac{Q * S_0}{V} \quad (1)$$

Onde:

COV: Carga orgânica volumétrica ( $\text{kg DQOtotal} (\text{m}^3 \text{d}^{-1})$ );

Q: Vazão ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ );

S<sub>0</sub>: Concentração de substrato no afluente ( $\text{Kg DQOtotal} \text{m}^{-3}$ )

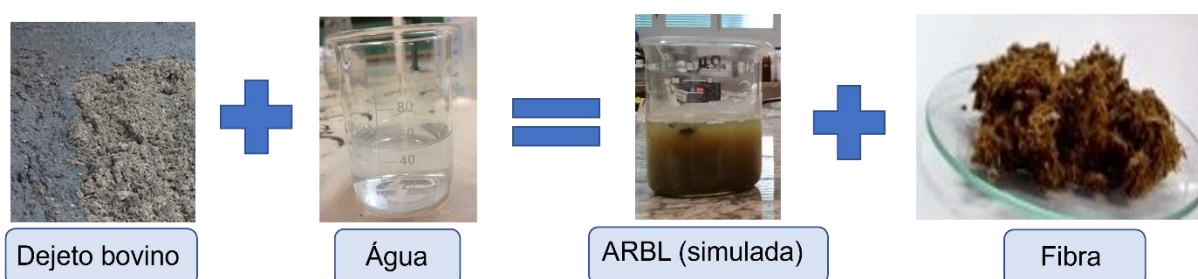
V: Volume total do reator ( $\text{m}^3$ );

### 4.3 Afluente

A vinhaça utilizada foi obtida na usina produtora de etanol, situada na região de Ribeirão Preto, coletada mensalmente na saída da coluna de destilação. O pH médio da vinhaça foi de 4,6, conforme apresentado na Tabela 2.

O dejetos bovino foi coletado duas vezes por semana em um sistema de semi-confinamento, com 40 animais adultos em período de lactação, localizado no setor de bovinocultura, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Jaboticabal. A alimentação dos animais era composta por 60% volumoso e 40% concentrado. Os animais recebiam silagem de milho e suplemento mineral constituído por Ca, P, Na, Mg, S, Zn, Cu, P, Mn, Co, I, e Se e após a segunda ordenha do dia eram liberados no pasto.

Para simular a água residuária da bovinocultura de leite, o dejetos foi diluído na proporção de 1:5 (esterco/água) simulando um sistema “Free Sttal” conforme descrito por (DIAS; FRAGOSO; DUARTE, 2014). Após a diluição, a mistura era peneirada em malha de 1 mm, retirando as fibras e sólidos grosseiros presentes no esterco, removendo material orgânico de difícil degradação para melhoria da digestão anaeróbica e para evitar entupimento da bomba e tubulações (Figura 4). Para a partida, nos primeiros sete dias do experimento foi utilizado como afluente somente as ARBL. Posteriormente iniciou-se a co-digestão, com a vinhaça e as ARBL, na proporção de 75 e 25% (volume), respectivamente (Tabela 3).



**Figura 4.** Foto do esquema de preparo da água residuária da bovinocultura leiteira (ARBL) utilizada no experimento.

Para a correção do pH do afluente para valores próximos a neutralidade, foi adicionado o hidróxido de cálcio, na primeira semana do experimento. Após esse período a alcalinidade produzida pelos reatores UASB, foi o suficiente para corrigir o pH, somente com a utilização da recirculação do efluente. A taxa de recirculação do

efluente foi de 0,85 durante todo o ensaio. A taxa de recirculação foi calculada, conforme (ZUO et al., 2013) e descrito na equação 2.

$$RR = \frac{Q_e}{Q_f} \quad (2)$$

Onde:

RR: Taxa de recirculação;

Q<sub>e</sub>: Volume de efluente recirculado (m<sup>3</sup>);

Q<sub>f</sub>: Volume do afluente (m<sup>3</sup>).

**Tabela 3.** Características da vinhaça e águas residuárias da bovinocultura leiteira (ARBL).

Parâmetros	Vinhaça	c.v. (%)	ARBL	c.v. (%)
pH	4,6	11	6,3	8
DQO <sub>total</sub>	44.800	8	24.090	13
NTK	369	4	508	8
P-t	34	6	255	13
DQO <sub>total</sub> :NTK:P-t	350:2,8:0,3	-	350:7,4:3,7	-

DQO<sub>total</sub>: demanda química de oxigênio total; P-t: fósforo total; NTK: nitrogênio total kjedahl, c.v.: coeficiente de variação. Unidades: mg L<sup>-1</sup>, exceto pH e c.v. (%).

#### 4.4 Lodo de inóculo

Os reatores UASB, R1 e R2 foram inoculados, preenchendo-se 30% do volume total de cada reator, com lodo proveniente de um reator UASB, tratando águas residuárias da bovinocultura leiteira. As concentrações de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) do inóculo foram de 31,16 e 24,43 g L<sup>-1</sup>, respectivamente.

#### 4.5 Exames e determinações

Os reatores UASB, R1 e R2 foram operados por 140 dias. Para avaliar o desempenho do sistema de tratamento foram coletadas amostras compostas do afluente e efluente dos reatores UASB, R1 e R2, duas vezes por semana.

Na Tabela 4 estão apresentados os exames físicos e determinações de constituintes orgânicos e inorgânicos que foram efetuadas nas amostras coletadas, a frequência de realização e as fontes das metodologias utilizadas.

**Tabela 4.** Exames e determinações, frequência e fontes das metodologias utilizadas nas amostras do afluente e efluente dos reatores anaeróbios UASB em série, R1 e R2.

<b>EXAMES E DETERMINAÇÕES</b>	<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>
<b>Afluente e efluentes</b>		
pH	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (2005) (Método: 4500 H+B)
Demanda química de oxigênio (DQO <sub>total</sub> e DQO <sub>diss</sub> )	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (2005), (Método: 5220 – B); (16).
Alcalinidade total (AT), parcial (AP) e intermediária (AI)	Duas vezes \ semana	Jenkins, Morgan e Sawyer (1983); APHA (2005);
Sólidos suspensos totais (SST), voláteis (SSV) e fixos (SSF)	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (2005), (Métodos: 2540 - C e 2540 –
Ácidos voláteis totais (AVT)	Duas vezes \ semana	DiLallo e Albertson (1961).
Nitrogênio total Kjeldahl (NTK)	Uma vez \ semana	APHA; AWWA; WPCF (2005) (Método:4500-N-C)
Nitrogênio amoniacal	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (2005) (Método Semi-Micro Kjeldahl)
Fósforo total	Uma vez \ semana	APHA; AWWA; WPCF (2005) (Método: 4500-P-C)
K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn	Uma vez \ semana	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Coliformes totais e termotolerantes	Final do ensaio	APHA; AWWA (2005) tubos múltiplos
<b>Lodo</b>		
Sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV)	Inoculação	APHA; AWWA; WPCF (2005) (Método 2540 – B e 2540 – E)
<b>Biogás</b>		
Produção	Diariamente	(SANTANA; OLIVEIRA, 2005) (Método: Gasômetros)
Composição	Semanal	APHA; AWWA; WPCF (2005) (Método: cromatografia

O volume do biogás produzido foi monitorado diariamente, por meio de medidas em gasômetros, como descrito por (SANTANA; OLIVEIRA, 2005), e a composição do biogás analisada semanalmente, em cromatografia gasosa, conforme descrito por APHA (2005). Foi considerado o volume de metano corrigido para as condições normais de temperatura e pressão (CNTP, 0 °C e 1 atm).

Os dados de temperatura ambiente utilizados foram extraídos de um conjunto de dados pertencentes ao acervo da área de Agrometeorologia do departamento de Ciências Exatas. As observações feitas na estação Agroclimatológica do Campus de Jaboticabal são cotadas, digitadas em formato padronizado, realizada a consistência e controle de qualidade. Em seguida são obtidas as médias diárias mensais e anuais que são repassadas aos usuários.

## 4.6 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO E ENERGIA ELÉTRICA

### 4.6.1 Potencial de produção de metano

O potencial de produção de metano foi calculado conforme (SPEECE, 1983) e descrita nas equações 3, 4 e 5. A produção de metano também foi determinada utilizando-se gasômetros, e as estimativas permitiram as comparações.

$$DQO_{CH_4} = Q_{WW} * [(SO - S) - ((Y_{obs} * K_{solid}) * (SO - S))] \quad (3)$$

Onde:

$DQO_{CH_4}$ : Demanda química de oxigênio convertida em metano, em Kg  $DQO_{CH_4}d^{-1}$ ;

$Q_{ww}$ : Vazão do afluente, em  $m^3d^{-1}$ ;

$SO$ : DQO do afluente, em  $KgDQOm^{-3}$ ;

$S$ : DQO do efluente, em  $KgDQOm^{-3}$ ;

$Y_{obs}$ : Coeficiente de produção de sólidos no sistema, igual a 0,11  $KgDQO_{lodo}KgDQO_{aplicado}^{-1}$

$K_{solid}$ : Fator de conversão dos sólidos voláteis totais (SVT) em DQO, igual a 1,42  $KgDQO KgSVT^{-1}$

Conversão de  $DQO_{CH_4}$  de  $KgDQO_{CH_4}d^{-1}$  em  $m^3CH_4d^{-1}$ :

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (4)$$

Onde:

$Q_{CH_4}$ : Volume de metano produzido, em  $Nm^3d^{-1}$ ;

$K(t)$ : Fator de correção da temperatura de operação do reator, em  $KgDQOm^{-3}$ .

Fator de correção da temperatura de operação do reator:

$$K(t) = \frac{PK}{RT} \quad (5)$$

Onde:

P: Pressão atmosférica, igual a 1atm;

K: DQO correspondente a 1mol de CH<sub>4</sub>, igual a 64g DQOmol<sup>-1</sup>

R: Constante universal dos gases, igual a 0,08206 atmLmol<sup>-1</sup>

T: Temperatura de operação do reator, em K.

#### 4.6.2 Potencial de produção de energia elétrica

O potencial de produção de energia elétrica foi calculada segundo (KYTHREOTOU; TASSOU; FLORIDES, 2012) e descrita na equação 6.

$$E_{EL} = \frac{BG * CH_4 * EF_{EL} * pCH_4 * EN_{CH_4}}{3,6 \text{ MJ/kWh}} \quad (6)$$

Onde:

E<sub>EL</sub>: Produção de energia elétrica em kWh;

BG: Volume de biogás em m<sup>3</sup>;

CH<sub>4</sub>: Teor percentual de metano no biogás em %;

EF<sub>EL</sub>: Eficiência elétrica do gerador igual a 35%;

pCH<sub>4</sub>: Densidade do metano igual a 0,6556 Kgm<sup>-3</sup>;

EN<sub>CH<sub>4</sub></sub>: Densidade energética do metano igual a 56,6 MJKg<sup>-1</sup>.

3,6: Conversão de MJ para Kwh

#### 4.7 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais (ACP) foi feita por meio do software Statistic versão 7. A ACP foi utilizada para estabelecer a relação entre as diferentes condições experimentais, para identificar as variáveis que representam a maior variância no conjunto de dados sob as diferentes condições de operação. A adequação desta análise é verificada pela quantidade de informação total das variáveis originais retida pelos componentes principais (CP1, CP2 e CP3). Os dados originais foram padronizados conforme a equação 7.

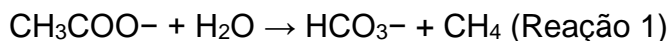
$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (7)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 pH, alcalinidade e ácidos voláteis

Foram observados valores de pH e alcalinidade parcial (AP) nos efluentes dos reatores UASB, R1 e R2 superiores aos observados no afluente (Fig. 5B e 5C). Isto indica a capacidade de tamponamento nos reatores anaeróbios, mesmo com a variação da COV (Fig. 5A). O valor médio observado nesse estudo para relação Al/AP foi de 0,12 para os reatores R1 e R2, com valor máximo 0,26 (R1) e 0,27 (R2) (Fig. 5C), estando na faixa ideal recomendada por Ripley et al., (1986), (Fig. 5C). A relação Al/AP, inferior a 0,3 indica estabilidade do processo de digestão anaeróbia, conforme descrito por Ripley et al., (1986), para o tratamento de esgoto sanitário.

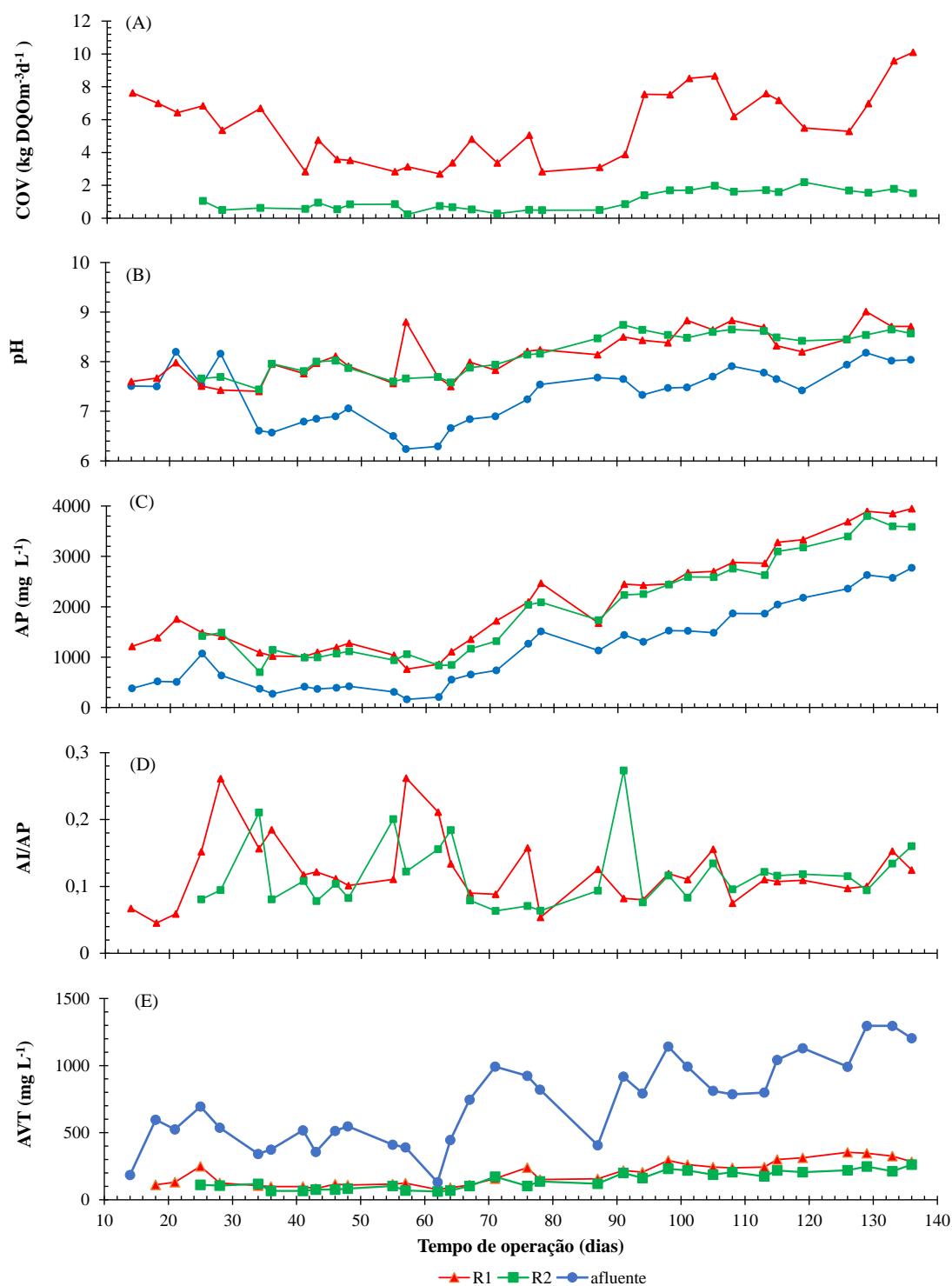
A alcalinidade nos reatores anaeróbios pode ser gerada pelo consumo de acetato pelas arqueias acetoclásticas (VUITIK et al., 2019), conforme descrito na reação 1.



Uma estratégia frequentemente usada para manter a estabilidade de reatores anaeróbios no tratamento da vinhaça, quanto a alcalinidade, é a aplicação de substâncias alcalinizantes, como bicarbonato de sódio e hidróxido de sódio (BARROS; DUDA; OLIVEIRA, 2016a; JANKE et al., 2016). No entanto neste trabalho com a co-digestão da vinhaça com as ARBL aliada a recirculação do efluente foi possível melhorar a alcalinidade e manter o equilíbrio adequado entre alcalinidade e AVT, sem a necessidade de produtos químicos adicionais.

Observa-se uma tendência de aumento do pH dos efluentes dos reatores R1 e R2, para valores superiores a 8,0, principalmente após 90 dias de operação do sistema de tratamento (Fig. 5B). Valores de pH superiores a 8,0 também foram observados por Barros et al., (2017) utilizando reatores UASB em série, no tratamento da vinhaça, e com a recirculação do efluente para a adequação das COV e suplementação da alcalinidade. De acordo com Mao et al., (2015) a variação do pH afeta a taxa de crescimento microbiano e a faixa ideal para o processo de digestão anaeróbia ocorre entre pH 6,8 a 7,4. A recirculação pode retornar aos reatores anaeróbios os bicarbonatos produzidos na digestão anaeróbia, aumentando o pH do efluente (KOVALEV et al., 2021). No entanto, mesmo com valores de pH superiores

aos considerados ideais para a digestão anaeróbia observou estabilidade no processo.



**Figura 5.** (A) Carga orgânica volumétrica (COV), (B) pH, (C) alcalinidade parcial (AP), (D) relação da alcalinidade intermediária pela alcalinidade parcial (AI/AP), (E) ácidos voláteis totais (AVT) durante o período experimental nos reatores UASB, R1 e R2, utilizados na co-digestão anaeróbia de vinhaça e águas residuárias da bovinocultura leiteira.

Os valores médios de AVT diminuíram de 716 mg L<sup>-1</sup> no afluente para 204 mg L<sup>-1</sup> no efluente do R1 e 132 mg L<sup>-1</sup> no efluente do R2. Estes valores de AVT do efluente do R1 e R2, estão dentro dos valores médios indicados por Speece (2008), de 100 a 200 mg L<sup>-1</sup>, indicando um bom funcionamento do sistema de tratamento. Os ácidos voláteis totais (AVT) são importantes durante o processo de digestão anaeróbia, porque o seu acúmulo pode afetar a estabilidade do sistema de tratamento, reduzir o pH e impedir a produção de metano pelos microorganismos (CHEN et al., 2021).

Os valores de AVT observados neste trabalho foram inferiores aos relatados por Barros et al., (2016), tratando vinhaça em um reator UASB, com a aplicação de COV de 7,5 kg DQO m<sup>-3</sup>d<sup>-1</sup> e aplicando recirculação do efluente, que observaram valores médios de AVT no efluente de 3050 mg L<sup>-1</sup>. Isto pode ter ocorrido em virtude da co-digestão anaeróbia da vinhaça com as ARBL, que pode ter proporcionado melhorias nas condições nutricionais e na proporção de nitrogênio e fósforo, com aumento da relação DQO:N:P de 350:9:3 (Tabela 3), muito superior ao recomendado de 350:5:1, para a digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 2007).

Outro fator importante de estabilidade é a relação entre os ácidos voláteis totais e a alcalinidade total (AVT/AT), com valores médios observados de 0,10 (R1) e 0,07 (R2) e inferiores a 0,8 que pode indicar inibição das arqueias metanogênicas (ZHAO; VIRARAGHAVAN, 2004).

## **5.2 Demanda química de oxigênio (DQO), sólidos, nitrogênio, fósforo e coliformes**

Os valores médios de DQO<sub>total</sub> e sólidos totais (ST) diminuíram do afluente para os efluentes dos reatores UASB, R1 e R2 (Tabela 5). Isto proporcionou remoções médias de 63, 41 e 77% para a DQO<sub>total</sub> no R1, R2 e R1+R2, respectivamente e de 69 e 68% para os ST, no R1 e R1+R2 respectivamente (Figura 6).

Observa-se o decréscimo nas remoções de DQO<sub>total</sub> a partir dos 75 dias de operação dos reatores UASB, o que pode ter ocorrido em virtude do acúmulo de compostos de difícil degradação que permanecem no sistema, em virtude da recirculação. Isto também foi observado por SANTANA JUNIOR et al., (2019) e BARROS et al., (2016), o que pode acarretar o decréscimo nas remoções de material orgânico e produção de biogás quando utilizado por longos períodos.

A relação SV/ST no afluente e efluentes do R1 e R2 foram de 0,68; 0,53 e 0,60, respectivamente (Tabela 5), indicando que houve aumento dos sólidos fixos (SF) do afluente do R1 e R2, em virtude do consumo dos sólidos voláteis.

Embora o R2 tenha contribuído com valores inferiores de remoção de DQOtotal e sólidos, ele é importante para a estabilização do processo e geração de um efluente de melhor qualidade (Tabela 5).

**Tabela 5.** Valores médios da demanda química de oxigênio total (DQOtotal), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), relação SV/ST, nitrogênio amoniacal (N-am.), nitrogênio total kjedahl (NTK), fósforo total (P-t), K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, Co, relação entre DQO:NTK:P e respectivos coeficientes de variação (c.v.), do afluente e efluentes dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), R1 e R2 durante a co-digestão anaeróbia de vinhaça e águas residuárias da bovinocultura leiteira.

Parâmetro	Afluente	c.v.	R1		R2	
				c.v.		c.v.
DQOtotal	5636	39	2078	54	1377	72
ST	6918	47	4560	57	3770	59
SV	4640	51	2370	63	2530	51
SV/ST	0,68	18	0,53	18	0,60	24
N-am.	39	39	44	41	45	50
NTK	147	63	97	46	70	58
P-t	55	51	37	32	31	16
K	23	53	22	54	21	50
Ca	5,0	55	3,7	71	3,5	60
Mg	3,4	39	3,4	43	3,3	37
Na	37,8	21	36,2	14	38,9	22
Fe	17,3	111	10,0	114	7,4	148
Mn	1,4	79	0,9	74	0,6	45
Cu	0,12	137	0,06	125	0,03	119
Zn	0,37	118	0,16	129	0,07	108
Co	0,01	159	0,01	178	0,02	156
DQOtotal:NTK:P-t	350:9:3		350:16:6		350:18:8	

Unidade: mg L<sup>-1</sup>, exceto DQOtotal:NTK:P-t (adimensional) e c.v.: (%).

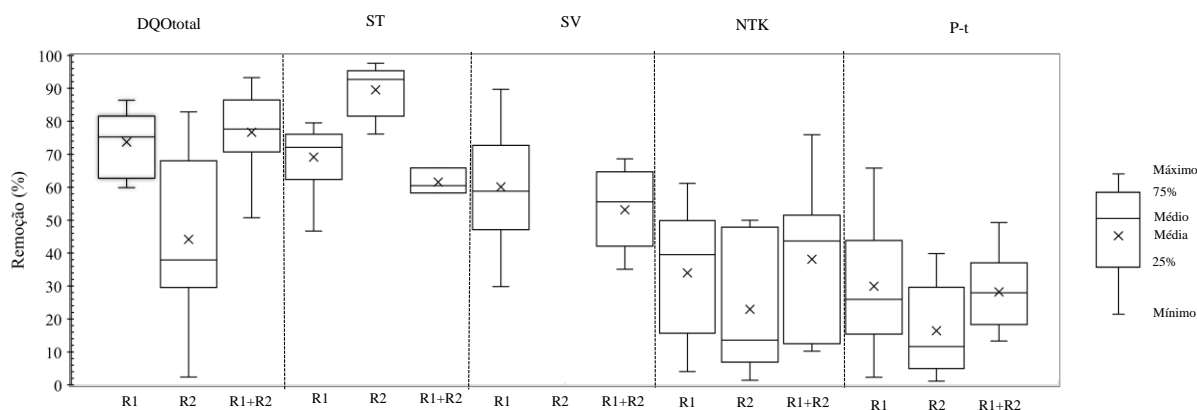
O nitrogênio amoniacal é consumido para o crescimento dos microrganismos e a concentração média no afluente e efluentes do R1 e R2 foram de 39, 44 e 45 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 5). O nitrogênio amoniacal pode exercer efeito inibitório na digestão anaeróbia, mas os valores de até 200 mg L<sup>-1</sup>, como observadas neste trabalho são consideradas benéficas (Espanña-Gamboa et al., 2012).

Os valores de NTK e fósforo total (P-t) diminuíram do afluente para o efluente dos reatores UASB, R1 e R2 (Tabela 5), o que proporcionou remoções de 38% para o NTK e P-t, no R1 + R2 (Figura 6). Conforme Oliveira et al. (1997), um dos possíveis mecanismos para remoção de nitrogênio e fósforo é a formação de estruvita (NH<sub>4</sub> MgPO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O) e vivianita (Fe<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O), que precipitam e são imobilizados na manta de lodo. No efluente do R2 ainda foram observados valores médios de NTK, P-t e K de 70, 31 e 21 mg L<sup>-1</sup>. Essa característica é interessante, pois o efluente pode ser utilizado na fertirrigação da cana-de-açúcar. Assim, os nutrientes disponíveis no efluente e retidos no lodo podem ser aproveitados com a reposição de parte do fertilizante mineral e redução dos custos de produção (BARROS et al., 2017b).

Houve redução nas concentrações de Fe, Mn e Zn (Tabela 5), esses elementos estão entre os oligoelementos necessários para a síntese de diversos microrganismos anaeróbios, participando como cofatores enzimáticos para diversas enzimas (SINGH; KUMAR; OJHA, 1999). A deficiência de oligoelementos causa diminuição do desempenho e aumento das concentrações de AVT (SCHMIDT et al., 2014), o que não foi observado neste trabalho.

Conforme descrito por Boonyakitsombut et al., (2002) e citado Barros et al., (2017) a adição de ferro, cobalto, níquel e/ou extrato de levedura foi necessária para aumentar a taxa de utilização do propionato para cerca de duas vezes a do controle. Para degradação do propionato, o propionato deve primeiro ser oxidado por bactérias oxidantes de propionato em acetato e hidrogênio como produtos intermediários que são então convertidos em metano pelas arqueias metanogênicas acetotróficas e hidrogenotróficas, respectivamente. O papel da necessidade de nutrientes para estimular a atividade de cada grupo bacteriano e arqueias nos consórcios é importante para aumentar a degradação do propionato (Barros et al., 2017).

Não se observaram remoções de Mg, um elemento importante para os microrganismos metanogênicos, pois alguns apresentam necessidade de magnésio para estimular a multiplicação, e em algumas espécies o magnésio reduz o tempo de geração (SINGH; KUMAR; OJHA, 1999).



**Figura 6.** Eficiências de remoção da demanda química de oxigênio total (DQO total), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), nitrogênio total kjedahl (NTK) e fósforo total (P-t) durante o período experimental, nos reatores UASB, R1, R2 e R1+R2.

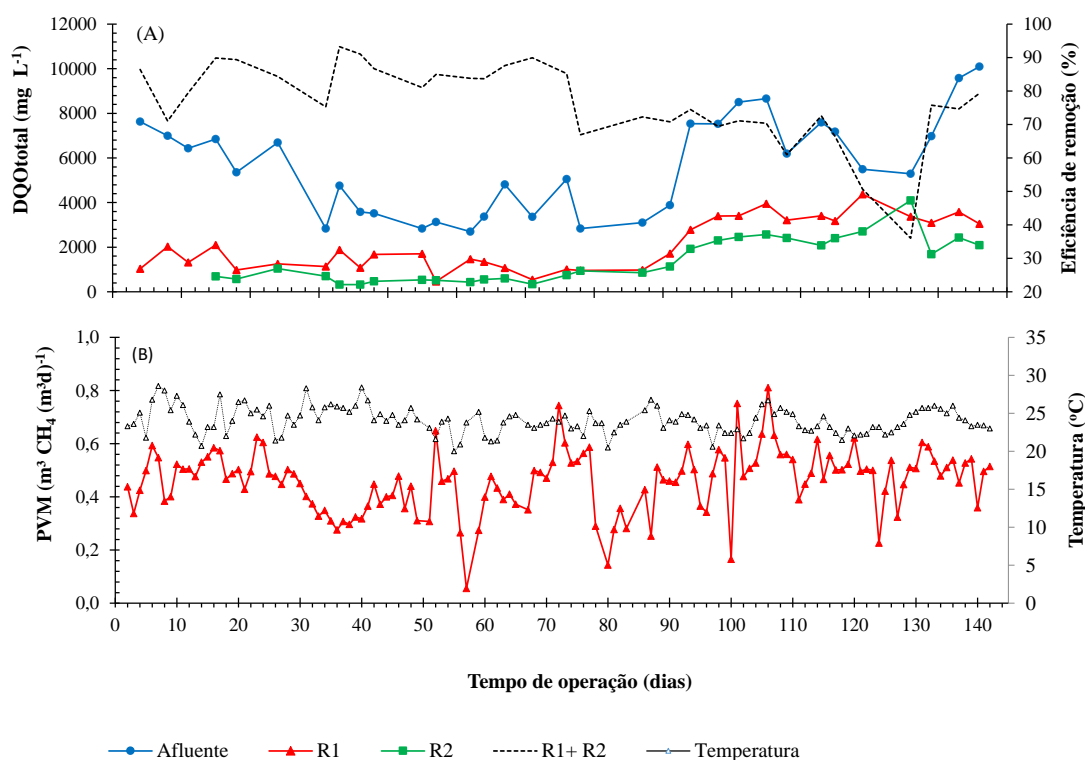
Observaram-se relação DQO:N:P de 350:9:3; 350:16:6 e 350:18:9 no afluente e efluentes do R1 e R2, respectivamente (Tabela 5), muito superior ao recomendado de 350:5:1, para a digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 2007). Barros et al. (2017), operando dois reatores UASB, sem série, na faixa de temperatura termofílica, utilizando como afluente a vinhaça e a torta de filtro, para COV próximas a 8 gDQOtotal (L d)<sup>-1</sup>, observaram valores de DQO:N:P no afluente de 350:7,6:1,7. Indicando, que a co-digestão da vinhaça e das ARBL pode ser uma alternativa para suplementação de nitrogênio e fósforo.

Foi observado no afluente valores de coliformes totais e termotolerantes de  $14 \times 10^7$  NMP/100 mL e eficiências de remoção para o R1+R2, de 99,9%. Mas nos efluentes dos reatores UASB, R1 e R2, ainda se observaram valores de  $11 \times 10^4$  e de  $6 \times 10^4$  NMP/100 mL de coliformes totais e termotolerantes. URBINATI (2011) fazendo o reúso dos efluentes tratados em reatores UASB e do dejetos bruto de águas residuárias de suinocultura observaram que mesmo aplicados em doses muito maiores comparativamente ao dejetos bruto, os efluentes tratados promoveram menor contaminação do solo por coliformes totais e termotolerantes.

### 5.3 Produção de biogás e energia elétrica

Foi observado a produção de biogás somente no R1, com concentração média de metano no biogás de até 51,77%. A produção volumétrica média foi de 0,451 e 0,136 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup>d<sup>-1</sup> no R1 e R1+ R2, respectivamente, com temperaturas médias do

ar de 24 °C, e variações de 20,0 a 28,6 °C (Figura 7 B). As mudanças ambientais repentinas, como aumentos ou quedas drásticas na temperatura, acarretam distúrbios em todos os parâmetros do processo, requerendo um longo período de adaptação para um estado estável da digestão anaeróbia (WANG et al., 2019). No entanto, durante a operação dos reatores UASB, os coeficientes de variação da temperatura média do ar foram de 7%, o que não provocou distúrbios no processo.



**Figura 7.** (A) Demanda química de oxigênio total (DQO total) e eficiência de remoção de DQO total nos reatores UASB (R1 + R2), (B) Produção volumétrica de metano (PVM) e temperatura média do ar durante o período experimental, nos reatores UASB, R1 e R2

A produção específica de metano, nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP) foi de  $0,15 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg DQOremovido})^{-1}$  e  $0,42 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg SV})^{-1}$  (Tabela 6), o que corresponde a aproximadamente 43% do rendimento teórico de metano, que é  $0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kgDQOremovido})^{-1}$  (MCCARTY, 1964). Também foi estimado a produção volumétrica de metano e obtiveram-se 1,134; 0,104 e  $0,410 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  para o R1, R2 e R1+R2, respectivamente (Tabela 6). A partir desses resultados, observa-se que a produção volumétrica de metano obtida no R1 é 39,7% da produção teórica, e pode ter ocorrido em virtude das perdas metano dissolvidos no

efluente. No R2, em virtude da baixa COV aplicada, de 1,07 g DQOtotal (L d)<sup>-1</sup> e das baixas produções volumétricas de metano, não foi possível a sua determinação utilizando os gasômetros e a produção volumétrica estimada foi de 0,104 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> (Tabela 5). Sugere-se o aumento das COV, para se avaliar efetivamente a contribuição do R2 na produção de biogás.

Segundo Stazi and Tomei (2021), as perdas de metano em reatores UASB podem variar de 20 a 60%, motivadas pela saída de metano dissolvido no efluente e também como resultado da transferência deste gás, da superfície do reator, para atmosfera, dependendo isto do tamanho da superfície líquida e da presença ou não de uma cobertura (hermética) da superfície do reator. As perdas de metano dissolvido no efluente ou no gás residual não apenas representam uma perda de potencial energético, mas também contribuem com a emissão de gases de efeito estufa.

**Tabela 6.** Valores médios da produção volumétrica de metano (PVM) estimada e produzida, produção volumétrica específica de metano e produção de energia elétrica do biogás, a partir da co-digestão da vinhaça e águas residuárias da bovinocultura de leite, em dois reatores UASB, R1 e R2, em série.

Parâmetro	R1	c.v. (%)	R2	c.v. (%)	R1+R2	c.v. (%)
PVM	0,451	30	-	-	0,136	30
PVM estimada*	1,134	47	0,104	69	0,410	39
PEM**	0,15	67	-	-	0,11	58
PEM***	0,41	113	-	-	0,36	166
En	0,023	30	-	-	0,003	30

PVM: produção volumétrica de metano (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup> reator d)<sup>-1</sup>); PVM estimada\*: produção volumétrica de metano (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup> reator d)<sup>-1</sup>), conforme descrito por (Speece, 2008); PEM\*\*: produção específica de metano ((m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> (kg DQOtotal removida)<sup>-1</sup>); PEM\*\*\*: produção específica de metano ((m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> (kg SV removida)<sup>-1</sup>); En: Energia elétrica (kW d<sup>-1</sup>)

Os valores de produção volumétrica e específica de metano são similares aos observados por (BARROS et al., 2017b) realizando a co-digestão de vinhaça e torta de filtro em reatores UASB, com COV de 8 g DQOtotal (L d)<sup>-1</sup> e obtiveram valores de 0,41 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> e 0,17 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (kg DQOremovido)<sup>-1</sup>, respectivamente.

O potencial de produção de energia elétrica estimada foi de 0,023 kWh d<sup>-1</sup> (Tabela 6). Considerando-se a vazão de vinhaça diária afluyente aos reatores UASB, pode-se produzir 10,65 kWh d<sup>-1</sup> por m<sup>3</sup> de vinhaça, ou seja 39% da energia elétrica

necessária para processar uma tonelada de cana-de-açúcar. Considerou-se que são necessários 28kWh de energia elétrica para o processamento de cada tonelada de cana (JOPPERT et al., 2017) e uma tonelada de cana-de-açúcar pode gerar em média um metro cúbico de vinhaça (SANTANA JUNIOR; DUDA; OLIVEIRA, 2019).

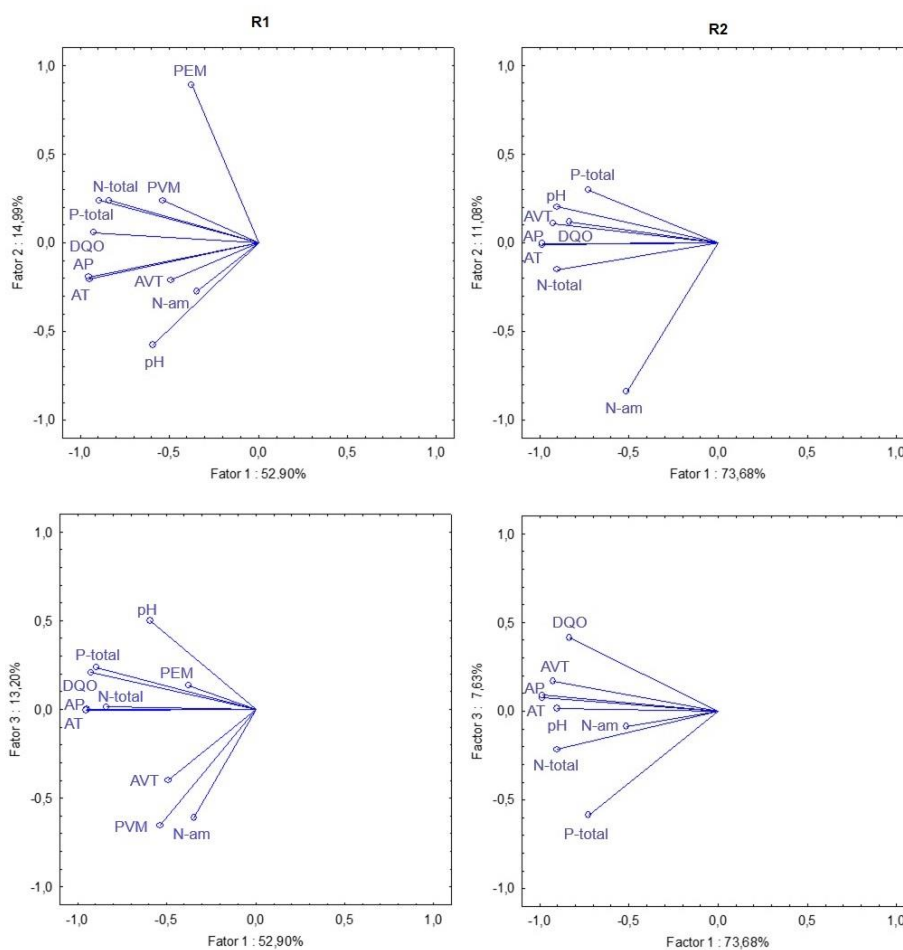
#### **5.4 Análise de componentes principais.**

A análise de componentes principais (ACP) foi utilizada para demonstrar o efeito das variáveis operacionais (pH, AT, AP, AVT, DQO, N-am, N-total e P-total) sobre as variáveis de biogás (PVM e PEM) no R1 e a correlação das variáveis operacionais no R2. A localização das amostras apresenta a variabilidade induzida por diferentes fatores e o comprimento do vetor para cada variável representa o nível de associação para cada um dos componentes principais (CP 1, CP 2 e CP 3), sendo estes responsáveis por explicar mais de 80% das variações dos dados no R1 e mais de 90% da variação dos dados no R2. A intensidade da relação entre as variáveis está indicada pelos valores percentuais nas abscissas e ordenadas do plano (Figura 8).

No R1 e R2 houve uma correlação positiva entre AT, AP e DQO, demonstrando que o consumo de matéria orgânica pelos microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia e a manutenção da alcalinidade nos reatores estão diretamente ligados.

A PVM e a PEM no R1 obtiveram pouca correlação, ou seja, com o aumento da PEM não havia aumento correspondente da PVM, houve baixa correlação entre DQO e PEM o que pode ser confirmado pelos baixos valores da PEM de 0,15 LCH<sub>4</sub> gDQO<sup>-1</sup> removido.

Houve correlação positiva entre fósforo total, nitrogênio total, DQO e a produção de metano, indicando que quanto maior as concentrações de DQO, fósforo total e nitrogênio total, maior a produção de metano, demonstrando que a adição de ARBL a vinhaça, auxilia a digestão anaeróbia.



**Figura 8.** Análise dos componentes principais dos reatores UASB, R1 e R2. AVT: ácidos voláteis totais; PVM: produção volumétrica de metano; P-total: fósforo total; N-am.: nitrogênio amoniacal; AT: alcalinidade total; AP: alcalinidade parcial; DQO: demanda química de oxigênio.

## 6 CONCLUSÃO

A co-digestão anaeróbia da vinhaça e das ARBL permitiu a estabilidade do processo anaeróbio e pode ser uma alternativa viável para o tratamento conjunto da vinhaça e das ARBL nas condições estudadas.

Foram observados valores médios de produção volumétrica de metano de  $0,451 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$  no R1. A estimativa teórica da produção de energia elétrica do biogás obtido foi de  $10,65 \text{ kWh d}^{-1}$  por  $\text{m}^3$  de vinhaça, ou seja 39% da energia elétrica necessária para processar uma tonelada de cana-de-açúcar.

Embora o R2 tenha contribuído com valores inferiores de remoção de  $\text{DQO}_{\text{total}}$  e sólidos, ele é importante para a estabilização do processo e geração de um efluente de melhor qualidade. As eficiências de remoção de NTK, P-total, Ca, Mg e Fe foram baixas, indicando que o efluente pode ser utilizado na fertirrigação da cana-de-açúcar.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. N.; RATUSZNEI, S. M.; RODRIGUES, J. A. D. Biomethane production by thermophilic co-digestion of sugarcane vinasse and whey in an AnSBBR: Effects of composition, organic load, feed strategy and temperature. **Journal of Environmental Management**, v. 251, n. September, p. 109606, 2019a.
- ALBUQUERQUE, J. N.; RATUSZNEI, S. M.; RODRIGUES, J. A. D. Biomethane production by thermophilic co-digestion of sugarcane vinasse and whey in an AnSBBR: Effects of composition, organic load, feed strategy and temperature. **Journal of Environmental Management**, v. 251, n. September, p. 109606, 2019b.
- ÁLVAREZ, J. A.; OTERO, L.; LEMA, J. M. A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 4, p. 1153–1158, 1 fev. 2010.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. [s.l.] American Public Health Association, 2005.
- ARAUJO. DIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHAÇA EM REATORES UASB TERMOFÍLICOS, EM SÉRIE, COM ADIÇÃO DE Fe, Ni e Co. 2017.
- ASLANZADEH, S. et al. The effect of effluent recirculation in a semi-continuous two-stage anaerobic digestion system. **Energies**, v. 6, n. 6, p. 2966–2981, 2013.
- BARROS, V. G. DE et al. Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of Methanothermobacter and Methanosarcina archaea and Thermotogae bacteria. **Bioresource Technology**, v. 244, n. May, p. 371–381, 2017a.
- BARROS, V. G. DE; DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A. DE. Biomethane production from vinasse in upflow anaerobic sludge blanket reactors inoculated with granular sludge. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 47, n. 3, p. 628–639, 2016a.
- BARROS, V. G. DE; DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A. DE. Biomethane production from vinasse in UASB reactors inoculated with granular sludge. **Brazilian Journal of Microbiology**, p. 1–12, 2016b.
- BARROS, V. G. D. et al. Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of Methanothermobacter and Methanosarcina archaea and Thermotogae bacteria. **Bioresource Technology**, v. 244, 2017b.
- BELLE, A. J. et al. Anaerobic co-digestion of forage radish and dairy manure in complete mix digesters. **Bioresource Technology**, v. 178, p. 230–237, 1 fev. 2015.
- BRUNO, M.; DE OLIVEIRA, R. A. Performance of uasb reactors in two stages followed by post-treatment with activated sludge in wastewater batch of wet-processed coffee. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, p. 808–819, 2013.
- CAMARILLO, R.; RINCÓN, J. Effect of inhibitory compounds on the two-phase anaerobic digestion performance of diluted wastewaters from the alimentary industry. **Chemical Engineering Journal**, v. 193–194, p. 68–76, 2012.
- CHEN, M. et al. Methane production and characteristics of the microbial community in the co-digestion of potato pulp waste and dairy manure amended with biochar. **Renewable Energy**, v. 163, p. 357–367, 2021.
- CHERNICHARO, C. A. DE L. **Anaerobic Reactors**. 2nd ed ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG; 2007., 2007.
- CHERNICHARO, C. A. DE L. **Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico em águas residuárias**. 2. ed ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG; 2007., 2016.

- CHONG, S. et al. The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment – A State-of-the-art review. **Water Research**, v. 46, n. 11, p. 3434–3470, jul. 2012.
- CHRISTOFOLETTI, C. A. et al. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2752–2761, 2013.
- CUNHA, C. S. et al. Greenhouse gases inventory and carbon balance of two dairy systems obtained from two methane-estimation methods. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 744–754, 2016.
- DE OLIVEIRA, B. G. et al. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. **Geoderma**, v. 200–201, p. 77–84, 2013.
- DEL NERY, V. et al. Hydraulic and organic rates applied to pilot scale UASB reactor for sugar cane vinasse degradation and biogas generation. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 411–417, dez. 2018.
- DEMIREL, B.; YENIGÜN, O. Changes in microbial ecology in an anaerobic reactor. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 10, p. 1201–1208, 2006.
- DIAS, T.; FRAGOSO, R.; DUARTE, E. Anaerobic co-digestion of dairy cattle manure and pear waste. **Bioresource Technology**, v. 164, p. 420–423, 2014.
- DILALLO, R.; ALBERTSON, O. E. Volatile Acids by Direct Titration. **Water Pollution Control Federation**, v. 33, n. 4, p. 356–365, 1961.
- DOMINGHETTI, T. F. DE S. et al. Stomoxys calcitrans (Diptera: Muscidae) outbreaks: current situation and future outlook with emphasis on Brazil. **Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária**, v. 24, n. 4, p. 387–395, 2015.
- DORN, T.; FLAMME, S.; NELLES, M. A review of energy recovery from waste in China. **Waste Management & Research**, v. 30, n. 4, p. 432–441, 2012.
- EMBRAPA. **Anuário Leite - Pecuária leiteira de precisão**, 2022.
- ESPAÑA-GAMBOA, E. I. et al. Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. **Biotechnology for Biofuels**, v. 5, n. 1, p. 82, 2012.
- FEITOSA CAVALCANTI, P. F. et al. **Excess sludge discharge frequency for UASB reactors** **Water Science and Technology**, 1999.
- FERNANDO HERRERA ADARME, O. et al. Biogas production by anaerobic co-digestion of sugarcane biorefinery byproducts: Comparative analyses of performance and microbial community in novel single-and two-stage systems. **Bioresource Technology**, v. 354, n. February, 2022.
- FUESS, L. T. et al. Pros and cons of fertirrigation with in natura sugarcane vinasse: Do improvements in soil fertility offset environmental and bioenergy losses? **Journal of Cleaner Production**, v. 319, n. August, 2021.
- FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Implications of stillage land disposal: A critical review on the impacts of fertigation. **Journal of Environmental Management**, v. 145, p. 210–229, 2014.
- GOMES, V. et al. Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of Methanothermobacter and Methanosarcina archaea and Thermotogae bacteria. **Bioresource Technology**, v. 244, n. May, p. 371–381, 2017.
- HARRIS, W. G. et al. Bench-scale recovery of phosphorus from flushed dairy manure wastewater. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 8, p. 3036–3043, 2008.
- JANKE, L. et al. Enhancing biogas production from vinasse in sugarcane biorefineries: Effects of urea and trace elements supplementation on process performance and stability. **Bioresource Technology**, v. 217, p. 10–20, 2016.

- JENKINS, S. R., MORGAN, J. M., SAWYER, L. C. Measuring Anaerobic Sludge Digestion and Growth by a Simple Alkalimetric Titration. **Water Pollution Control Federation**, v. 55, n. 5, p. 448–453, 1983.
- JIANG, H.; LIU, J.; HAN, W. The status and developments of leather solid waste treatment: A mini-review. **Waste Management and Research**, v. 34, n. 5, p. 399–408, 2016.
- JOPPERT, C. L. et al. Energetic shift of sugarcane bagasse using biogas produced from sugarcane vinasse in Brazilian ethanol plants. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 63–73, 2017.
- KHAN, A. A.; MEHROTRA, I.; KAZMI, A. A. Sludge profiling at varied organic loadings and performance evaluation of UASB reactor treating sewage. **Biosystems Engineering**, v. 131, p. 32–40, 2015.
- KIM, D. H. et al. Prediction of bio-methane potential and two-stage anaerobic digestion of starfish. **Bioresource Technology**, v. 141, p. 184–190, 2013.
- KYTHREOTOU, N.; TASSOU, S. A.; FLORIDES, G. An assessment of the biomass potential of Cyprus for energy production. **Energy**, v. 47, n. 1, p. 253–261, 1 nov. 2012.
- LEITÃO, R. C. et al. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 9, p. 1105–1118, 2006.
- LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. **Applied Energy**, v. 240, n. January, p. 120–137, 2019.
- LÓPEZ GONZÁLEZ, L. M.; PEREDA REYES, I.; ROMERO ROMERO, O. Anaerobic co-digestion of sugarcane press mud with vinasse on methane yield. **Waste Management**, v. 68, p. 139–145, 2017.
- MADALENO, L. L. et al. The recycling of biodigested vinasse in an upflow anaerobic sludge blanket reactor is a feasible approach for the conservation of freshwater in the biofuel ethanol industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121196, 2020.
- MANYI-LOH, C. E. et al. Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 10, n. 9, p. 4390–4417, 2013.
- MAO, C. et al. **Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, maio 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115001203>>
- MATA-ALVAREZ, J. et al. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 412–427, 1 ago. 2014.
- MAULE, C. E. É. D. E. et al. Produtividade Agrícola De Cultivares De Cana-De-Açúcar Em Diferentes Solos Productivity of Sugarcane Cultivars in Different. **Scientia**, p. 295–301, 2001.
- MCCARTY, P. L. Anaerobic Waste Treatment Fundamentals - part one - Chemistry and Microbiology. **Public Works**, v. 95, n. 9, p. 107–112, 1964.
- MEEGODA, J. N. et al. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. **International journal of environmental research and public health**, v. 15, n. 10, p. 2224, 11 out. 2018.
- MENG, Q. et al. Anaerobic digestion and recycling of kitchen waste: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, n. 3, p. 1745–1762, 2022.
- MONTOYA, A. C. V. et al. Dairy manure wastewater in serial UASB reactors for energy recovery and potential effluent reuse. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 34, n. 4, p. 971–983, 2017.

- MORAES, B. S. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy**, v. 113, p. 825–835, 1 jan. 2014.
- MORAES, B. S. et al. Reduction in greenhouse gas emissions from vinasse through anaerobic digestion. **Applied Energy**, v. 189, n. 2017, p. 21–30, 2017.
- MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888–903, 2015.
- MOTA, V. T.; SANTOS, F. S.; AMARAL, M. C. S. Two-stage anaerobic membrane bioreactor for the treatment of sugarcane vinasse: Assessment on biological activity and filtration performance. **Bioresource Technology**, v. 146, p. 494–503, 2013.
- MULLENS, B. A. et al. Behavioural responses of dairy cattle to the stable fly, *Stomoxys calcitrans*, in an open field environment. **Medical and Veterinary Entomology**, v. 20, n. 1, p. 122–137, 2006.
- OLIVEIRA, B. G. DE et al. Greenhouse gas emissions from sugarcane vinasse transportation by open channel: A case study in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 102–107, 2015.
- ORTEGÓN, G. P. et al. Vinasse application to sugar cane fields. Effect on the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). **Science of the Total Environment**, v. 539, p. 410–419, 2016.
- PACHECO, T. F. Fermentação alcoólica com leveduras de características floculantes em reator tipo torre com escoamento ascendente. **Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química**, 93 p., p. 106, 2010.
- PARSAEE, M.; KIANI DEH KIANI, M.; KARIMI, K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, n. January, p. 117–125, 2019.
- PINTO, M. P. M. et al. Co-digestion of coffee residues and sugarcane vinasse for biohythane generation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 146–155, 2018.
- POLMAN, E. M. N. et al. **Comparison of the aerobic biodegradation of biopolymers and the corresponding bioplastics: A review** *Science of the Total Environment* Elsevier, , 20 jan. 2021.
- PRADO, R. D. M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S. Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2013, n. Table 1, 2013.
- RAVEENDRAN, S. et al. Applications of Microbial Enzymes in Food Industry. **Food technology and biotechnology**, v. 56, n. 1, p. 16–30, mar. 2018.
- RICHARD E. SPEECE. **Anaerobic biotechnology e odor/corrosion control for municipalities e industries**. [s.l: s.n.].
- RODRÍGUEZ-BATISTA, Z. et al. Populational dynamics of *Stomoxys calcitrans* (Linnaeus) (Diptera: Muscidae) in three biocenosis, Minas Gerais, Brazil. **Veterinary Parasitology**, v. 130, n. 3–4, p. 343–346, 2005.
- SANTANA; OLIVEIRA, R. A. Desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 817–830, 2005.
- SANTANA JUNIOR, A. E. VINHAÇA EM REATORES ANAERÓBIOS HORIZONTAIS DE ALTA TAXA, EM SÉRIE: EFEITO DO AUMENTO GRADUAL DAS CARGAS ORGÂNICAS VOLUMÉTRICAS NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E NAS POPULAÇÕES MICROBIANAS. 2018.

- SANTANA JUNIOR, A. E.; DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A. DE. Improving the energy balance of ethanol industry with methane production from vinasse and molasses in two-stage anaerobic reactors. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 117577, 2019.
- SCHMIDT, T. et al. Trace element supplementation in the biogas production from wheat stillage – Optimization of metal dosing. **Bioresource Technology**, v. 168, p. 80–85, 1 set. 2014.
- SINGH, R. P.; KUMAR, S.; OJHA, C. S. P. Nutrient requirement for UASB process: a review. **Biochemical Engineering Journal**, v. 3, n. 1, p. 35–54, 1 fev. 1999.
- SPEECE, R. E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. **Environmental Science & Technology**, v. 17, n. 9, p. 416A-427A, set. 1983.
- STAZI, V.; TOMEI, M. C. Dissolved methane in anaerobic effluents: A review on sustainable strategies for optimization of energy recovery or internal process reuse. **Journal of Cleaner Production**, v. 317, n. July, p. 128359, 2021.
- TIM MAY, MALCOLM WILLIAMS, RICHARD WIGGINS, AND P. A. B. USO DE RECICLO E AQUECIMENTO NAS CARGAS DIÁRIAS DE BIODIGESTORES ABASTECIDOS COM DEJETOS DE BOVINOS E BATATA DOCE. n. 1996, p. 6, 2021.
- UÇKUN KIRAN, E. et al. Production of biogas via anaerobic digestion. In: **Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition**. [s.l.] Elsevier, 2016. p. 259–301.
- VAN, D. P. et al. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. **Environmental Engineering Research**, v. 25, n. 1, p. 1–17, 2020.
- VILLA-MONTOYA, A. C.; FERRO, M. I. T.; DE OLIVEIRA, R. A. Removal of phenols and methane production with coffee processing wastewater supplemented with phosphorous. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, n. 1, p. 61–74, 2017.
- VOLPI, M. P. C. et al. Operational and biochemical aspects of co-digestion (co-AD) from sugarcane vinasse, filter cake, and deacetylation liquor. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 105, n. 23, p. 8969–8987, 2021.
- VUITIK, G. A. et al. Effects of recirculation in anaerobic baffled reactors. **Journal of Water Process Engineering**, v. 28, n. July 2018, p. 36–44, 2019.
- WANG, S. et al. Influence of Temperature on Biogas Production Efficiency and Microbial Community in a Two-Phase Anaerobic Digestion System. **Water**, v. 11, n. 1, p. 133, 12 jan. 2019.
- XAVIER, T. F. Vinhaça in natura e biodigerida concentrada: efeitos nas características químicas e bioquímicas do solo e no crescimento inicial da cana-de-açúcar. **Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP**, p. 68, 2012.
- XIN, X.; HE, J.; QIU, W. Volatile fatty acid augmentation and microbial community responses in anaerobic co-fermentation process of waste-activated sludge mixed with corn stalk and livestock manure. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 5, p. 4846–4857, 2018.
- ZENG, Y. F.; LIU, Z. L.; QIN, Z. Z. Decolorization of molasses fermentation wastewater by SnO<sub>2</sub>-catalyzed ozonation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 162, n. 2–3, p. 682–687, 15 mar. 2009.
- ZHANG, J.; WANG, S.; WANG, Y. Biobutanol Production From Renewable Resources: Recent Advances. **Advances in Bioenergy**, v. 1, p. 1–68, 1 jan. 2016.

ZHAO, H. W.; VIRARAGHAVAN, T. Analysis of the performance of an anaerobic digestion system at the Regina wastewater treatment plant. **Bioresource Technology**, v. 95, n. 3, p. 301–307, 2004.

ZHONG, J.; STEVENS, D. K.; HANSEN, C. L. Optimization of anaerobic hydrogen and methane production from dairy processing waste using a two-stage digestion in induced bed reactors (IBR). **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 45, p. 15470–15476, 2015.

ZHU, Q. L. et al. Bioenergy from dairy manure: technologies, challenges and opportunities. **Science of the Total Environment**, v. 790, 2021.

ZUO, Z. et al. Effects of organic loading rate and effluent recirculation on the performance of two-stage anaerobic digestion of vegetable waste. **Bioresource Technology**, v. 146, p. 556–561, 2013.