

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia de Energia

# **Produção de Biogás a Partir de um Resíduo da Indústria Sucroalcooleira: Avaliação da Vinhaça como Substrato no Biodigestor**

**Autor: Nádia Gabrielle Silva Sales**  
**Orientador: Prof. Dra. Maria Del Pilar Hidalgo Falla**

Brasília, DF  
06/05/2022





Nádia Gabrielle Silva Sales

**Produção de Biogás a Partir de um Resíduo da Indústria  
Sucroalcooleira: Avaliação da Vinhaça como Substrato no  
Biodigestor**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dra. Maria Del Pilar Hidalgo Falla

Brasília, DF

06/05/2022

---

Nádia Gabrielle Silva Sales

Produção de Biogás a Partir de um Resíduo da Indústria Sucroalcooleira:  
Avaliação da Vinhaça como Substrato no Biodigestor. Brasília, DF, 06/05/2022.  
77 p. : il.; 29,5 cm.

Orientador: Prof. Dra. Maria Del Pilar Hidalgo Falla

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 06/05/2022.

1. Vinhaça 2. Biogás 3. Etanol I. Prof. Dra. Maria Del Pilar Hidalgo Falla. II.  
Título.

CDU Classificação

---

Nádia Gabrielle Silva Sales

# **Produção de Biogás a Partir de um Resíduo da Indústria Sucroalcooleira: Avaliação da Vinhaça como Substrato no Biodigestor**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

---

**Prof. Dra. Maria Del Pilar Hidalgo  
Falla**  
Orientador

---

**Prof. Dra. Maria Hosana Conceição,  
UnB/FCE**  
Membro convidado

---

**Prof. Dr. Marcelo Bento, UnB/FGA**  
Membro convidado

Brasília, DF  
06/05/2022



# Agradecimentos

Aos meus pais, Francineide e Roosewelth, que sempre me incentivaram e apoiaram em todos os momentos e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste e outros trabalhos.

À toda a minha família, irmão, tios e primos, por sempre me apoiarem em todas as minhas decisões.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade, companheirismo e pelo apoio demonstrado nos momentos mais felizes e mais difíceis da graduação.

À professora Pilar, por ter sido minha orientadora e ter desempenhado essa função com muita dedicação e amizade.

Aos professores, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho e da minha caminhada ao longo destes anos, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

Aos meus colegas de curso, que convivi intensamente durante os últimos anos, pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como profissional.





*“Devagar, sua criança louca  
você é tão ambicioso para um jovem.  
Mas, então, se você é tão inteligente  
por que ainda está com tanto medo?  
Devagar, você está indo bem [...]”  
(Billy Joel, Vienna)*



# Resumo

O Brasil é um dos maiores produtores de etanol do mundo. A indústria sucroalcooleira possui uma forte participação na economia brasileira, entretanto, é responsável pela geração de grande quantidade de resíduos. A vinhaça é o resíduo líquido ácido resultante da destilação do etanol, possuindo odor forte e alta carga poluidora. A biodigestão da vinhaça é uma alternativa sustentável de se reduzir sua carga poluidora e gerar novas formas de energia limpa. O objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência do uso da vinhaça como substrato em um biodigestor. Para isso, foi produzido o etanol de primeira geração a partir da cana de açúcar e o resíduo da destilação, vinhaça, foi utilizado como substrato em dois biodigestores previamente construídos. Para produzir 1L de etanol foram gerados 2,3L de vinhaça. O biogás foi produzido em três diferentes bateladas, sendo que duas foram utilizando um biodigestor grande e uma utilizando uma versão reduzida do biodigestor mantida em uma estufa durante todo o período de retenção. Foram produzidos cerca de 2.500 cm<sup>3</sup> de biogás a partir da digestão de 1L de vinhaça. O poder calorífico do biogás produzido na terceira batelada foi de 7.739,75 kJ/m<sup>3</sup> e a concentração de metano presente de 21,76%, o equivalente a 2,15 kWh/m<sup>3</sup> de biogás, podendo ser aplicado na forma de energia térmica, elétrica e como biocombustível. Com o setor sucroenergético em expansão e sendo um dos setores com maior potencial para geração de biogás, olhar para esses, e outros, resíduos se torna questão de responsabilidade quanto à gestão de resíduos, além da possibilidade de ampliação da matriz elétrica e energética brasileira. As tecnologias de conversão desses resíduos em formas mais sustentáveis e limpas de energia devem ser incentivadas.

**Palavras-chaves:** Vinhaça; Biogás; Resíduo; Etanol 1G; Indústria Sucroalcooleira; Setor Sucroenergético.



# Abstract

Brazil is one of the largest ethanol producers in the world. The sugar and ethanol industry has a strong participation in the Brazilian economy, however, it is responsible for the generation of a large amount of waste. Vinasse is the acidic liquid residue resulting from the distillation of ethanol, with a strong odor and high pollutant load. Vinasse biodigestion is a sustainable alternative to reduce its polluting load and generate new forms of clean energy. The aim of this work was to analyze the efficiency of using vinasse as a substrate in a biodigester. For this, first generation ethanol was produced from sugar cane and the distillation residue, vinasse, was used as a substrate in two previously built biodigesters. To produce 1L of ethanol, 2.3L of vinasse were generated. The biogas was produced in three different batches, two using a large digester and one using a reduced version of the digester kept in an oven during the entire retention period. About 2,500 cm<sup>3</sup> of biogas were produced from the digestion of 1L of vinasse. The calorific value of the biogas produced in the third batch was 7,739.75kJ/m<sup>3</sup> and the concentration of methane present was 21.76%, equivalent to 2.15kWh/m<sup>3</sup> of biogas, which can be applied in the form of thermal, electrical energy and as biofuel. With the sugar-energy sector in expansion and being one of the sectors with the greatest potential for biogas generation, looking at these, and others, waste becomes a matter of responsibility regarding waste management, in addition to the possibility of expanding the Brazilian electrical and energy matrix. Technologies for converting these wastes into more sustainable and cleaner forms of energy should be encouraged.

**Key-words:** Vinasse; Biogas; Waste; Ethanol; Sugar alcohol industry; Sugar-energy sector.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Tanque de vinhaça. . . . .	26
Figura 2 – Aspersão da vinhaça na fertirrigação. . . . .	26
Figura 3 – Estágios da decomposição anaeróbica. . . . .	31
Figura 4 – Biodigestor Batelada. . . . .	33
Figura 5 – Biodigestor Indiano. . . . .	34
Figura 6 – Biodigestor Chinês. . . . .	34
Figura 7 – Participação das Biomassas na Capacidade Instalada de Geração Elé- trica – 2019. . . . .	35
Figura 8 – Produção de Biogás por Região Brasileira. . . . .	38
Figura 9 – Biodigestor Canadense. . . . .	39
Figura 10 – Digestão em Dois Estágios. . . . .	40
Figura 11 – Fluxograma dos processos realizados. . . . .	43
Figura 12 – Autores com Artigos mais Citados. . . . .	44
Figura 13 – Destilador montado no laboratório. . . . .	46
Figura 14 – Destilador caseiro. . . . .	47
Figura 15 – Biodigestor. . . . .	48
Figura 16 – Estufa caseira. . . . .	48
Figura 17 – Esquema para verificação do volume de gás. . . . .	49
Figura 18 – Ensaio para determinação do poder calorífico do biogás. . . . .	50
Figura 19 – Amostras da destilação. . . . .	52
Figura 20 – Vinhaça armazenada. . . . .	52
Figura 21 – Espectro da Vinhaça Residual. . . . .	53
Figura 22 – Espectro padrão de Etanol. . . . .	53
Figura 23 – Espectro infravermelho do biogás produzido na primeira batelada. . . .	55
Figura 24 – Espectro infravermelho do biogás produzido na segunda batelada. . . .	56
Figura 25 – Espectro infravermelho do biogás produzido na terceira batelada. . . .	57
Figura 26 – Visualização dos espectros na mesma escala. . . . .	58
Figura 27 – Espectro do bagaço da cana de açúcar. . . . .	72
Figura 28 – Espectro padrão do caldo de cana fermentado. . . . .	73
Figura 29 – Espectro do Etanol 1G produzido. . . . .	73
Figura 30 – Espectro padrão do Metano. . . . .	76
Figura 31 – Espectro padrão do Sulfeto de Hidrogênio. . . . .	76
Figura 32 – Espectro padrão da Amônia. . . . .	77





# Lista de tabelas

Tabela 1 – Vinhaça de diferentes matérias-primas . . . . .	27
Tabela 2 – Parâmetros mensurados nos poços de monitoramento . . . . .	28
Tabela 3 – Composição do gás natural e do biogás . . . . .	32
Tabela 4 – Biogás gerado a partir de diferentes substratos . . . . .	37
Tabela 5 – Condições ideais para uso da vinhaça como substrato . . . . .	41
Tabela 6 – Biogás gerado pelos resíduos agroindustriais . . . . .	41
Tabela 7 – Teor de açúcar no caldo de cana . . . . .	51
Tabela 8 – Mosto antes e depois da fermentação . . . . .	51
Tabela 9 – Destilação do caldo de cana fermentado . . . . .	51
Tabela 10 – pH da Vinhaça . . . . .	53
Tabela 11 – Volumes de substrato e biogás produzido em cada batelada . . . . .	54
Tabela 12 – Parâmetros mensurados para determinação do poder calorífico do biogás	58



# Lista de abreviaturas e siglas

CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ks	Concentração de Potássio no Solo
kvi	Concentração de Potássio na Vinhaça
FTIR	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
MS	Matéria Sólida
MSO	Matéria Sólida Orgânica
ppm	Partes Por Milhão
pH	Potencial Hidrogeniônico
ST	Sólidos Totais
T	Temperatura
TEMAC	Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado



# Lista de símbolos

$B_{0,th}$	Eficiência do Metano Gerado
$BD_v$	Biodegradabilidade da Vinhaça
C	Carbono
$C_2H_6$	Etano
$C_3H_8$	Propano
$C_4H_{10}$	Butano
Ca	Cálcio
$CH_4$	Metano
Cl	Cloro
cm	Centímetro
CO	Monóxido de Carbono
$CO_2$	Dióxido de Carbono
$\Delta T$	Variação de Temperatura
$ER_y$	Redução de Emissão de Gás Carbônico
Fe	Ferro
GWh	GigaWatt hora
g	grama
$H_2S$	Sulfeto de Hidrogênio
K	Potássio
kg	Quilograma
kJ	Quilo Joule
KWh	Quilowatt hora
L	Litro

$m^3$	Metro Cúbico
Mg	Magnésio
mg	Miligrama
ml	Mililitro
$\mu S$	Micro Siemens
MJ	Mega Joule
MW	Mega Watt
$MY_e$	Eficiência de Produção do Metano
$MY_t$	Rendimento Teórico da Produção de Metano
N	Nitrogênio
$N_2$	Gás Nitrogênio
Na	Sódio
$NaHCO_3$	Bicarbonato de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
$NG_{ef}$	Coefficiente de Emissão de Gás Carbônico
$NH_3$	Amoníaco
Ni	Níquel
$Nm^3/t$	Normal Metro Cúbico por Tonelada
$Nm^3/d$	Normal Metro Cúbico por Dia
N- $NH_3$	Nitrogênio Amonical
$O_2$	Oxigênio
P	Fósforo
Q	Quantidade de Calor
$SO_4$	Sulfato
$tCO_2$	Tonelada de Dióxido de Carbono
TJ	Tera Joule

# Sumário

	<b>Introdução</b> . . . . .	<b>23</b>
<b>I</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>25</b>
<b>1</b>	<b>VINHAÇA</b> . . . . .	<b>26</b>
<b>1.1</b>	<b>Caracterização</b> . . . . .	<b>27</b>
<b>1.2</b>	<b>Legislação aplicável</b> . . . . .	<b>28</b>
<b>1.3</b>	<b>Tratamentos</b> . . . . .	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>BIOGÁS</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>2.1</b>	<b>Tecnologia</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>2.2</b>	<b>Aplicações</b> . . . . .	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>SUBSTRATOS DO BIOGÁS</b> . . . . .	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>BIOGÁS DA VINHAÇA</b> . . . . .	<b>39</b>
<b>II</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Metodologia de Pesquisa</b> . . . . .	<b>43</b>
<b>5.2</b>	<b>Produção de Etanol 1G e Recuperação da Vinhaça</b> . . . . .	<b>45</b>
<b>5.2.1</b>	Preparação do Mosto . . . . .	45
<b>5.2.2</b>	Fermentação . . . . .	45
<b>5.2.3</b>	Destilação . . . . .	46
<b>5.2.4</b>	Vinhaça . . . . .	47
<b>5.3</b>	<b>Produção de Biogás</b> . . . . .	<b>47</b>
<b>5.3.1</b>	Biodigestor . . . . .	47
<b>5.3.2</b>	Biogás . . . . .	47
<b>5.4</b>	<b>Aquisição de Espectros</b> . . . . .	<b>50</b>
<b>5.4.1</b>	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier . . . . .	50
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .	<b>51</b>
<b>6.1</b>	<b>Resultados da Produção do Etanol 1G</b> . . . . .	<b>51</b>
<b>6.2</b>	<b>Resultados obtidos da Vinhaça</b> . . . . .	<b>52</b>
<b>6.3</b>	<b>Biodigestão da Vinhaça</b> . . . . .	<b>54</b>

6.3.1	Caracterização do Biogás por Espectroscopia no Infravermelho . . . . .	54
6.3.2	Poder Calorífico do Biogás . . . . .	58
<b>6.4</b>	<b>Outras discussões . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>8</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE A – ESPECTROS DA PRODUÇÃO DE ETANOL 1G .</b>	<b>72</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO A – ESPECTROS IR PADRÃO . . . . .</b>	<b>76</b>



# Introdução

O setor sucroalcooleiro tem sido grande responsável por movimentar a economia brasileira, sendo um dos maiores ramos do agronegócio do país. A maior parte das indústrias desse setor, no Brasil, utiliza a cana-de-açúcar como matéria-prima, mas os principais produtos gerados (etanol e açúcar) podem ser obtidos por outras matérias primas como a beterraba ou o milho. O processo de fabricação de açúcar e etanol pode gerar muitos resíduos, fazendo com que o estudo de novas tecnologias e maneiras de descarte sejam desenvolvidas com o objetivo de minimizar os possíveis aspectos ambientais gerados por esse setor.

Um dos principais resíduos da indústria sucroalcooleira é a vinhaça. Ela é gerada no processo de destilação do etanol e para cada litro de etanol destilado podem ser gerados até 20 litros de vinhaça (WILKIE; RIEDESEL; OWENS, 2000). Em 2020, devido à redução do consumo de combustíveis por conta da pandemia de Covid-19, a produção de etanol no Brasil foi de 32,6 bilhões de litros (EPE, 2021). No ano anterior, 2019, o Brasil produziu 35,6 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2020), ou seja, isso pode ter gerado até 712 bilhões de litros de vinhaça. A vinhaça é considerada um resíduo tóxico e deve ter o tratamento adequado antes de ser liberada no meio ambiente, uma vez que aumentos substanciais na produção do etanol exigem soluções eficazes para a gestão desse resíduo (HOARAU et al., 2018; WILKIE; RIEDESEL; OWENS, 2000). Apesar de ser uma questão de regulação rigorosa, os tratamentos físico-químicos para a remoção de metais pesados da vinhaça têm sido pouco discutidos (HOARAU et al., 2018).

A vinhaça tem sido considerada um subproduto de grande valor para diversas aplicações na área agrícola, como fertilizante, no controle de erosão do solo e no controle de pragas, de produção de biomassa, produção de moléculas de valor agregado, como enzimas e ácidos orgânicos, e como aproveitamento energético (HOARAU et al., 2018). A utilização da vinhaça como matéria orgânica para a produção de biogás vem sendo cada vez mais explorada. O uso da vinhaça na fertirrigação mostrou que o teor de insumos de potássio nos solos era maior do que a maioria das culturas necessita, o que poderia aumentar o risco de salinização do solo. Em contrapartida, a biodigestão se mostrou um método eficaz para reduzir a carga poluidora da vinhaça e eliminar os efeitos negativos das emissões de sulfeto no meio ambiente (FUESS; GARCIA; ZAIAT, 2018).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência do uso da vinhaça, resíduo da indústria sucroalcooleira, como substrato em um biodigestor. Para tanto será produzido o etanol de primeira geração e a vinhaça produzida após o processo de destilação será utilizada como substrato no biodigestor. Previamente, foi realizado

um levantamento bibliográfico onde foi estudado a composição e o processo de formação da vinhaça, do biogás e o perfil do biogás produzido a partir das matérias-primas mais utilizadas atualmente.

Parte I

Referencial Teórico

# 1 Vinhaça

A vinhaça é um subproduto gerado na destilação do etanol. Ela possui uma carga altamente poluidora que se caracteriza pela sua alta demanda química de oxigênio e seu alto teor de sais (HOARAU et al., 2018). Suas características são altamente variáveis e dependentes da matéria-prima e dos processos empregados na produção do etanol (PARSAEE; KIANI; KARIMI, 2019).



Figura 1 – Tanque de vinhaça.

Fonte: (ROSSETTO; SANTIAGO, 2020).

Atualmente a vinhaça possui diversas aplicações. Na agricultura, é bastante utilizada na fertirrigação, como condicionador de solo e como aditivo no controle de pragas, uma vez que sua composição oferece ao solo elementos fertilizantes para a planta e matéria orgânica que afetam a população microbiana e, portanto, as propriedades físicas do solo (HOARAU et al., 2018).



Figura 2 – Aspersão da vinhaça na fertirrigação.

Fonte: (ROSSETTO; SANTIAGO, 2020).

A partir da vinhaça também é possível produzir moléculas de valor agregado, como álcoois, ácidos orgânicos, polímeros e proteínas (HOARAU et al., 2018). O valor energético

da vinhaça também tem sido bastante estudado. Além do biogás produzido a partir de sua fermentação anaeróbica, a produção de hidrogênio vem sendo investigada (LAZARO; VARESCHE; SILVA, 2015). A produção de óleo microbiano para posterior produção de biodiesel também tem sido uma forma de agregar valor energético à vinhaça (MITRA et al., 2012).

As matérias-primas mais tradicionais da indústria sucroalcooleira são à base de açúcar, como a beterraba, uvas e cana-de-açúcar, ou à base de amido, como o milho, trigo, arroz, cevada, batata e mandioca. Também existem as matérias celulósicas como biomassas herbáceas ou amadeiradas, o próprio bagaço resultante da produção do etanol de primeira geração e resíduos sólidos de origem orgânica (WILKIE; RIEDESEL; OWENS, 2000).

As matérias-primas à base de açúcar são facilmente fermentas, já as de amido precisam passar por um pré-tratamento antes de sua fermentação. A biomassa lignocelulósica também requer um pré-tratamento para converter a celulose em açúcares fermentáveis, onde é triturada e deve sofrer uma hidrólise ácida, alcalina ou enzimática (WILKIE; RIEDESEL; OWENS, 2000).

## 1.1 Caracterização

Diferentes matérias-primas e diferentes processos na planta de produção do etanol impactam diretamente a composição da vinhaça. A tabela 1 mostra a caracterização da vinhaça de diferentes matérias-primas, onde a segunda coluna evidencia a quantidade, em litros, de vinhaça produzida para a produção de cada litro de etanol.

Tabela 1 – Vinhaça de diferentes matérias-primas

Matéria-Prima	$L_v/L_e$	DQO <sup>a</sup>	DBO <sup>a</sup>	N <sup>b</sup>	P <sup>b</sup>	K <sup>b</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>b</sup>	pH
Agave-azul	10	66,3	-	-	-	290	880	3,4
Pêra maçã	-	48,9	22	380	62	-	-	3,4
Aguardente de Cevada	1,5	97	83	6000	-	-	-	3,7-4,1
Aguardente de Arroz	1,5	-	84	-	389	-	-	4,26
Mandioca	16	81,1	31,4	650	124	-	-	3,5
Milho	-	64,5	26,9	755	1170	-	-	3,3-4,0
Uva (conhaque)	-	26	-	-	-	800	-	3,0-3,2
Uva (vinho)	-	27,5	16,3	650	-	-	120	4,2
Sorgo sacarino	16	79,9	46	800	1990	-	-	4,5
Pinus radiata	16,7	25,5	13,2	95,3	10,3	38,5	600	4,5-5,0
Eucalipto	-	22,5	-	200	40	-	260-360	5,8-6,3
Melaço de Beterraba	11,6	91,1	44,9	3569	163	10030	3716	5,35
Melaço de Cana	14,0	84,9	39	1229	187	5124	3478	4,46
Caldo da Cana	16,3	30,4	16,7	628	130	1952	1356	4,04

<sup>a</sup>g/L.<sup>b</sup>mg/L. Fonte: Adaptado de (WILKIE; RIEDESEL; OWENS, 2000).

## 1.2 Legislação aplicável

A norma NBR 10004 classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais tanto ao meio ambiente quanto à saúde pública. São incluídos na definição de resíduos sólidos, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e determinados líquidos que são inviáveis de serem lançados na rede pública de esgotos ou corpos de água (ABNT, 2004).

Os resíduos são classificados como classe 1, 2 ou 3. A vinhaça se encaixa como resíduo sólido classe 2, os resíduos não inertes, já que pode ser biodegradada e solubilizada em água (ABNT, 2004). A norma técnica P4231 estabelece os critérios e procedimentos para armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça (CETESB, 2015).

Segundo essa norma, a vinhaça não deve ser aplicada em áreas de preservação permanente e também não deve ser aplicada a menos de 100 metros de poços de abastecimento. A tabela 2 mostra os parâmetros que devem ser monitorados na água coletada de poços de monitoramento, que devem ser instalados nas áreas dos tanques de armazenamento da vinhaça (CETESB, 2015).

Tabela 2 – Parâmetros mensurados nos poços de monitoramento

Parâmetro	Unidade
pH	-
Sulfato	mg de SO <sub>4</sub> /L
Nitrato	mg de N/L
Nitrito	mg de N/L
Nitrogênio amoniacal	mg de N/L
Potássio	mg de K/L
Cálcio	mg de Ca/L
Cloreto	mg de Cl/L
Sódio	mg de Na/L
Magnésio	mg de Mg/L
Fósforo	mg de P/L
Condutividade elétrica	μS/cm

Fonte: Adaptado de (CETESB, 2015).

Antes de aplicar a vinhaça no solo, diversos parâmetros devem ser avaliados como a qualidade ambiental do solo e sua fertilidade química. A dosagem de vinhaça a ser aplicada deve ser determinada pela equação 1.1. Onde CTC é a capacidade de troca catiônica, dada pela análise de fertilidade do solo, ks é a concentração de potássio no solo, à profundidade de 0 a 0,80 metros, e kvi é a concentração de potássio na vinhaça, resultante da média anual obtida nas análises semanais ou da média obtida nas análises semestrais (CETESB, 2015).

$$\frac{m_{vinhaca}^3}{ha} = \frac{[(0,05 \cdot CTC - ks) \cdot 3744 + 185]}{kvi} \quad (1.1)$$

## 1.3 Tratamentos

Processos físico-químicos são utilizados para o tratamento da vinhaça com o objetivo de reduzir o volume de efluente gerado. A redução do volume da vinhaça por meio de secagem não é vantajosa devido à alta energia exigida no processo de evaporação da água (HOARAU et al., 2018). Já a recirculação de uma porcentagem desse efluente, cerca de 60%, na planta de etanol é uma alternativa viável, sem que haja inibição da fermentação da levedura, e ainda diminui o consumo de água da planta produtora na fase de fermentação (NAVARRO; del C. Sepúlveda; RUBIO, 2000).

As águas residuais podem ser, ainda, filtradas por meio de tecnologias como micro, nanofiltros (ARORA et al., 2011; RAI; MUTHUKRISHNAN; GUHA, 2008) e processos de adsorção em material poroso, que é um dos mais simples utilizados para purificação de águas (HOARAU et al., 2018). O carvão ativado é bastante utilizado no processo de adsorção, principalmente para remoção da cor escura do efluente e de componentes como os fenóis (SATYAWALI; BALAKRISHNAN, 2007).

Os tratamentos biológicos são bastante eficazes e agregam valor à vinhaça, como é o caso da produção do biogás. Existem também outros tratamentos biológicos, como a digestão aeróbica, que podem além de reduzir sua carga poluidora, reduzir a coloração marrom escura desse efluente, já que a coloração não é biodegradada pela digestão que ocorre na ausência de oxigênio, e remover os metais pesados, apesar de que os metais pesados podem também ser removidos por tratamentos físico-químicos (HOARAU et al., 2018).

## 2 Biogás

O termo biogás se refere ao metano ou gás similar produzido a partir da fermentação de uma biomassa em condições anaeróbicas, ou seja, na ausência de oxigênio (ADELEKAN, 2012; OECD, 2010). Esse processo é bastante comum na natureza, ocorrendo em pântanos e no rúmen de animais ruminantes, por exemplo (ROHSTOFFE, 2010).

A conversão da biomassa em biogás pode se dar por meio de processos térmicos (gaseificação) ou biológicos (digestão anaeróbica). Os processos térmicos possuem a vantagem de converter a taxas rápidas e totalmente a matéria orgânica, mas produzem uma mistura de produtos gasosos, chamado gás de síntese, que deve ser tratado para que se possa aproveitar o metano. Os processos biológicos produzem basicamente metano e dióxido de carbono com alguns traços de sulfeto de hidrogênio (ADELEKAN, 2012; CHYNOWETH; ISAACSON, 1987).

O processo de formação do biogás pela digestão anaeróbica se dá por meio de quatro etapas principais: a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A figura 3 mostra um esquema dos estágios da decomposição anaeróbica.

A hidrólise é a etapa em que os compostos orgânicos mais complexos, como os carboidratos, as proteínas e os lipídios, irão ser decompostos em substâncias mais simples, como os aminoácidos, ácidos graxos e açúcares (ROHSTOFFE, 2010). Essa etapa é um pré-tratamento com o objetivo de aumentar a biodegradabilidade da matéria-prima e dessa forma, abre a oportunidade de utilização de diversas matérias-primas, incluindo as com alto teor de celulose (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018).

A acidogênese é responsável por transformar os aminoácidos, ácidos graxos e açúcares em ácidos graxos de cadeia curta, como ácidos acético, propiônico e butírico, dióxido de carbono, hidrogênio e pequenas quantidades de ácido lático e álcoois (ROHSTOFFE, 2010), ou seja, substratos metanogênicos (Al Seadi, 2008).

Na acetogênese, os produtos que não foram convertidos diretamente em substratos metanogênicos são, agora, convertidos (Al Seadi, 2008). Assim, ocorre o processo de formação do ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, os precursores do biogás (ROHSTOFFE, 2010).

Por fim, na metanogênese ocorre a formação de gás metano a partir da conversão do ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono (ROHSTOFFE, 2010). Durante a acetogênese, há um aumento da pressão parcial do hidrogênio formado que pode inibir o metabolismo das bactérias acetogênicas, porém durante a metanogênese esse hidrogênio é convertido em metano, fazendo com que haja uma simbiose entre os organismos dessas



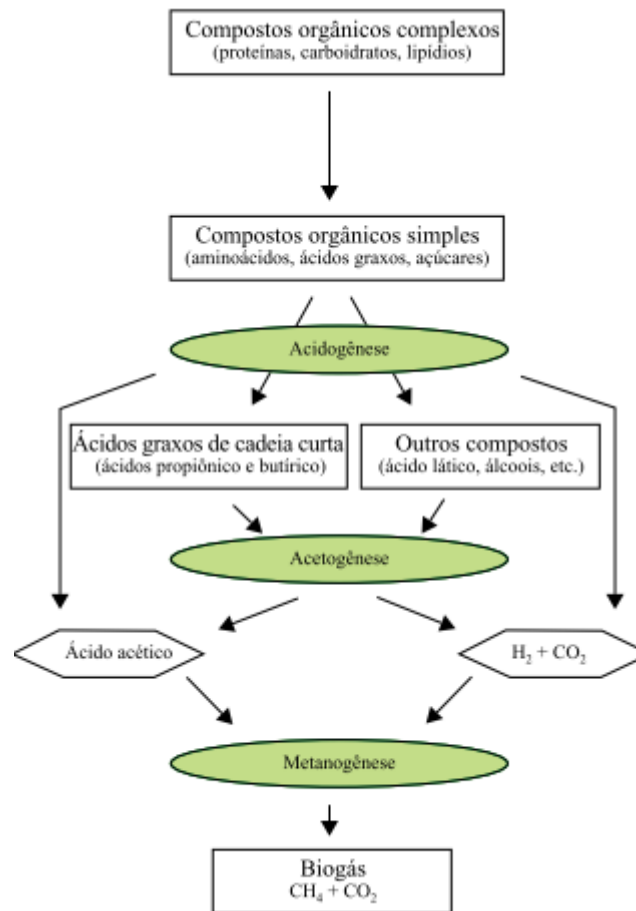


Figura 3 – Estágios da decomposição anaeróbica.

Fonte:([ROHSTOFFE, 2010](#)).

duas etapas. Do metano formado, 70% do é originário do acetato e os outros 30% são produzidos a partir da conversão de hidrogênio e dióxido de carbono ([Al Seadi, 2008](#)).

As quatro fases da decomposição anaeróbia ocorrem de forma paralela. Como as bactérias têm exigências diferentes quanto ao seu ambiente ideal, relacionado ao pH e a temperatura, deve ser definido um meio termo em relação à tecnologia do processo a ser utilizado para a produção de biogás. Os microrganismos metanogênicos são o elo mais fraco da biota e os mais sensíveis a distúrbios, devido a sua baixa taxa de crescimento, e por isso as condições do meio precisam ser adaptadas às suas necessidades ([ROHSTOFFE, 2010](#)).

A composição da matéria orgânica vai influenciar a qualidade e rendimento do metano produzido. Quanto mais biodegradável for a matéria-prima utilizada para produzir o biogás, maior a porcentagem de metano gerado ([ADELEKAN, 2012](#)). O ambiente anaeróbico, como substrato, temperatura e pH, irá criar um ambiente adequado para diferentes tipos de bactérias envolvidas na metanogênese, fazendo com que cada ambiente possa ter uma população e atividades microbianas únicas ([ADELEKAN, 2012](#); [CHYNOWETH](#);

ISAACSON, 1987). Apesar disso, a composição do biogás em geral mantém as mesmas faixas de proporções. A tabela 3 mostra a composição do biogás comparada a do gás natural.

Tabela 3 – Composição do gás natural e do biogás

Composto	Gás Natural (%)	Biogás (%)
CH <sub>4</sub>	85	50-80
CO <sub>2</sub>	0,89	20-45
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,85	-
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,37	-
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,14	-
N <sub>2</sub>	14,32	-
O <sub>2</sub>	<0,5	-
H <sub>2</sub> S	<0,5	0-1,5
NH <sub>3</sub>	-	0-0,45

Fonte: Adaptado de (ADELEKAN, 2012).

## 2.1 Tecnologia

A planta produtora de biogás irá depender em grande parte do tipo de matéria-prima e de suas quantidades (NOGUEIRA et al., 2015). O fato de existirem diversos tipos de matéria-prima implica em diferentes técnicas de tratamento e diferentes construções e modos de operação dos biodigestores (Al Seadi, 2008).

O biodigestor é uma espécie de tanque de reator à prova de ar onde ocorre a decomposição da matéria-prima e a formação do biogás, sendo considerado um dos equipamentos mais importantes em uma planta de produção de biogás. Existem vários tipos de biodigestor no mundo, sendo que eles podem variar quanto ao seu material de fabricação, formato, local de instalação (subsolo ou superfície) e tamanho, que pode variar de poucos metros cúbicos, no caso de instalações residenciais, até milhares de metros cúbicos, para instalações industriais (Al Seadi, 2008).

A digestão anaeróbica atua de duas formas: digestão seca e úmida. A digestão seca ocorre quando o conteúdo de matéria seca do substrato está acima de 15%, geralmente entre 20-40%, são exemplos de matéria-prima seca os resíduos sólidos urbanos, culturas energéticas, grama e outros. A digestão úmida ocorre quando o teor de matéria seca do substrato é menor que 15%, como o lodo de esgoto e estrume (Al Seadi, 2008).

Do ponto de vista do fluxo de entrada e saída do biodigestor, existem dois tipos básicos: por batelada e de fluxo contínuo (KARLSSON et al., 2014). No tipo batelada, o biodigestor é alimentado com uma porção de matéria-prima e que é digerida e origina o biogás, e após esse período de retenção, todo o carregamento é completamente removido. Esse tipo de biodigestor se adapta melhor quando a disponibilidade de biomassa ocorre em

períodos longos, possui baixos custos de operação e é considerado um dos mais simples de se construir. A desvantagem desse processo é seu alto consumo energético e seus custos de manutenção (DEGANUTTI et al., 2002; Al Seadi, 2008). A figura 4 mostra um biodigestor do tipo batelada.

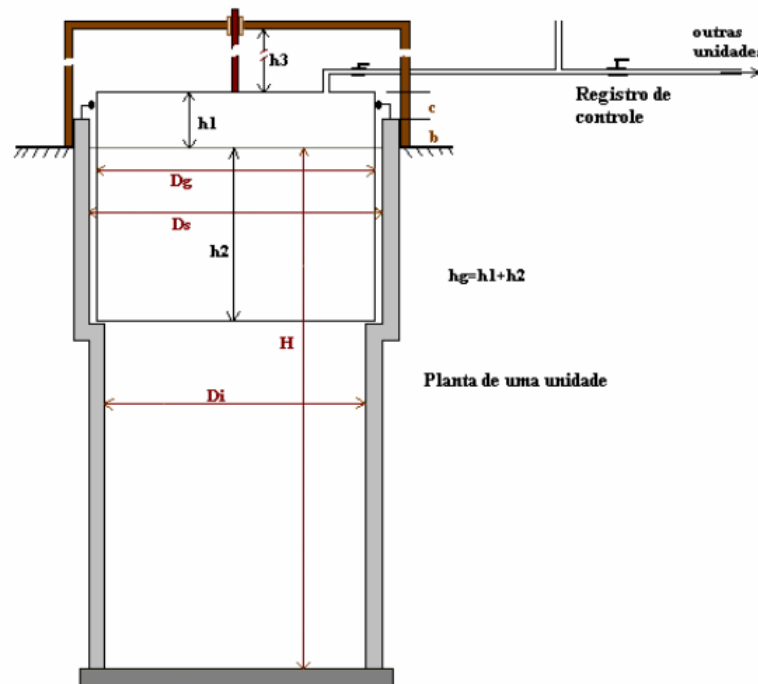


Figura 4 – Biodigestor Batelada.

Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002).

No biodigestor de fluxo contínuo, a matéria-prima é alimentada constantemente de forma que o biogás é produzido sem interrupção para carga de matéria-prima e descarga do material digerido. Esse tipo de biodigestor pode ser classificado como sistema vertical, horizontal ou múltiplo (Al Seadi, 2008). Os mais comuns biodigestores de fluxo contínuo são o modelo indiano e chinês. O resíduo a ser utilizado para alimentar o biodigestor indiano, não deve possuir concentração de sólidos totais (ST) superior a 8%, para evitar entupimentos nas tubulações. Apesar de possuir uma construção considerada fácil, seu gasômetro de metal aumenta seus custos (DEGANUTTI et al., 2002). A figura 5 mostra um biodigestor do tipo indiano.

No modelo chinês, o biodigestor possui um teto abobado e impermeável que irá armazenar o biogás. O substrato deve obedecer a mesma premissa do modelo indiano, de não ultrapassar 8%, em relação aos sólidos totais. O aumento de pressão em seu interior devido à produção de biogás resulta no deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída (DEGANUTTI et al., 2002). A figura 6 mostra um biodigestor do tipo chinês.

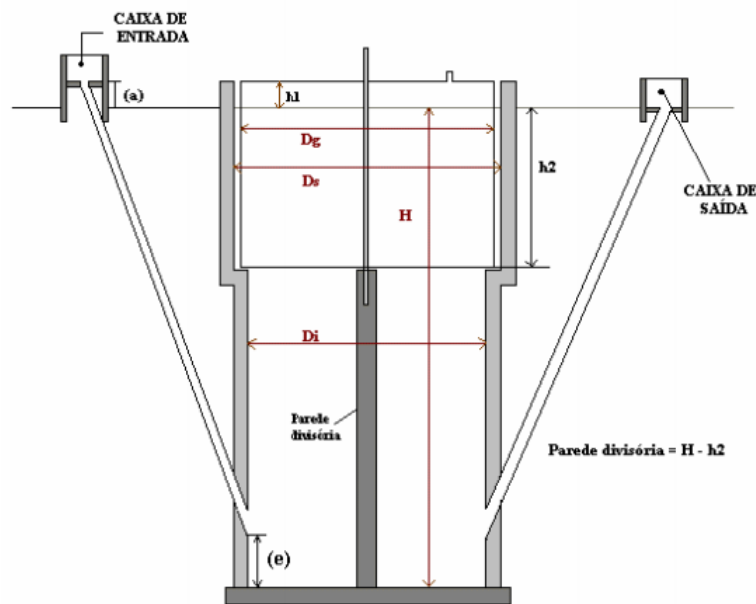


Figura 5 – Biodigestor Indiano.

Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002).

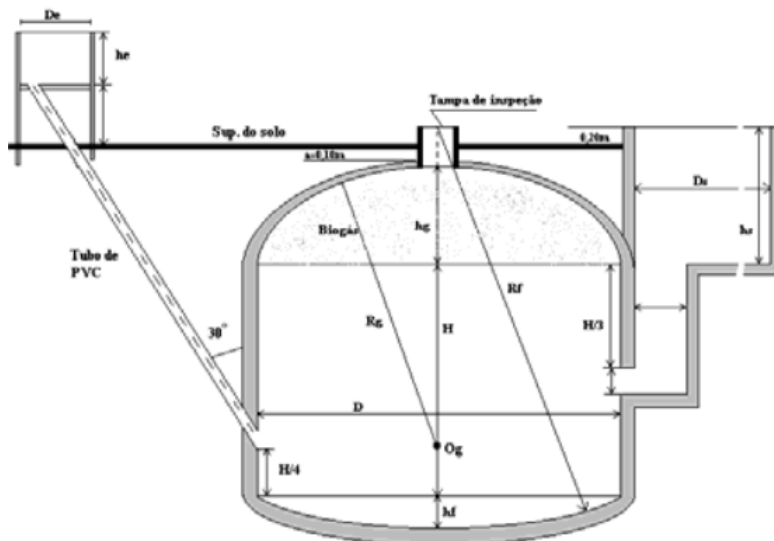


Figura 6 – Biodigestor Chinês.

Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002).

## 2.2 Aplicações

O biogás produzido pode ter diversas aplicações, como a cogeração de energia ou produção de calor (KARLSSON et al., 2014). A produção de bioenergia tem o potencial para contribuir de forma significativa para o desenvolvimento de uma economia verde e de baixo carbono. O biogás pode contribuir, ainda, para o desenvolvimento das áreas rurais e incentivos de criação de novas cadeias de suprimentos de substratos, principalmente se baseando no uso de resíduos (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018).

A participação das biomassas na geração de eletricidade está cada vez mais presente no cenário brasileiro. De acordo com a análise de biocombustíveis de 2019, a geração de energia elétrica proveniente das biomassas, com exceção da cana de açúcar, representou 0,8% da matriz elétrica. Dentre essas, se destacaram o licor negro, o biogás e os resíduos florestais (EPE, 2020a). A capacidade instalada de geração elétrica, em 2019, alcançou cerca de 170 mil MW, desses, a capacidade instalada proveniente de biomassas chegou aos 14.978 MW (EPE, 2020b). A figura 7 mostra a capacidade instalada alcançada em 2019 proveniente de diferentes biomassas.

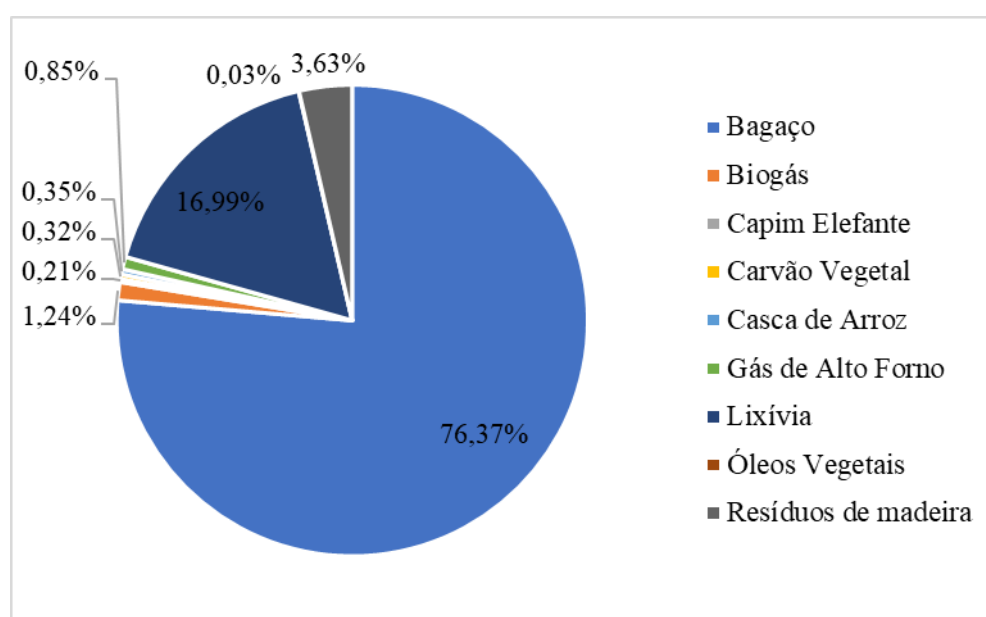


Figura 7 – Participação das Biomassas na Capacidade Instalada de Geração Elétrica – 2019.

Fonte: Autoria própria adaptando dados do Balanço Energético Nacional de 2020 (EPE, 2020b).

A produção de biogás tem sido cada dia mais significativa no cenário energético brasileiro. A capacidade instalada em geração distribuída, de 2019 para 2020, alcançou 42 MW, utilizando como insumos resíduos agroindustriais, animais e urbanos, porém grande parte do potencial deste biocombustível se encontra no setor sucroenergético (EPE, 2021 apud ANEEL, 2020). De acordo com a ANP, a região Centro-Oeste foi responsável pela produção de 11.551.770 m<sup>3</sup> de etanol, anidro e hidratado, durante o ano de 2021, sendo 90% proveniente da cana de açúcar (ANP, 2022). O efluente desse setor poderia servir de substrato para a produção de biogás e posteriormente ser convertido em energia elétrica para a população dessa região.

O biogás também pode ser utilizado como combustível (SOUZA; SANTOS; FRACARO, 2011) e ainda pode ser injetado nas redes de gás natural, como biometano (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015). Nas últimas décadas, a reforma do biogás tem sido amplamente estudada, visando a geração de produtos de maior valor agregado, como o

gás de síntese que pode ser posteriormente transformado em metanol, hidrogênio e outros (SCHULTZ; SOARES, 2014).

Apesar do potencial em várias aplicações, o biogás acaba tendo limitações devido aos seus contaminantes, principalmente devido ao sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ). O  $H_2S$  é um gás tóxico e altamente inflamável. Por conter enxofre, ele possui um odor bem característico. Ao entrar em contato com os seres humanos, pode causar irritação nos olhos, perda de olfato e distúrbios respiratórios, além de atuar no sistema nervoso central, podendo levar à morte, em concentrações superiores a 700 ppm, em até 2 minutos (MAINIER; VIOLA, 2005).

Para remoção do  $H_2S$  presente no biogás o óxido de ferro e o carvão ativado são adsorventes bem conceituados na literatura (BECKER et al., 2013; CARVALHO, 2017). A associação de nanopartículas de óxido de ferro e carvão ativado podem aumentar a adsorção de  $H_2S$  (CARVALHO, 2017). O uso de cavacos de madeira junto à solução nutriente com o microrganismo *Acidithiobacillus thiooxidans* também se mostrou um biofiltro adequado para remoção do  $H_2S$  presente no biogás (AITA et al., 2016).

### 3 Substratos do Biogás

O biogás pode ser produzido a partir de diversos substratos. Como mencionado anteriormente, a composição da matéria orgânica irá influenciar a qualidade e o rendimento do metano gerado. A tabela 4 mostra as propriedades de alguns substratos e biogás produzido.

Tabela 4 – Biogás gerado a partir de diferentes substratos

Substrato	%MS	MOS <sup>a</sup>	Biogás <sup>b</sup>	CH <sub>4</sub> <sup>b</sup>
Esterco líquido bovino	10	80	25	14
Esterco líquido suíno	6	80	28	17
Esterco bovino	25	80	80	44
Esterco de aves	40	75	140	90
Esterco de cavalo	28	75	63	35
Silagem de milho	33	95	200	106
Silagem de gramíneas	35	90	180	98
Silagem de girassol	25	90	120	68
Gãos de cereais	87	97	620	329
Beterraba sacarina	23	90	130	72
Resíduos verdes <sup>c</sup>	12	87,5	175	105

<sup>a</sup>%de MS. <sup>b</sup>Em Nm<sup>3</sup>/t de Substrato. <sup>c</sup>Inclui grama e resíduos de poda. Fonte: Adaptado de (ROHSTOFFE, 2010).

O dejetos dos animais ruminantes, como é o caso dos bovinos, geralmente apresenta alta concentração de palha e, em comparação com outros animais, possui um potencial de produção inferior de biogás, entretanto, há maior produção de dejetos por parte desses animais (ORRICO; ORRICO; LUCAS, 2011). Os adubos orgânicos, como são chamados os dejetos, quando diluídos em água, para limpeza do local onde os animais ficam, por exemplo, podem sofrer alterações em suas propriedades, e isso irá transparecer no biogás gerado (ROHSTOFFE, 2010).

Diversas biomassas podem ser substrato no biodigestor. A palha do milho, a palha do arroz e o talo do aspargo são exemplos de que qualquer parte de uma cultura pode ter seu potencial energético aproveitado (YU et al., 2019). É comum que para muitas biomassas, como o milho, seja feito o processo de silagem como pré-tratamento antes de inseri-la no biodigestor (TISSMA et al., 2018).

As condições do meio, para criar um ambiente adequado para as bactérias, devem ser monitoradas e avaliadas. Os nutrientes disponíveis no meio são essenciais para determinar se o processo será estável ou não. O carbono e o nitrogênio são importantes para formar as enzimas metabólicas, por isso é necessário que a relação entre carbono e nitrogênio (C/N) seja entre 10 a 30. Também são de grande importância o fósforo e

enxofre, além dos micronutrientes como Cobalto (Co), Níquel (Ni), Magnésio (Mg), Ferro (Fe) e outros (ROHSTOFFE, 2010).

Da mesma forma que existem muitas substâncias que auxiliam a ação das bactérias, existem substâncias que as inibem. Essas substâncias podem ser o oxigênio, dependendo da sua quantidade, o sulfeto de hidrogênio e ácidos graxos voláteis, já que podem deixar o pH mais ácido que o ideal, o nitrogênio amoniacal, que eleva o pH acima do ideal, e alguns metais pesados dissolvidos (ROHSTOFFE, 2010; THEUERL; KLANG; PROCHNOW, 2019).

No Brasil, a produção de biogás em 2019 foi de 3806 mil Nm<sup>3</sup>/d. Dessa quantidade, 12% foi gerado a partir de substratos da agropecuária, 11% de substratos industriais e 77% de substratos de aterro sanitário e esgoto. A figura 8 mostra a produção de biogás em 2019 por região brasileira (COELHO, 2020)

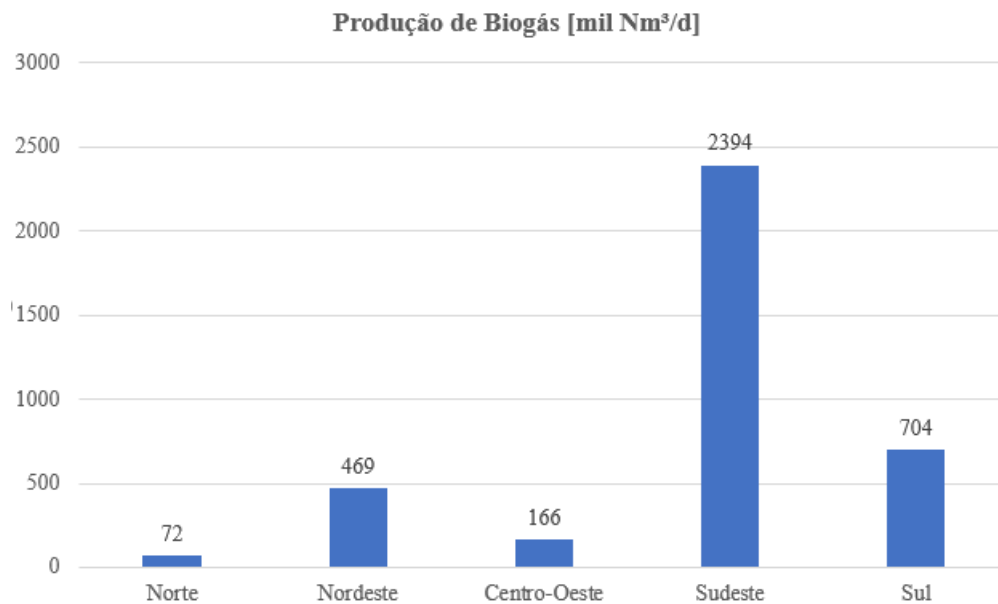


Figura 8 – Produção de Biogás por Região Brasileira.

Fonte: Autoria própria adaptando dados de (COELHO, 2020).



## 4 Biogás da Vinhaça

A digestão anaeróbica como forma de tratamento de resíduos orgânicos tem como produto o biogás, que poderia ter maior participação na matriz energética brasileira por conta da grande geração de resíduos consequente da alta população e atividade agrícola do país (SANTOS et al., 2018). No Brasil, o reator mais utilizado é o de fluxo tubular, conhecido como biodigestor da marinha ou canadense, por ser mais barato e de mais fácil instalação (NOGUEIRA et al., 2015). A figura 9 mostra o modelo esquemático desse biodigestor.

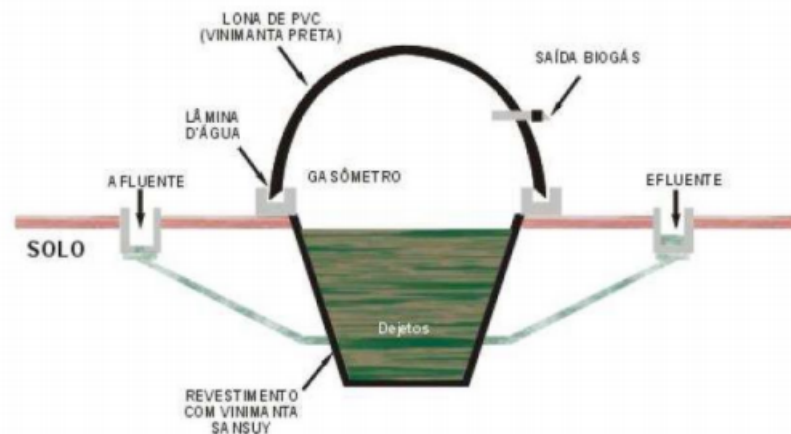


Figura 9 – Biodigestor Canadense.

Fonte: (BRITO; SALES; CEZANA, 2019).

Para ser utilizado como substrato no reator pode ser necessário que algum tratamento seja realizado para corrigir seu pH, que varia, geralmente, entre 3,7 e 5 (NOGUEIRA et al., 2015). A correção do pH da vinhaça geralmente é feita utilizando uma solução alcalina, podendo ser hidróxido de sódio (NaOH) ou bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>), por exemplo, para que ele seja neutralizado, criando um ambiente adequado para a população bacteriana. Otimizar a alcalinização na fase metanogênica pode ajudar no desempenho econômico e ambiental de uma planta de biogás, reduzindo os custos operacionais e riscos ligados à toxicidade humana e eutrofização da água (FUESS et al., 2018).

Os processos de biodigestão anaeróbica podem ser mesofílicos e termofílicos, onde o primeiro consiste em operar em temperaturas entre 10° e 42° Celsius, e o segundo consiste em operar a temperaturas acima de 42° Celsius (VIEIRA, 1981). Existem, ainda, os processos realizados em estágio único ou em dois estágios (Ferraz Júnior et al., 2016). Independente do tipo de biodigestão, no final do processo de produção de biogás ainda ficará um resíduo. Entretanto, este resíduo tratado pode ser utilizado como biofertilizante.

Na digestão em estágio único, pode haver acúmulo de ácidos orgânicos voláteis e a comunidade bacteriana adequada para aquele ambiente pode levar meses para se desenvolver, deixando o processo mais demorado (THOMPSON, 2008). Entretanto, quando bem atuado há a formação de, principalmente, ácido acético e hidrogênio, que são convertidas em metano (COONEY et al., 2007). Na digestão em dois estágios a formação de ácido, na acidogênese, alimenta constantemente a metanogênese, incentivando a manutenção da população metanogênica (THOMPSON, 2008).

A digestão em dois estágios pode aumentar o rendimento do metano, devido à acidificação durante a produção de hidrogênio na primeira etapa (NASR et al., 2012). A figura 10 mostra o diagrama do processo de digestão anaeróbica em dois estágios.

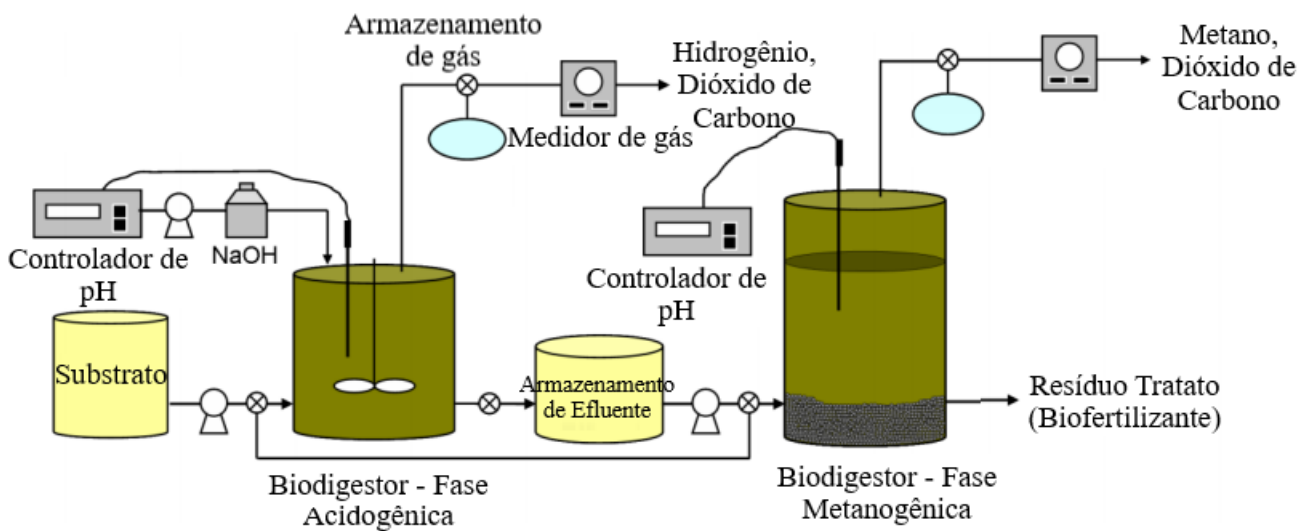


Figura 10 – Digestão em Dois Estágios.

Fonte: Adaptado de (NASR et al., 2012).

As condições ideais para a produção de biogás a partir da vinhaça estão listadas na tabela 5. Nessas condições,  $1\text{m}^3$  de vinhaça pode gerar entre 10 e  $26,4\text{m}^3$  de biogás contendo cerca de 60% de metano. Parâmetros como a biodegradabilidade, redução de emissão de dióxido de carbono e eficiência teórica do metano gerado pela sua digestão anaeróbica, podem ser calculados como nas equações 4.1, 4.2, 4.3 (PARSAEE; KIANI; KARIMI, 2019).

$$BD_v(\%) = \frac{MY_e}{MY_t} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Onde onde  $MY_e$  é a eficiência de produção de metano e  $MY_t$  é o rendimento teórico da produção de metano a partir da DQO da vinhaça, que em geral é igual a  $350\text{ mL de CH}_4/\text{gDQO}$  (PARSAEE; KIANI; KARIMI, 2019; ESPAÑA-GAMBOA et al., 2012).

$$ER_y = BIO_{prod} \cdot CH_{4\%} \cdot CH_{4HHV} \cdot NG_{EF} \quad (4.2)$$

Tabela 5 – Condições ideais para uso da vinhaça como substrato

Parâmetro	Valor ideal <sup>a</sup>
pH	6,8 – 8,2
T <sub>mesofílica</sub>	35
T <sub>termofílica</sub>	55
ST	7,15 - 9,31
DQO:P	100 : 1
C:N	20 – 40 : 1
DQO:N	600 : 7
K	0,15 – 0,74
CO	10
Fe	0,5
Ni	0,1
N-NH <sub>3</sub>	0,5

<sup>a</sup>Faixa de valores encontrados na literatura. Fonte: Adaptado de (PARSAEE; KIANI; KARIMI, 2019).

Onde o  $ER_y$  é a redução da emissão de dióxido de carbono (tCO<sub>2</sub>/ano),  $BIO_{PROD}$  é o valor produzido do biogás (m<sup>3</sup>/ano),  $CH_4\%$  é o teor de metano no biogás,  $CH_{4HHV}$  é o valor térmico de metano (55,5 MJ/ kg), e  $NG_{EF}$  é coeficiente de emissão de CO<sub>2</sub> (56,1 tCO<sub>2</sub>/TJ) (JANKE et al., 2014).

$$B_{0,th} = \frac{0,415Carboidrato + 0,496Proteína + 1,014Lipídio + 0,373Acetato + 0,530Propionato}{Carboiratos + Proteínas + Lipídios + Acetatos + Propionatos} \quad (4.3)$$

A vinhaça é um resíduo agroindustrial, mas não é o único que pode ter seu potencial energético aproveitado. A tabela 6 mostra a produção de biogás e o rendimento do metano de alguns resíduos comuns da agroindústria.

Tabela 6 – Biogás gerado pelos resíduos agroindustriais

Substrato	Biogás <sup>a</sup>	Metano <sup>a</sup>
Grãos destilados de cereais	30 - 50	18 – 35
Resíduo de destilado de Batata	26 - 42	12 – 24
Resíduo do destilado de frutas	10 - 20	6 – 12
Água residual da batata	50 - 56	28 – 31
Torta de filtro de beterraba	60 - 75	44 – 54
Melaço	290 - 340	210 – 247
Bagaço de maçã	145 - 150	98 – 101
Bagaço de uva	250 - 270	169 – 182
Bagaço de malte	105 - 130	62 – 112
Glicerol bruto	240 - 260	140 – 155

<sup>a</sup>Em Nm<sup>3</sup>/t de Substrato. Fonte: Adaptado de (ROHSTOFFE, 2010).

## Parte II

### Desenvolvimento

## 5 Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho. Primeiramente foi realizada uma revisão de literatura se baseando na teoria do enfoque meta-analítico consolidado (TEMAC), que consiste em uma ferramenta cujo objetivo é selecionar materiais de confiança para a pesquisa científica, levando em conta o impacto das revistas e publicações e as grandes áreas dos estudos. O TEMAC foi utilizado apenas para a linha de busca inicial, com o objetivo de reunir material de relevância e confiança para o referencial teórico. A parte prática consistiu nas seguintes etapas: 1) Produção da vinhaça, a partir da produção do etanol de primeira geração; 2) Construção do biodigestor; e 3) Produção do biogás a partir da vinhaça, como pode ser observado no fluxograma da figura 11.

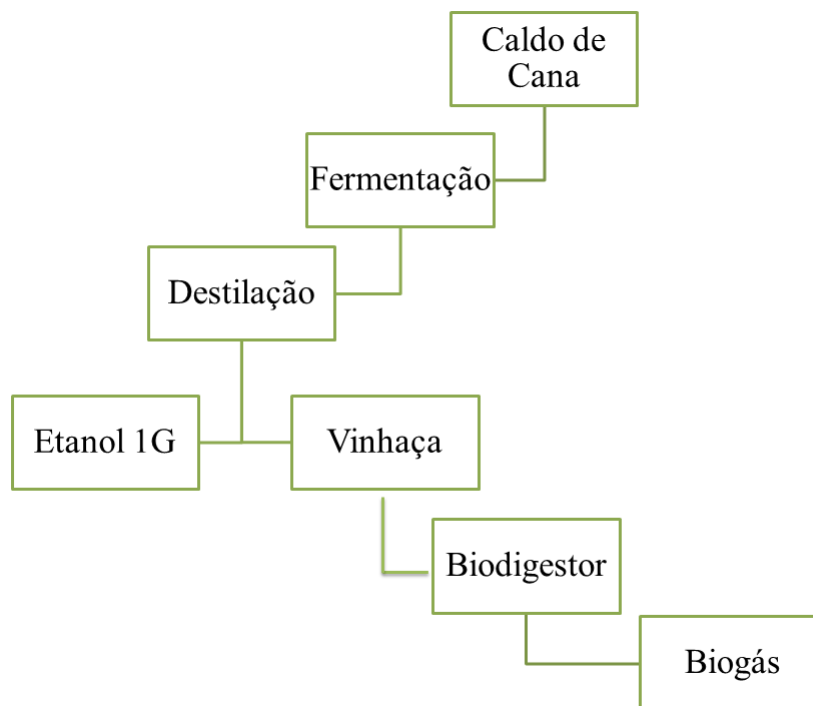


Figura 11 – Fluxograma dos processos realizados.

Fonte: Autoria Própria.

### 5.1 Metodologia de Pesquisa

Foi verificada a necessidade da utilização de uma base de dados segura e consolidada, de maneira que a "Web Of Science" foi escolhida para a realização do levantamento de trabalhos. A linha de busca realizada foi "Biogas AND (Vinasse OR Stillage)" no período de 2018-2021, considerando artigos publicados até o mês de fevereiro de 2021. A área



eletricidade e combustível. A partir deste artigo de revisão foi possível verificar alguns artigos e livros importantes para o desenvolvimento deste trabalho e que acabaram não sendo alcançados com a linha de busca proposta, principalmente pelo período de tempo analisado.

Como forma de complementar a revisão bibliográfica feita previamente e encontrar lacunas ainda existentes em relação ao biogás produzido a partir da vinhaça no Brasil, outros trabalhos acadêmicos foram utilizados como referência para a realização deste trabalho, como monografias, teses e dissertações de diversas universidades brasileiras. A revisão da literatura foi feita com o objetivo de conhecer o que se tem estudado ao longo dos anos sobre o biogás, sobre os resíduos da indústria do etanol e sobre esses dois assuntos em conjunto e suas diversas aplicações e tecnologias, trazendo a possibilidade de estudos posteriores nesta mesma área de pesquisa.

## 5.2 Produção de Etanol 1G e Recuperação da Vinhaça

### 5.2.1 Preparação do Mosto

A cana de açúcar foi comprada em um quiosque de lanches localizado no Riacho Fundo II, onde já teve seu caldo extraído na própria moenda do estabelecimento. Os espectros do caldo de cana e do bagaço foram adquiridos utilizando o espectrômetro FTIR Nicolet iS10, da Thermo Scientific, na região de 500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ . O grau Brix inicial do caldo de cana foi avaliado utilizando o refratômetro analógico RHB32 da ASKO, e o pH avaliado utilizando o pHmetro PG3000 da Gehaka.

O Brix desejado para que a fermentação tivesse início era entre 15° a 16° (BEGNINI et al., 2016). Como o valor inicial foi maior, realizou-se uma diluição do caldo, com água, de acordo com a equação 5.1.

$$V_{H_2O} = \frac{V_{\text{mosto}} \cdot {}^\circ\text{Brix}_{\text{inicial}}}{{}^\circ\text{Brix}_{\text{desejado}}} \quad (5.1)$$

### 5.2.2 Fermentação

A partir de 20 g de *Saccharomyces cerevisiae* foram adicionadas a cerca de 200 mL de água morna, em um erlenmeyer. Após agitação leve, a mistura foi colocada em uma estufa por 25 minutos. Ao dobrar de tamanho, o fermento foi adicionado ao mosto cuidadosamente. A fermentação durou cerca de 36h.

Após isto, o recipiente em que ocorria a fermentação foi colocado em refrigeração, para inibir a ação das leveduras. O espectro do mosto fermentado foi analisado usando espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier e seu grau Brix, para verificar o teor de açúcares residuais, e pH foram verificados.

### 5.2.3 Destilação

Em laboratório, foi feita a destilação do etanol utilizando um sistema previamente montado, figura 13, com:

- Manta elétrica;
- Condensador;
- Balão de destilação;
- Frasco para coleta;



Figura 13 – Destilador montado no laboratório.

Fonte: Autoria Própria.

Esse método demoraria bastante para o volume total de líquido que seria destilado. Por tanto, utilizou-se 100 mL de mosto fermentado neste sistema e avaliou-se a quantidade de etanol hidratado destilado e a quantidade de vinhaça residual. Posteriormente, foi construído um destilador caseiro, com o mesmo princípio, utilizando uma panela de pressão, uma garrafa e uma mangueira, figura 14, para destilar volumes maiores de etanol.

Após a destilação, a vinhaça residual, tanto no balão de destilação quanto na panela de pressão, foi recuperada e armazenada. O Etanol hidratado, produto da destilação, foi armazenado, teve seu teor alcoólico mensurado utilizando um densímetro para álcool (alcoômetro) da Incoterm, e seu espectro verificado no equipamento de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier.





Figura 14 – Destilador caseiro.

Fonte: Aatoria Própria.

#### 5.2.4 Vinhaça

O espectro da vinhaça recuperada foi adquirido por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier. Devido ao seu pH ácido, foi feita a sua correção com bicarbonato de sódio ( $NaHCO_3$ ) até atingir o pH desejado, em torno de 6 a 8. Parâmetros como volume e massa foram avaliados e a vinhaça estava pronta para alimentar o biodigestor.

### 5.3 Produção de Biogás

#### 5.3.1 Biodigestor

O biodigestor foi construído a partir de um galão de 5L vazio e que seria descartado. Ele foi pintado de preto e a tubulação do gás foi feita pensada para que houvesse controle da vazão do gás formado, como na figura 15. O biodigestor ficou exposto ao ambiente durante todo o tempo de retenção do substrato.

Também foi construída uma versão menor do biodigestor, da mesma forma que o primeiro, porém com o detalhe de que este ficaria durante todo o tempo de retenção em uma espécie de estufa, também construída previamente com uma lâmpada incandescente de 60W e um vasilhame de vidro revestido com papel alumínio (figura 16),

#### 5.3.2 Biogás

Cerca de 800mL da vinhaça, já com o pH corrigido, foram colocados no biodigestor. O biodigestor foi fechado e mantido exposto ao ambiente por 14 dias. Após esse período,



Figura 15 – Biodigestor.

Fonte: Autorial Própria.



Figura 16 – Estufa caseira.

Fonte: Autorial Própria.

o gás foi coletado, pela válvula superior, em saco de coleta de 1L da restek, para análise em laboratório. Três dias depois, mais uma amostra do gás foi coletada em um outro saco de coleta de 1L.

Após esta produção, a vinhaça biodigerida foi retirada do biodigestor e armazenada. Mais 200mL de vinhaça com o pH corrigido foram adicionadas ao biodigestor que ficou fechado e exposto ao ambiente por mais 14 dias. O gás foi coletado em um saco de coleta de 1L.

No biodigestor menor, com capacidade de cerca de 250mL, foram adicionados 75mL da vinhaça. O biodigestor foi fechado de forma a ficar bem vedado e mantido em uma espécie de estufa por 7 dias. Esse biodigestor foi pensado para acelerar o processo de formação do biogás e avaliar, a partir do espectro, se haveriam diferenças de formação de gases em relação ao período de retenção e as variações de temperatura do substrato no biodigestor.

Os espectros do biogás foram adquiridos utilizando o espectrômetro FTIR Nicolet iS10, na região de 500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , com o acessório para análise de gases acoplado. Antes da leitura de cada amostra, a cela para gases foi limpa com nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e o *background* adquirido.

A confirmação do volume de gás gerado foi feita utilizando uma proveta, de acordo com o esquema da figura 17. A proveta graduada de 500 mL foi preenchida com água e colocada invertida em um recipiente aberto para a atmosfera também com água. A válvula que libera o gás do saco de coleta gerado foi conectada com uma mangueira até a entrada da proveta. Dessa forma, o gás liberado ocuparia o espaço na parte superior da proveta enquanto o nível de água iria diminuindo, marcando exatamente o volume preenchido pelo gás. O volume medido foi o volume do gás presente em um dos sacos de coleta preenchido por inteiro, de forma a confirmar a capacidade volumétrica do saco de coleta utilizado.

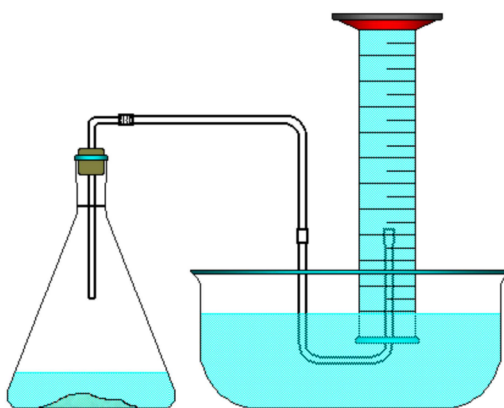


Figura 17 – Esquema para verificação do volume de gás.

Fonte: (BACKES et al., 2013).

Para verificar a porcentagem de metano presente no biogás da vinhaça produzido foi feito um experimento para calcular o poder calorífico. O conjunto biodigestor com biogás teve sua massa aferida. O biodigestor foi conectado a um bico de bunsen com

auxílio de uma mangueira. Um béquer com água foi colocado acima do bico de bunsen, figura 18, e a temperatura inicial da água foi aferida. A chama foi acesa e após a água subir em cerca de 1°C sua temperatura, a chama se apagou. Aferiu-se novamente a massa do conjunto biodigestor e biogás para avaliar a massa de combustível consumida.

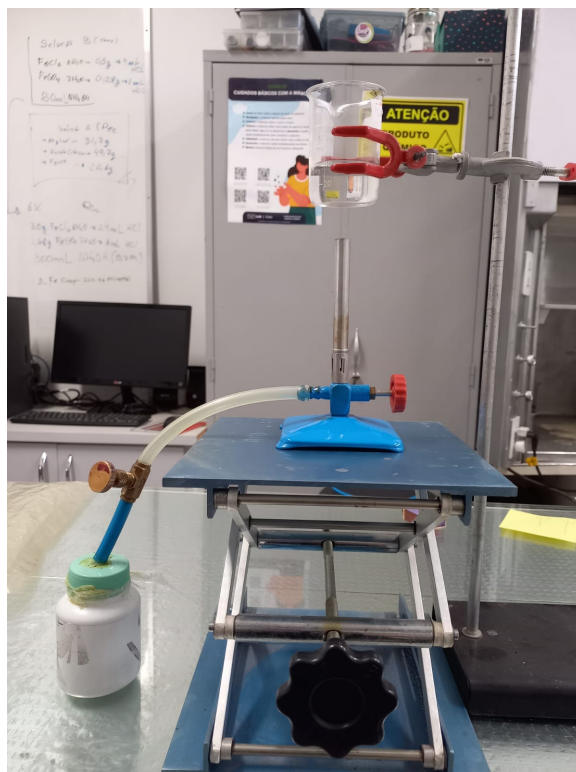


Figura 18 – Ensaio para determinação do poder calorífico do biogás.

Fonte: Autoria Própria.

## 5.4 Aquisição de Espectros

### 5.4.1 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

Os espectros de todas as amostras foram adquiridos utilizando o espectrômetro FTIR Nicolet iS10, da Thermo Scientific, na região de 500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , como mencionado em 5.2.1 e o software OMNIC, ligado ao equipamento.

A amostra sólida, bagaço, foi triturada antes de ter seu espectro adquirido. As amostras líquidas foram analisadas sem necessidade de preparação da amostra. Entretanto, devido ao alto nível de ruído observado nos espectros, para todas as amostras líquidas foi realizado um tratamento dos dados utilizando o software MATLAB R2022a. Os espectros do biogás foram adquiridos com auxílio de uma cela de gases previamente construída na Universidade de Brasília (PEREIRA, 2014 apud JÚNIOR, 2013).

## 6 Resultados e Discussão

### 6.1 Resultados da Produção do Etanol 1G

O volume de caldo de cana inicial foi de 1,9L. O teor de açúcares presentes no caldo de cana foi medido usando o refratômetro, a tabela 7 mostra o °Brix inicial e após a correção com água. Foram acrescentados 600mL de água para diluir o caldo de cana, com o objetivo de alcançar o °Brix desejado, resultando em um volume de mosto final de 2,5L.

Tabela 7 – Teor de açúcar no caldo de cana

°Brix inicial	°Brix final
20	15

As leveduras foram adicionadas ao mosto, em um galão com volume total de 5L, onde a fermentação durou 36h. A tabela mostra o teor de açúcares e pH antes e após a fermentação.

Tabela 8 – Mosto antes e depois da fermentação

°Brix	pH
15	4,90
3	3,74

Após a fermentação, o caldo fermentado foi destilado. A tabela 9 mostra os volumes utilizados e recuperados na destilação tanto com o destilador montado em laboratório quanto com o destilador caseiro.

Tabela 9 – Destilação do caldo de cana fermentado

Método	Caldo [L]	Etanol [L]	Vinhaça [L]
Destilador do laboratório	0,1	0,3	0,7
Destilador caseiro	1,5	0,25	1,075

O destilador montado em laboratório, por ser um sistema bem fechado e isolado, foi capaz de converter 30% do líquido fermentado em etanol hidratado e 70% do líquido restou no balão, como resíduo da destilação (vinhaça). O destilador caseiro converteu 16% do caldo fermentado em etanol hidratado, mas dos 84% do volume que deveria restar na panela, apenas 71% sobraram. Isto aconteceu pois o sistema não estava bem fechado podendo ter ocorrido vazamentos durante o processo. A figura 19 contém uma amostra do caldo de cana após a fermentação e dos produtos da destilação, etanol e vinhaça.

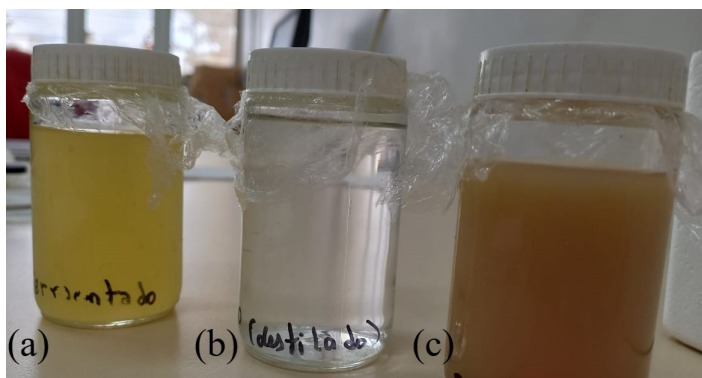


Figura 19 – Amostras da destilação.

(a) Caldo fermentado; (b) Álcool destilado; (c) Vinhaça.

Fonte: Autoria Própria.

O etanol destilado utilizando o destilador caseiro teve o teor alcoólico de 15°GL, provavelmente porque não houve controle da temperatura de ebulição do caldo fermentado durante o processo de destilação. Os espectros adquiridos do caldo de cana após a fermentação e do etanol podem ser observados no Apêndice A.

## 6.2 Resultados obtidos da Vinhaça

Após a destilação, o resíduo encontrado na panela de pressão é a vinhaça. A figura 20 mostra como ela se apresenta. Alguns dias depois, mesmo armazenada em um lugar refrigerado para inibir a ação de quaisquer microorganismos a vinhaça começou a adquirir coloração mais escura e odor mais forte.

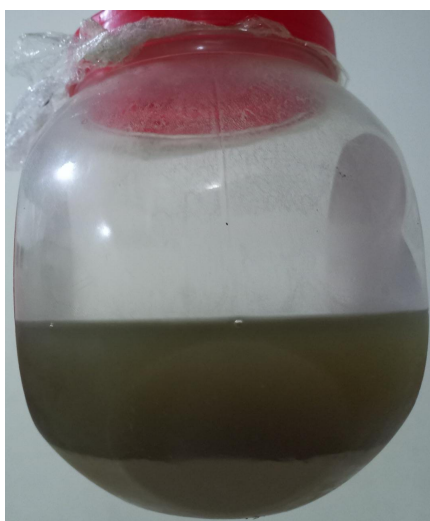


Figura 20 – Vinhaça armazenada.

Fonte: Autoria Própria.

O pH da vinhaça foi avaliado e, por estar muito ácido, foi corrigido com bicarbonato



de sódio. Essa correção teve o objetivo de criar um ambiente adequado para a população bacteriana, como mencionado anteriormente no capítulo 4. A tabela 10 mostra o pH da vinhaça antes e depois da correção.

Tabela 10 – pH da Vinhaça

pH Inicial	pH corrigido
3,82	6,28

A figura 21 mostra o espectro da vinhaça adquirido usando FTIR. Como o espectro tinha muito ruído, ele foi suavizado utilizando a ferramenta *clean data* do software MATLAB R2022a. Foi feito um *smooth* e aplicado o método de filtro Gaussiano, com fator de suavização de 0,07.

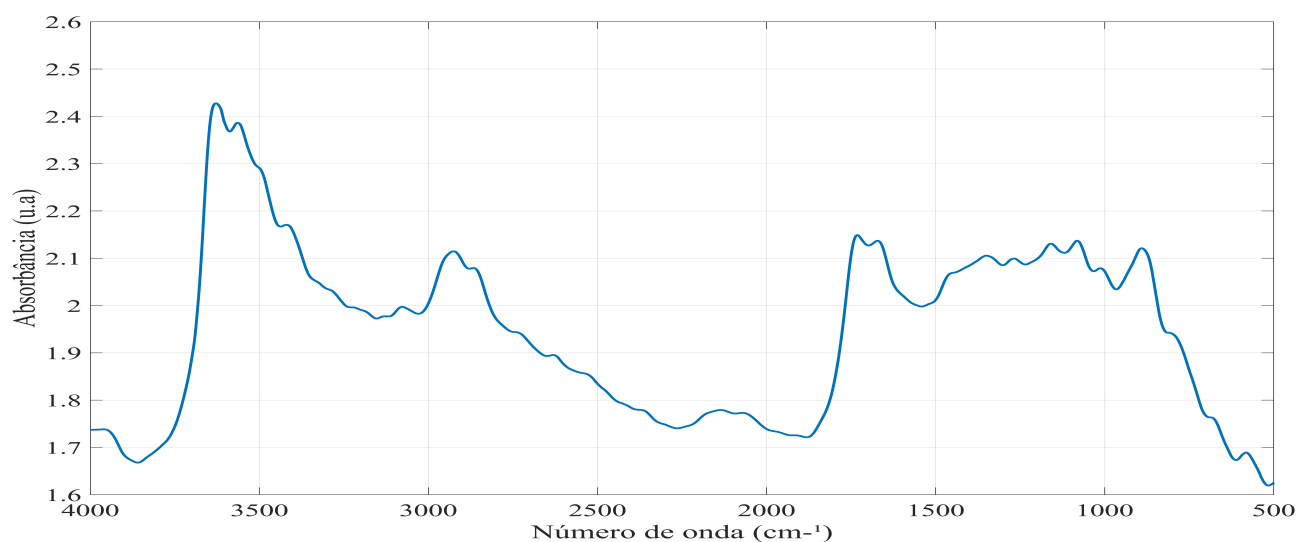


Figura 21 – Espectro da Vinhaça Residual.

Fonte: Autoria Própria.

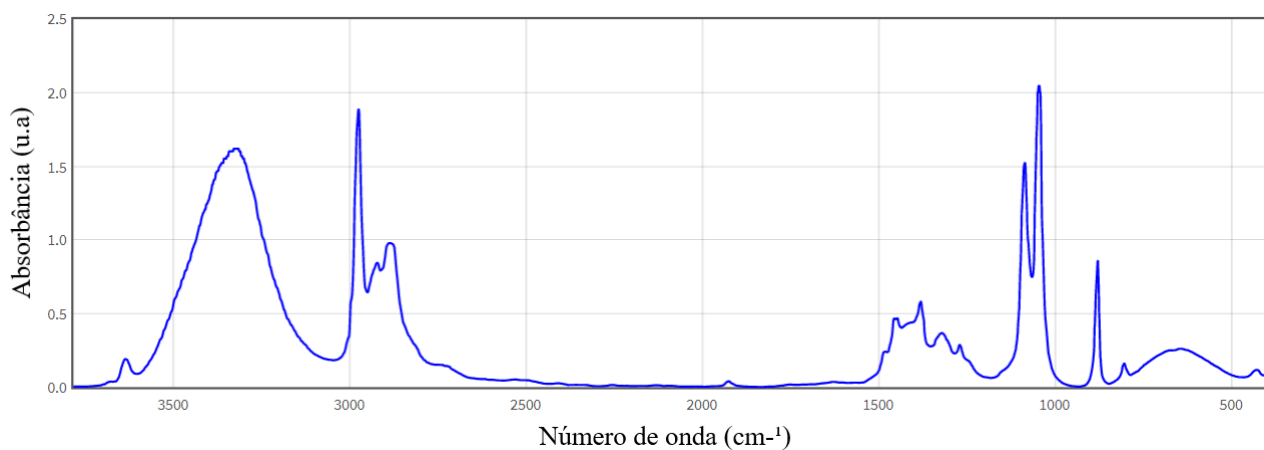


Figura 22 – Espectro padrão de Etanol.

Fonte: Adaptado de (LINSTORM, 1998).

Observando a figura 22, é possível perceber as semelhanças entre a banda da vinhaça e a banda de etanol, retirada da literatura, podendo indicar que ainda poderia ser destilado mais etanol do resíduo analisado. As bandas que aparecem na região de 2800 a 3000  $\text{cm}^{-1}$  se referem ao movimento vibracional dos grupos funcionais C-H. A banda que aparece em 1200  $\text{cm}^{-1}$  indica o movimento de vibração do grupo C-O. O modo vibracional observado em 3400  $\text{cm}^{-1}$  refere-se ao grupo funcional O-H (BARBOSA, 2007).

### 6.3 Biodigestão da Vinhaça

A vinhaça com pH corrigido serviu de substrato para a produção de biogás. O biodigestor modelo batelada foi escolhido, devido a sua facilidade de implementação e baixo custo, servindo para avaliar a eficiência do biogás produzido a partir do substrato proposto.

O biogás foi produzido em três bateladas diferentes. Na primeira batelada (Batelada 1), o biodigestor recebeu 800mL de vinhaça e seu tempo de retenção foi entre 14 e 17 dias até a coleta completa do gás formado. Na segunda batelada (Batelada 2), a vinhaça biodigerida da primeira batelada foi retirada e 200mL de uma nova vinhaça, já com pH corrigido e previamente armazenada após o processo de destilação, foi colocada no biodigestor e teve um tempo de retenção de 14 dias. A terceira batelada (Batelada 3), foi feita no biodigestor menor, onde 75mL de vinhaça o alimentaram. A tabela 11 mostra o volume de substrato utilizado em cada batelada e o volume de biogás produzido.

Tabela 11 – Volumes de substrato e biogás produzido em cada batelada

Batelada	Volume de Vinhaça <sup>a</sup>	Volume de Biogás <sup>b</sup>
1	800	2000
2	200	1000
3	75	<1000

<sup>a</sup>mL; <sup>b</sup>cm<sup>3</sup>

#### 6.3.1 Caracterização do Biogás por Espectroscopia no Infravermelho

Os espectros do biogás foram avaliados na região do infravermelho, com auxílio do acessório para gases. A figura 23 mostra os espectros adquiridos a partir da primeira batelada do biogás.

O biogás produzido na primeira batelada apresentou um volume de gás considerável, 2000  $\text{cm}^3$ . Entretanto, de acordo com a literatura, 1  $\text{m}^3$  de vinhaça em condições ideais, tabela 5, poderia produzir entre 10 e 24  $\text{m}^3$  de biogás (ROHSTOFFE, 2010). A relação entre vinhaça e biogás produzido na primeira batelada deste trabalho foi de 1:2,5, ou seja, a cada 1 $\text{m}^3$  de vinhaça, 2,5 $\text{m}^3$  de biogás foi produzido. É possível que os outros



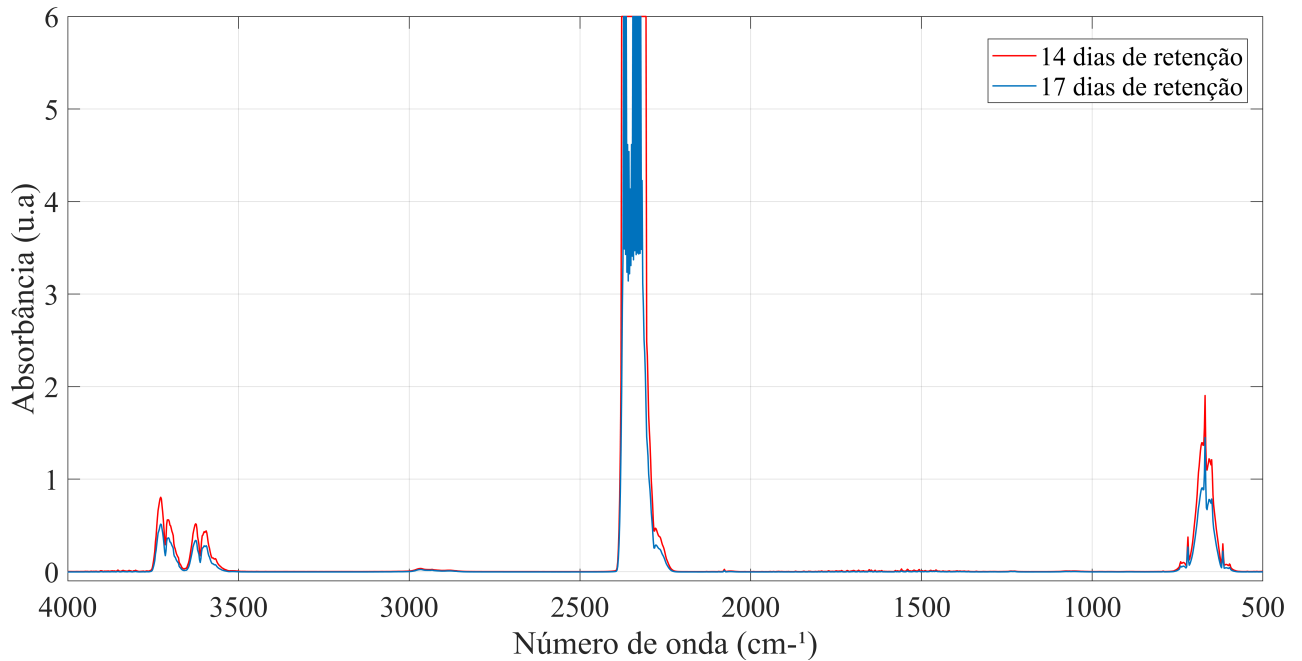


Figura 23 – Espectro infravermelho do biogás produzido na primeira batelada.

Fonte: Autoria Própria.

parâmetros, além da temperatura e pH, tenham interferido no processo de formação dos gases, visto que não foram monitorados com precisão.

Os espectros do biogás produzido na segunda batelada podem ser observados na figura 24. É importante lembrar que a coleta do gás foi realizada após 14 dias de retenção, onde o biodigestor foi mantido exposto ao ambiente, assim como o biogás produzido na primeira batelada.

Os espectros do biogás produzido na terceira batelada podem ser observados na figura 25. Esse biodigestor foi mantido na estufa durante todo o tempo de retenção, que foi um tempo bem menor que o das outras bateladas.

Ao analisar os picos presentes nos espectros e comparar com dados de tabelas presentes na literatura (citar livro de química IR) foi possível identificar grupos e compostos presentes no biogás formado. O biogás tem sua composição base já conhecida, basicamente  $CO_2$ ,  $CH_4$  e traços de  $NH_3$  e  $H_2S$ . Dessa forma, já é esperado observar algumas bandas em regiões de absorção específicas.

Em  $3000\text{ cm}^{-1}$  pode ser observado o estiramento C-H. Em alcanos, essa absorção pode ocorrer entre  $3000\text{-}2840\text{ cm}^{-1}$ . Um pico localizado em aproximadamente  $720\text{ cm}^{-1}$  pode estar relacionado ao movimento de *rocking* associado ao grupo  $CH_2$ , ou a um dobramento de C-H fora do plano, que ocorre entre  $1000\text{-}650\text{ cm}^{-1}$  (BARBOSA, 2007). No Anexo A pode ser observado o espectro infravermelho padrão do gás metano ( $CH_4$ ), onde podemos observar uma semelhança entre os picos adquiridos do biogás produzido a partir da vinhaça.

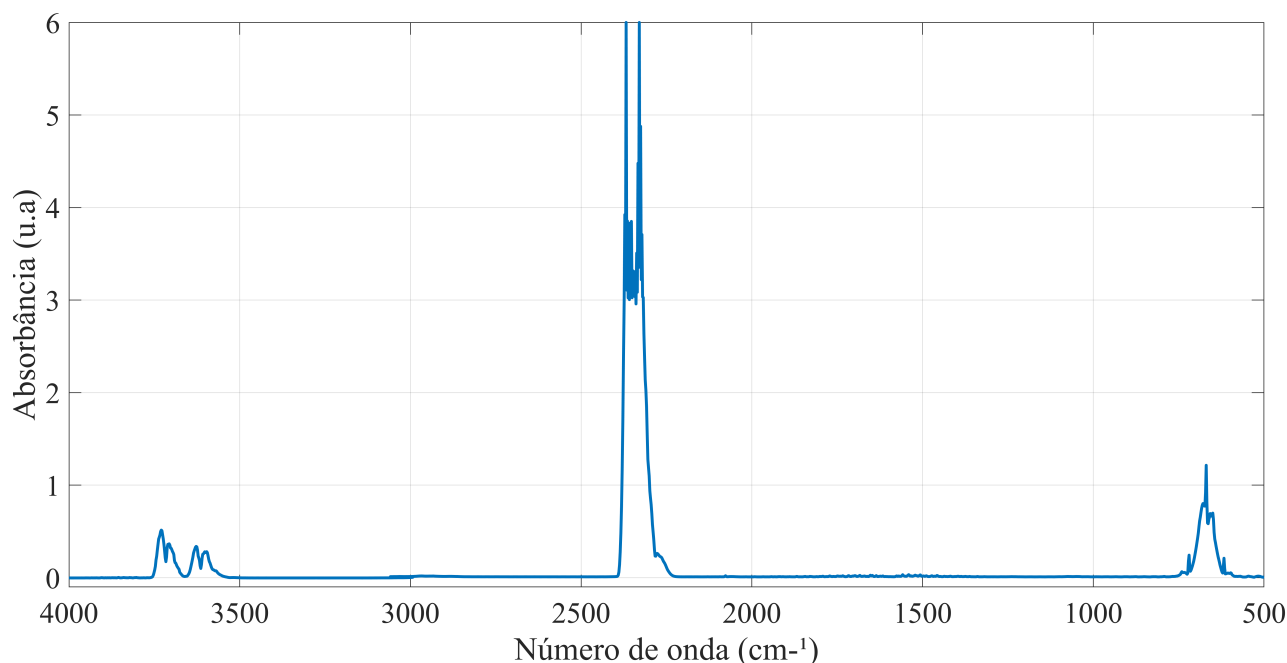


Figura 24 – Espectro infravermelho do biogás produzido na segunda batelada.

Fonte: Autoria Própria.

Em  $2350$  e  $669\text{ cm}^{-1}$ , pode ser observada a deformação axial assimétrica e angular do  $\text{CO}_2$ , respectivamente (COLATI et al., 2011). Na figura 23, é possível perceber que a banda de  $\text{CO}_2$  decaiu entre a primeira coleta do biogás da primeira batelada (após 14 dias) e entre a segunda coleta do mesmo biogás (após 17 dias). A banda de metano, em  $3000\text{ cm}^{-1}$ , teve um sutil aumento. Isto pode ter acontecido devido à metanogênese, onde as arqueas metanogênicas convertem  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  e ácido acético em  $\text{CH}_4$ .

As regiões  $3750\text{ cm}^{-1}$ ,  $2800\text{ cm}^{-1}$  e  $1250\text{ cm}^{-1}$  estão associadas as vibrações de deformação axial em átomos de hidrogênio ligados ao enxofre (CARVALHO, 2017). Em torno de  $3800\text{ cm}^{-1}$  há, também, a possibilidade da existência de grupo amina (NH) (BARBOSA, 2007).

Apesar do pouco tempo de retenção e da pouca quantidade de gás formada, o biogás da terceira batelada apresentou uma banda de metano bem maior que o biogás das outras bateladas. Isto pode ter acontecido por conta do sistema ser bem isolado, auxiliando a digestão anaeróbia e também pelo fato da temperatura se manter constante, em torno de  $35^\circ\text{C}$ , durante todo o período de produção do gás. Nas bateladas 1 e 2 é provável que tenha ocorrido intoxicação da população bacteriana, presença de inibidores como  $\text{O}_2$ , ou grupo NH, que pode causar deficiência de nitrogênio no processo e afetar a relação C:N (KARLSSON et al., 2014), e pH fora da faixa ideal de operação, visto que a análise foi realizada apenas no início do processo, antes do substrato ser colocado no biodigestor. A figura 26 mostra os espectros das três bateladas sobrepostos. Para esta figura, foi realizado um pré-processamento nos dados, utilizando a ferramenta de quimiometria, *PLS\_Toolbox*,

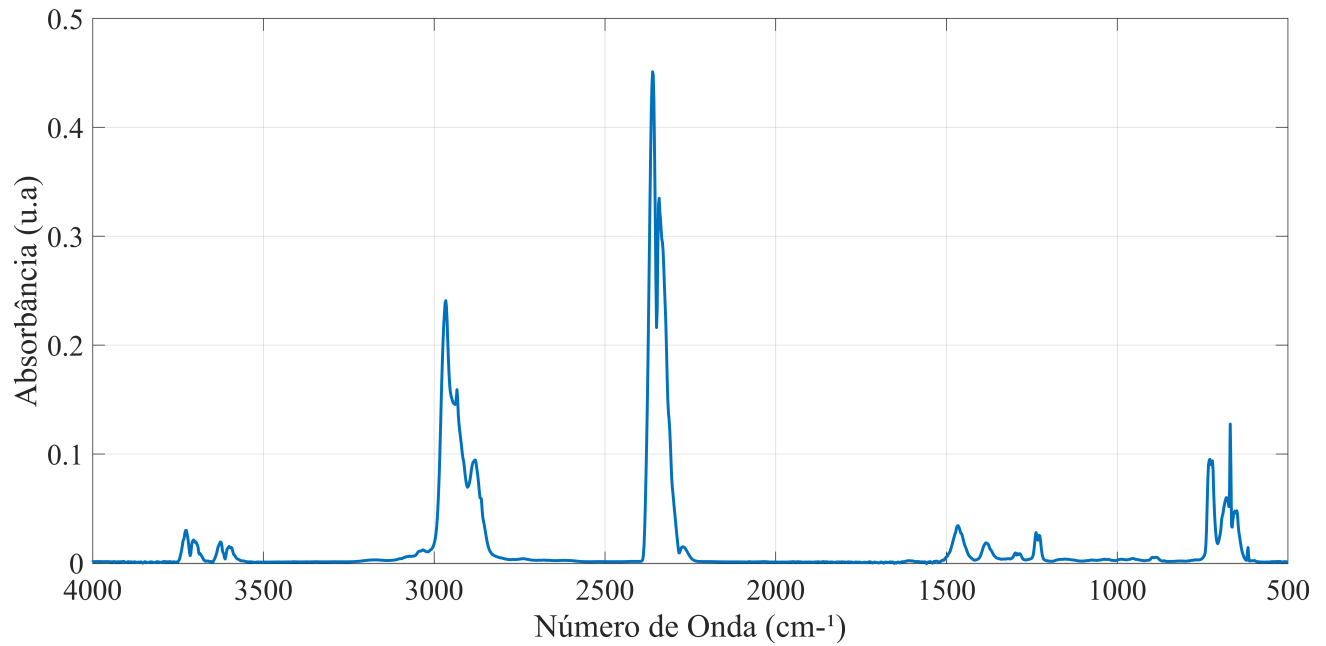


Figura 25 – Espectro infravermelho do biogás produzido na terceira batelada.

Fonte: Autoria Própria.

no MATLAB R2022a. Os espectros foram autoescalados, ou seja, cada dado foi centrado na média e dividido pelo seu respectivo desvio padrão (FERREIRA et al., 1999), com a finalidade de evidenciar as semelhanças e discrepâncias entre os espectros adquiridos para o biogás de cada uma das bateladas.

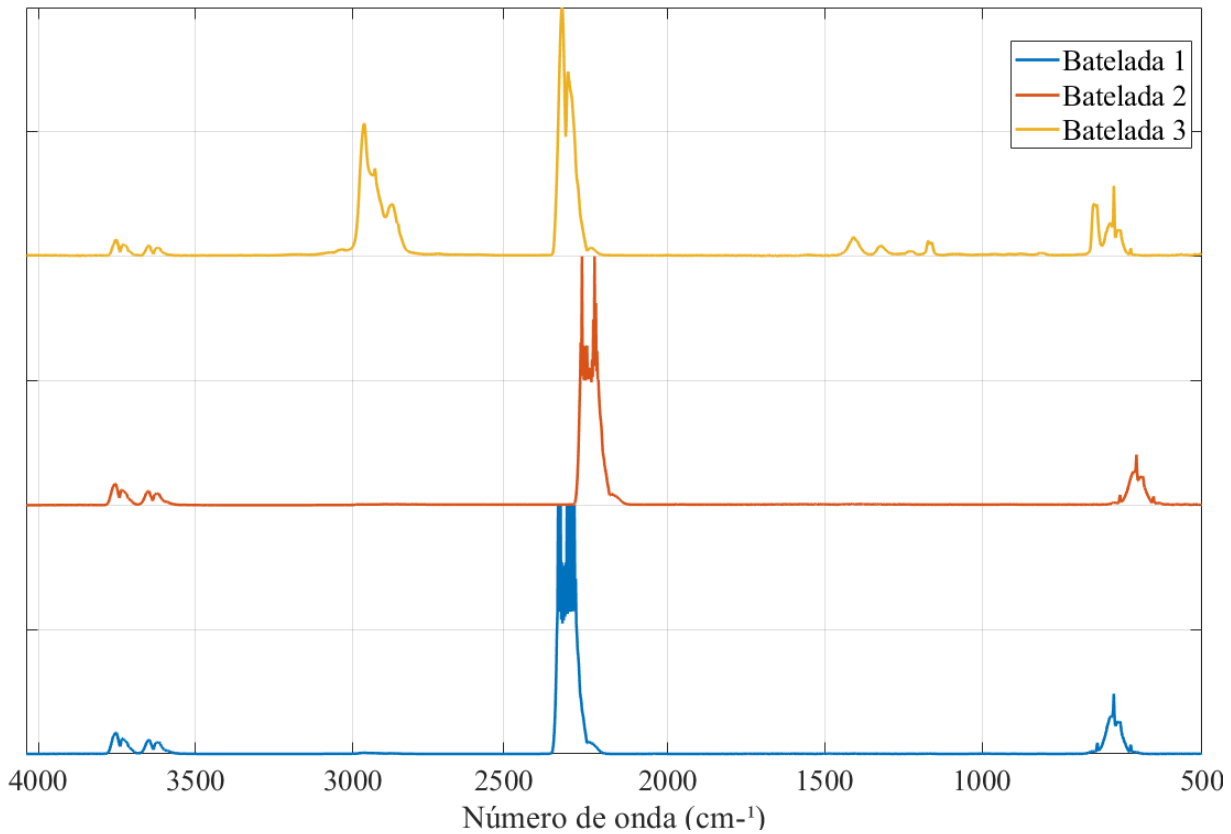


Figura 26 – Visualização dos espectros na mesma escala.

Fonte: Autoria Própria.

### 6.3.2 Poder Calorífico do Biogás

O poder calorífico do Biogás formado a partir da vinhaça produzida foi calculado com o objetivo de avaliar a concentração de metano,  $CH_4$ , presente no biogás. A tabela 12 mostra os parâmetros mensurados no ensaio para a determinação do poder calorífico.

Tabela 12 – Parâmetros mensurados para determinação do poder calorífico do biogás

$T_1^a$	$T_2^a$	$\Delta T^a$	$m_1^b$	$m_2^b$	$m_{consumida}^b$
23,5	25,0	1,5	139,990	139,977	0,013

<sup>a</sup>°C; <sup>b</sup>g

Para calcular o poder calorífico, foi verificada a quantidade de calor absorvida pela água, de acordo com a equação 6.1, onde foram utilizados 33,40g de água.

$$Q = m_{H_2O} \cdot c \cdot \Delta T \quad (6.1)$$

De acordo com o experimento, foram necessários aproximadamente 13mg de combustível para elevar a temperatura de 33,40g de água em 1°C, sendo o calor absorvido aproximadamente 139,74 joules, sendo o poder calorífico do biogás produzido 10.749,66

kJ/kg. Admitindo a densidade do biogás como  $0,72 \text{ kg/m}^3$  (COMPANHIA, 2006), é possível calcular que o poder calorífico desse combustível foi  $7.739,75 \text{ kJ/m}^3$ .

O poder calorífico do metano puro é um valor conhecido na literatura,  $35.558 \text{ kJ/m}^3$  (LORA, 2012 apud PAIXÃO et al., 2018). Dessa forma, a porcentagem de metano presente na nossa amostra foi de 21,76%. Vale ressaltar que o processo só conseguiu estimar a quantidade de calor absorvida pela água, não considerando o calor absorvido pelo béquer e pelo ambiente.

É possível que a quantidade de biogás produzido tenha interferido na realização do ensaio, visto que foi realizado rapidamente, devido a disponibilidade do gás do biodigestor menor, entretanto, a combustão do gás indica que a produção de metano foi eficiente. A queima do biogás produzido no biodigestor maior foi ineficiente, visto que a concentração de  $\text{CO}_2$  estava muito acima da concentração de  $\text{CH}_4$ .

## 6.4 Outras discussões

O Brasil está entre os maiores produtores de etanol do mundo. Em 2019 sua produção excedeu as expectativas e gerou 35,6 bilhões de litros na safra de 2019/2020 (CONAB, 2020). Em 2020 produziu um pouco menos, 32,6 bilhões de litros (EPE, 2021). A matéria-prima base do etanol brasileiro é a cana-de-açúcar, e é muito comum a existência das indústrias sucroalcooleiras, onde geralmente coexiste a plantação da cana-de-açúcar, produção de açúcar e produção de etanol.

A indústria sucroalcooleira, apesar de utilizar o conceito de biorrefinaria, buscando aproveitar ao máximo todas as partes da sua matéria-prima, ainda produz uma grande quantidade de resíduos. Muitos dos resíduos são aproveitados dentro da própria usina, como é o caso do bagaço da cana que pode ser utilizado para produzir mais etanol, de segunda geração, e agregar valor à lignina, por exemplo, ou queimado em caldeiras para a cogeração de energia. Entretanto, resíduos como a vinhaça, que possuem alto teor contaminante, merecem total atenção no momento de sua reutilização. Em 2021, no Brasil, entrou em operação comercial a primeira usina sucroenergética com capacidade instalada de 21MW (EPE, 2021), produzindo biogás a partir dos resíduos do processamento da cana-de-açúcar e do etanol, a torta de filtro, que é o resíduo da filtração do caldo, e a vinhaça, que é um subproduto líquido ácido do processo de destilação.

Como mencionado anteriormente, no capítulo 1, o fato do etanol ser produzido por diversas matérias-primas implica na composição muito variável da vinhaça resultante do seu processo de destilação. Os processos envolvidos na planta de produção sucroalcooleira, como o tipo de levedura utilizada na fermentação e a necessidade, ou não, da utilização de algum pré-tratamento como é o caso da hidrólise aplicada aos materiais celulósicos, também afetam as características finais da vinhaça.

Sendo a cana-de-açúcar a matéria-prima mais utilizada no Brasil, de acordo com a tabela 1 são gerados cerca de 16 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido pelo caldo da cana. O seu pH ácido, cerca de 4, deve ser corrigido de forma que seja neutralizado e fique dentro dos padrões aceitáveis para que possa ser biodegradado. Para cada litro de etanol produzido neste trabalho, cerca de 2,5 litros de vinhaça foram gerados, entretanto, após análise da vinhaça no infravermelho, percebeu-se que a destilação poderia ter durado mais tempo de forma a recuperar um volume maior de etanol.

Para a utilização da vinhaça resultante do etanol de segunda geração, entende-se que o pré-tratamento da hidrólise, seja ácida, alcalina ou enzimática, antes da fermentação, irá originar um resíduo com características diferenciadas ao resíduo proveniente do etanol de primeira geração. Por isso, a etapa de caracterização do substrato é importante para que seja feita uma correção de parâmetros específica para cada caso.

Outros usos da vinhaça são relatados, sendo o mais comum seu uso na fertirrigação, devido à sua alta concentração de nutrientes. Entretanto, a aplicação desenfreada da vinhaça no solo pode causar salinização do mesmo, o tornando infértil e impedindo a proliferação de espécies locais, modificando a biodiversidade local. Seu uso em excesso nos canaviais também pode afetar e retardar o processo de maturação da planta, levando à queda dos níveis de sacarose da planta. A biodigestão da vinhaça é altamente recomendada por muitos autores, visto que além de agregar valor, gera a possibilidade de diversificação da matriz elétrica e energética. Outro ponto bastante discutido é o auxílio nas reduções dos gases de efeito estufa, devido à queima da vinhaça, e a mitigação dos possíveis impactos ambientais causados por ela.

O biogás proveniente da vinhaça da cana-de-açúcar se mostra bastante eficiente. Entre 10 a 26,4 m<sup>3</sup> de biogás contendo 60% de metano podem ser produzidos a partir de 1 m<sup>3</sup> de vinhaça (PARSAEE; KIANI; KARIMI, 2019). O biogás produzido teve 21% de metano, mesmo sendo produzido em poucos dias, indicando que caso tivesse um tempo de retenção maior no biodigestor, teria um aumento na produção deste gás. O esterco bovino, que é o substrato que possui um grande volume de produção, gera um gás com cerca de 55% de metano, de acordo com os dados da tabela 4. O esterco de porco, gera um gás com cerca de 60,7% de metano, sendo que este substrato é considerado um dos mais eficientes. Dessa forma, fica evidente o potencial energético da vinhaça da cana-de-açúcar como substrato no biodigestor.

O consumo de energia elétrica na região Centro-Oeste no último ano foi de 38.841GWh, de acordo com (EPE, 2022). Visto que a produção de etanol em 2021 foi de 11.551.770m<sup>3</sup> na região, e de acordo com os experimentos realizados em laboratório neste trabalho, cerca de 26.954.129m<sup>3</sup> de vinhaça, gerando, assim, 67.385.322,5m<sup>3</sup> de biogás com cerca de 21% de metano. Se convertidos em energia elétrica, em condições ideais e sabendo que ao converter a energia do biogás produzido em kWh temos 2,15kWh, essa quantidade de

biogás teria um potencial de cerca de 144,87 GWh, o equivalente a 0,37% do consumo do último ano.

O biogás está cada vez mais presente na matriz elétrica e energética brasileira. Observa-se o uso dos mais diferentes substratos na bibliografia, mostrando que a biodigestão anaeróbica é uma tecnologia bem difundida e bastante replicável. De todo o biogás produzido em 2019, em território brasileiro, a região sudeste foi a que mais teve participação com 62,9% do total produzido. As matérias-primas das usinas de biogás em operação são bem diversificadas, contando com substratos da agropecuária, da indústria e de aterro sanitário e esgoto.

Com o setor sucroenergético em expansão, olhar para os resíduos gerados torna-se mais que preocupação ambiental, torna-se questão de responsabilidade quanto à gestão dos resíduos e possibilidade de ampliação da matriz elétrica e energética brasileira. Dessa forma, as tecnologias de conversão desses resíduos em formas sustentáveis de energia devem ser incentivadas.

## 7 Conclusão

A biodigestão da vinhaça é um assunto em expansão. Vários autores tem discutido o aproveitamento do seu potencial energético atrelado à redução da sua carga poluidora. Com o setor sucroalcooleiro sendo um dos principais segmentos da economia brasileira, sua expansão deve incentivar a gestão dos resíduos gerados pelo setor. De acordo com dados da literatura, o uso da vinhaça como substrato para a produção de biogás é tão eficiente quanto o estrume de porco, gerando um biogás com cerca de 60% de metano. O biogás produzido teve cerca de 21% de metano, se mostrando promissor, devido ao pouco tempo de retenção no biodigestor, 5 dias em estufa.

A produção de biogás por meio da biodigestão anaeróbica possui uma tecnologia bastante consolidada, mas ainda pouco explorada no Brasil. No entanto, nos últimos anos o uso do biogás tem crescido após incentivos como a Política Nacional de Resíduos Sólidos que determina que os resíduos sejam explorados em todas as áreas, incluindo a exploração energética do resíduo e a Política Nacional de Biocombustíveis - Renovabio, que gera créditos de carbono a partir da produção e comercialização de biocombustíveis. O direito da população ao saneamento básico, também incentiva o tratamento do esgoto, podendo se obter biogás a partir desse resíduo.

A vinhaça é apenas um dentre os vários resíduos que podem ter seu potencial energético aproveitado. Além de agregar valor à um resíduo, tem-se a ampliação e uma matriz energética cada vez mais sustentável e limpa.



## 8 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros seria interessante aprofundar a aplicação do biogás da vinhaça, como o processamento do biogás para recuperação do biometano. Outra perspectiva interessante seria a recuperação do hidrogênio para uso em bioquerosene de aviação ou em células de combustível.

Estudar o resíduo da biodigestão da vinhaça é importante, para avaliar a diminuição dos poluentes e calcular a biodegradabilidade deste substrato. Assim como a caracterização da vinhaça antes e depois da digestão anaeróbia, incluindo macros e micros nutrientes, é uma forma de agregar conhecimento nessa área em expansão.

# Referências

- ADELEKAN, B. A. Potentials of selected tropical crops and manure as sources of biofuels. In: KUMAR, S. (Ed.). *Biogas*. Rijeka: IntechOpen, 2012. cap. 1. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/31254>>. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.
- AITA, B. C. et al. Remoção de  $\text{H}_2\text{S}$  de biogás por biofiltração. 2016. Citado na página 36.
- Al Seadi, T. *Biogas handbook*. 2008. ed. Denmark: Syddansk Universitet, 2008. v. 1. ISBN 978-87-992962-0-0. Citado 4 vezes nas páginas 30, 31, 32 e 33.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Geração Distribuída*, 2020. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd\\_fonte\\_detalhe.asp?Tipo=2](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd_fonte_detalhe.asp?Tipo=2)>. Citado na página 35.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Painel Dinâmico de Produtores de Etanol*, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-etanol>>. Citado na página 35.
- ARORA, A. et al. Microfiltration of thin stillage: Process simulation and economic analyses. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 1, p. 113–120, 2011. ISSN 0961-9534. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410002813>>. Citado na página 29.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004*: Resíduos sólidos (classificação). Rio de Janeiro, 2004. Citado na página 28.
- BACKES, N. F. et al. Determinação de volume e massa de gases sob efeito de temperatura: uma atividade experimental ilustrando a físico-química. *Encontro de Debates sobre o Ensino de Química*, 2013. Citado na página 49.
- BARBOSA, L. C. de A. *Espectroscopia no infravermelho: na caracterização de compostos orgânicos*. [S.l.]: Ed. UFV, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 54, 55 e 56.
- BECKER, H. R. et al. Remoção de  $\text{H}_2\text{S}$  por meio de adsorção em óxido de ferro granular. 2013. Citado na página 36.
- BEGNINI, M. L. et al. Fermentação de caldo de cana em microdestilaria. 2016. Citado na página 45.
- BRITO, R. C.; SALES, J. H.; CEZANA, R. G. Modelagem de um biogerador tipo marinha para produção de energia elétrica usando o cacau como aditivo. In: *XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, CREEM*. [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 39.
- CARVALHO, C. G. Desenvolvimento de nanofiltro para remoção de sulfeto de hidrogênio do biogás. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 56.

CHYNOWETH, D. P.; ISAACSON, R. Anaerobic digestion of biomass. 1987. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.

COELHO, J. M. Biogás No Brasil: Visão Atual. *Vii Fórum Do Biogás*, 11 2020. Disponível em: <[Apresentaç~aodoPowerPoint\(abiogas.org.br\)](http://Apresentaç~aodoPowerPoint(abiogas.org.br))>. Citado na página 38.

COLATI, K. A. P. et al. Construção de uma célula de gás de baixo custo para análise no infravermelho. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 34, p. 864–867, 2011. Citado na página 56.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Norma Técnica P4231: Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola*. São Paulo, 2015. Citado na página 28.

COMPANHIA, D. T. E. S. A. Biogás: pesquisas e projetos no brasil. *Governo de São Paulo, Secretaria de Meio Ambiente e CETESB. Organização de Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer. Responsável técnico: João Wagner Silva Alves*. São Paulo, 2006. Citado na página 59.

CONAB. Companhia nacional de abastecimento. *Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar*, 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 59.

COONEY, M. et al. Two-phase anaerobic digestion for production of hydrogen–methane mixtures. *Bioresource Technology*, v. 98, n. 14, p. 2641–2651, 2007. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852406005190>>. Citado na página 40.

DEGANUTTI, R. et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. *Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural*, SciELO Brasil, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

ECK, N. J. V.; WALTMAN, L. Vosviewer manual. *Leiden: Univeriteit Leiden*, v. 1, n. 1, p. 1–53, 2013. Citado na página 44.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis*, 2020. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-489/Analise\\_de\\_Conjuntura\\_Ano\\_2019.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-489/Analise_de_Conjuntura_Ano_2019.pdf)>. Citado na página 35.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional*, 2020. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf)>. Citado na página 35.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis*, 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-615/NT-EPE-DPG-SDB-2021-03\\_Analise\\_de\\_Conjuntura\\_dos\\_Biocombustiveis\\_ano\\_2020.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-615/NT-EPE-DPG-SDB-2021-03_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_ano_2020.pdf)>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 35 e 59.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica*, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/resenha-mensal-do-mercado-de-energia-eletrica>>. Citado na página 60.

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. ISSN 1754-6834. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-82>>. Citado na página 40.

Ferraz Júnior, A. D. N. et al. Thermophilic anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse. *Renewable Energy*, v. 89, p. 245–252, 2016. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115304808>>. Citado na página 39.

FERREIRA, M. et al. Quimiometria i: calibração multivariada, um tutorial. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 22, p. 724–731, 1999. Citado na página 57.

FUESS, L. T.; GARCIA, M. L.; ZAIAT, M. Seasonal characterization of sugarcane vinasse: Assessing environmental impacts from fertirrigation and the bioenergy recovery potential through biodigestion. *Science of The Total Environment*, v. 634, p. 29–40, 2018. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718310866>>. Citado na página 23.

FUESS, L. T. et al. Diversifying the technological strategies for recovering bioenergy from the two-phase anaerobic digestion of sugarcane vinasse: An integrated techno-economic and environmental approach. *Renewable Energy*, v. 122, p. 674–687, 2018. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118301393>>. Citado na página 39.

HOARAU, J. et al. Sugarcane vinasse processing: Toward a status shift from waste to valuable resource. a review. *Journal of Water Process Engineering*, v. 24, p. 11–25, 2018. ISSN 2214-7144. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714418300163>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 26 e 29.

JANKE, L. et al. Biomethane production integrated to the brazilian sugarcane industry: The case study of são paulo state. In: *Proceedings of the 22nd European Biomass Conference and Exhibition, Hamburg, Germany*. [S.l.: s.n.], 2014. v. 2326, p. 2326. Citado na página 41.

JÚNIOR, L. d. O. Análise dos efeitos da injeção de água na performance e característica de emissões em motores diesel de injeção direta utilizando misturas diesel-biodiesel. 2013. Citado na página 50.

KARLSSON, T. et al. *Manual Básico de Biogás*. [s.n.], 2014. 69 p. Disponível em: <[https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf\\_71.pdf](https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf)>. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 56.

LAZARO, C. Z.; VARESCHE, M. B. A.; SILVA, E. L. Sequential fermentative and phototrophic system for hydrogen production: An approach for brazilian alcohol distillery wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 31, p. 9642–9655, 2015. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915014573>>. Citado na página 27.

LINSTORM, P. Nist chemistry webbook, nist standard reference database number 69. *J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph*, v. 9, p. 1–1951, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 53, 76 e 77.

- LORA, E. E. S. Venturini, osvaldo josé. *Biocombustíveis*, Editora Interciência: Rio de Janeiro, 2012. Citado na página 59.
- MAINIER, F. B.; VIOLA, E. D. M. O sulfeto de hidrogênio (h<sub>2</sub>s) e o meio ambiente. 2005. Citado na página 36.
- MITRA, D. et al. Value-added oil and animal feed production from corn-ethanol stillage using the oleaginous fungus *mucor circinelloides*. *Bioresource Technology*, v. 107, p. 368–375, 2012. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411017779>>. Citado na página 27.
- 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*, Elsevier, v. 44, p. 888–903, 2015. Citado na página 35.
- NASR, N. et al. Comparative assessment of single-stage and two-stage anaerobic digestion for the treatment of thin stillage. *Bioresource Technology*, v. 111, p. 122–126, 2012. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412002477>>. Citado na página 40.
- NAVARRO, A.; del C. Sepúlveda, M.; RUBIO, M. Bio-concentration of vinasse from the alcoholic fermentation of sugar cane molasses. *Waste Management*, v. 20, n. 7, p. 581–585, 2000. ISSN 0956-053X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X0000026X>>. Citado na página 29.
- NOGUEIRA, C. E. C. et al. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 48, p. 300–305, aug 2015. ISSN 13640321. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.023https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115002932>>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 39.
- OECD. *Bioheat, Biopower and Biogas*. [s.n.], 2010. 57 p. Disponível em: <<https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264085862-en>>. Citado na página 30.
- ORRICO, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS, J. d. Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. *Engenharia Agrícola*, scielo, v. 31, p. 399 – 410, 04 2011. ISSN 0100-6916. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162011000200020&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162011000200020&nrm=iso)>. Citado na página 37.
- PAIXÃO, M. V. F. da et al. Biogás como fonte energética. *Revista Pesquisa e Ação*, v. 4, n. 1, p. 129–145, 2018. Citado na página 59.
- PARSAEE, M.; KIANI, M.; KARIMI, K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*, Elsevier Ltd, v. 122, p. 117–125, mar 2019. ISSN 09619534. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953419300431>>. Citado 4 vezes nas páginas 26, 40, 41 e 60.
- PEREIRA, C. F. I. Construção, operação e caracterização química e energética do biogás produzido em biodigestor experimental. 2014. Citado na página 50.

- RAI, U. K.; MUTHUKRISHNAN, M.; GUHA, B. Tertiary treatment of distillery wastewater by nanofiltration. *Desalination*, v. 230, n. 1, p. 70–78, 2008. ISSN 0011-9164. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916408003032>>. Citado na página 29.
- ROHSTOFFE, F. N. Guia prático do biogás geração e utilização. *Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha*, 2010. Citado 6 vezes nas páginas 30, 31, 37, 38, 41 e 54.
- ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. Adubação - resíduos alternativos. *Agencia Embrapa de Informação Tecnológica*, 2020. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_39\\_711200516717.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html)>. Citado na página 26.
- SANTOS, I. F. S. dos et al. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 131, p. 54–63, 2018. ISSN 0921-3449. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917304433>>. Citado na página 39.
- SATYAWALI, Y.; BALAKRISHNAN, M. Removal of color from biometanated distillery spentwash by treatment with activated carbons. *Bioresource Technology*, v. 98, n. 14, p. 2629–2635, 2007. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852406004731>>. Citado na página 29.
- SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.-F.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, Elsevier Ltd, v. 129, p. 457–472, dec 2018. ISSN 09601481. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096014811830301X>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 34.
- SCHULTZ, E.; SOARES, I. Reforma do biogás: revisão. *Embrapa Agroenergia-Circular Técnica (INFOTECA-E)*, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2014., 2014. Citado na página 36.
- SOUZA, S. N. de; SANTOS, R. F.; FRACARO, G. P. Potential for the production of biogas in alcohol and sugar cane plants for use in urban buses in the brazil. In: LINKÖPING UNIVERSITY ELECTRONIC PRESS. *World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden*. [S.l.], 2011. p. 418–424. Citado na página 35.
- THEUERL, S.; KLANG, J.; PROCHNOW, A. Process disturbances in agricultural biogas production—causes, mechanisms and effects on the biogas microbiome: A review. *Energies*, v. 12, n. 3, 2019. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/3/365>>. Citado na página 38.
- THOMPSON, R. S. Hydrogen production by anaerobic fermentation using agricultural and food processing wastes utilizing a two-stage digestion system. *All Graduate Theses and Dissertations*, p. 208, 2008. Citado na página 40.

TIŠMA, M. et al. Corn silage fungal-based solid-state pretreatment for enhanced biogas production in anaerobic co-digestion with cow manure. *Bioresource Technology*, v. 253, p. 220–226, 2018. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852418300440>>. Citado na página 37.

VIEIRA, S. M. M. *Metodos analiticos para acompanhamento da biodigestao*. [S.l.]: CETESB, 1981. Citado na página 39.

WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K. J.; OWENS, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, v. 19, n. 2, p. 63–102, 2000. ISSN 0961-9534. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953400000179>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.

YU, Q. et al. A review of crop straw pretreatment methods for biogas production by anaerobic digestion in china. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 107, p. 51–58, 2019. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119301133>>. Citado na página 37.





# Apêndices

# APÊNDICE A – Espectros da Produção de Etanol 1G

Espectros referente ao bagaço da cana de açúcar, ao caldo de cana após a fermentação e ao etanol 1G produzido neste trabalho.

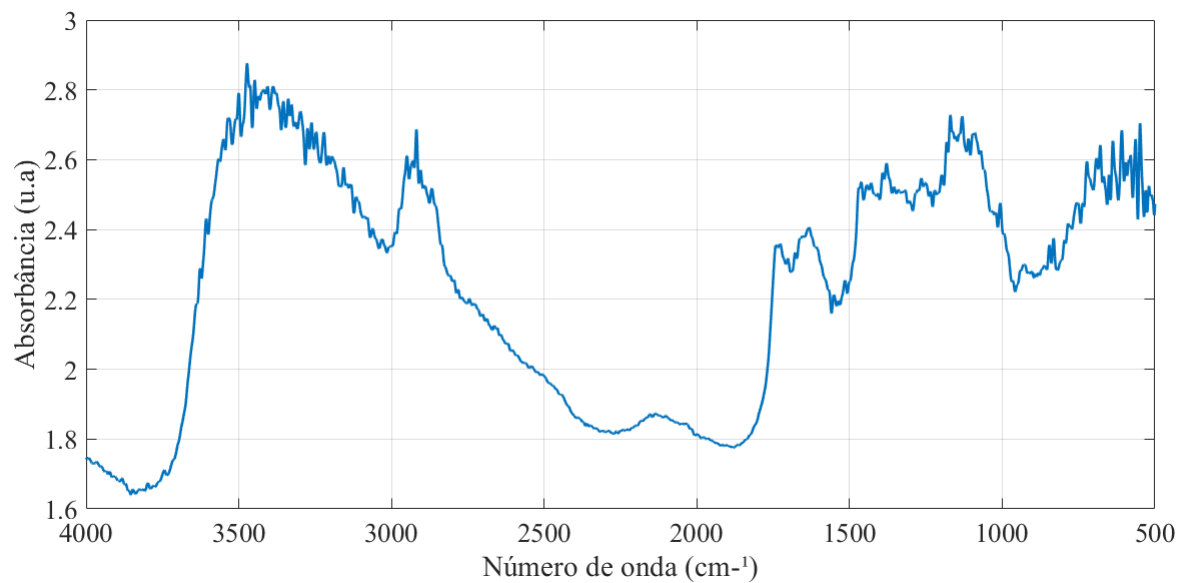


Figura 27 – Espectro do bagaço da cana de açúcar.

Fonte: Autoria Própria.

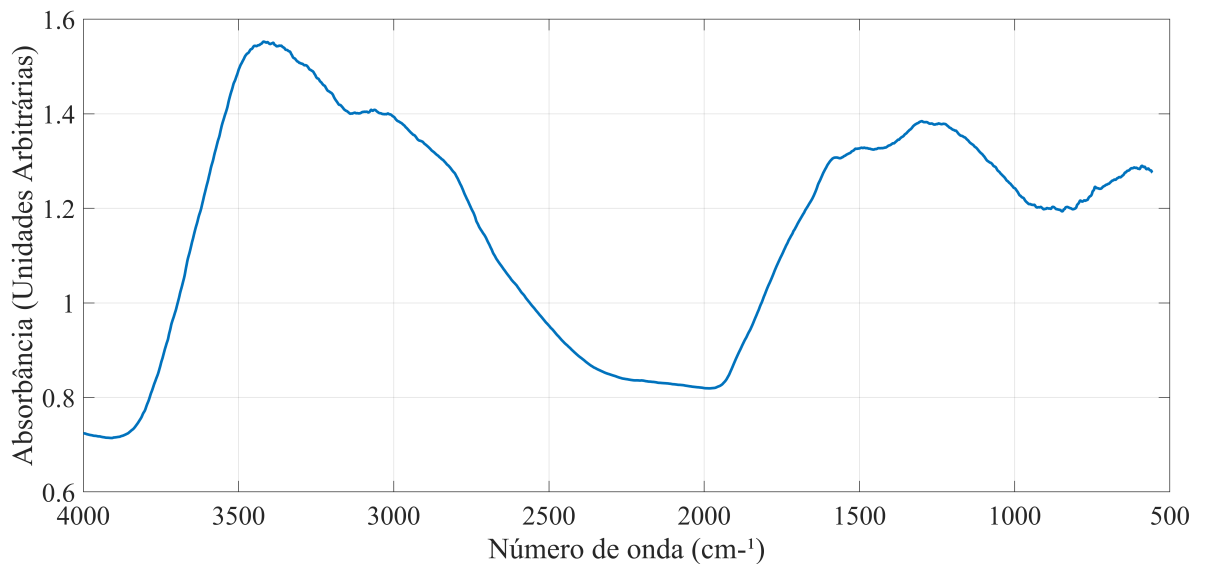


Figura 28 – Espectro padrão do caldo de cana fermentado.

Fonte: Autoria Própria.

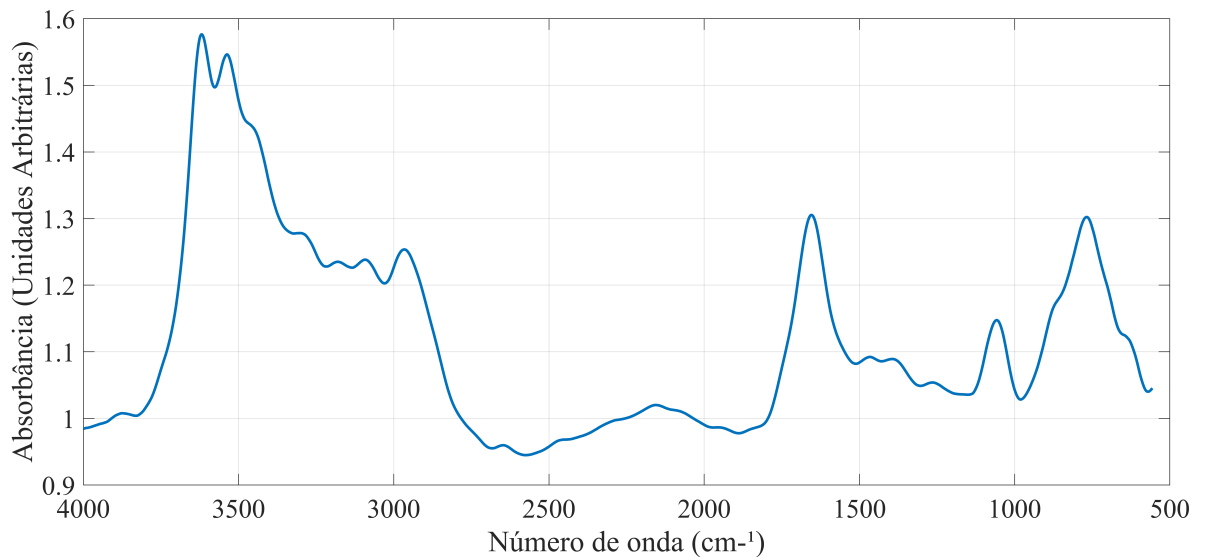


Figura 29 – Espectro do Etanol 1G produzido.

Fonte: Autoria Própria.



# Anexos

# ANEXO A – Espectros IR Padrão

Espectro padrão do Metano, Sulfeto de hidrogênio e da Amônia encontrado na literatura ([LINSTORM, 1998](#)).

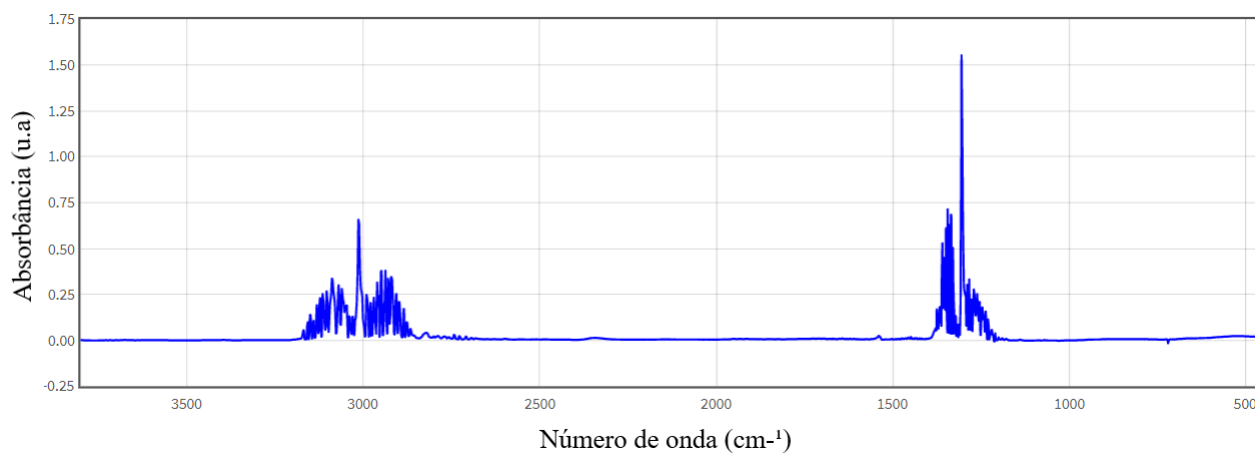


Figura 30 – Espectro padrão do Metano.

Fonte: Adaptação de ([LINSTORM, 1998](#)).

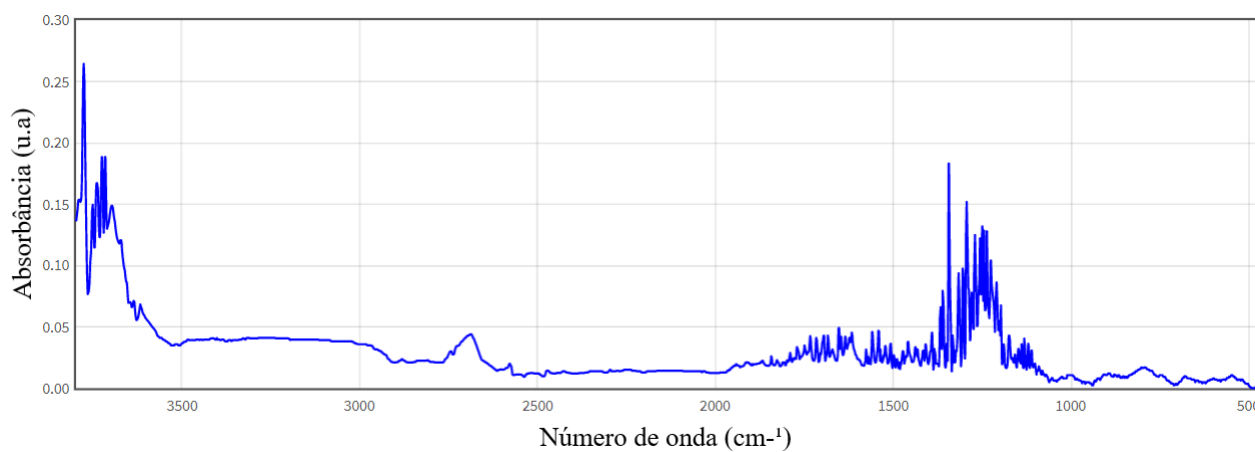


Figura 31 – Espectro padrão do Sulfeto de Hidrogênio.

Fonte: Adaptação de ([LINSTORM, 1998](#)).

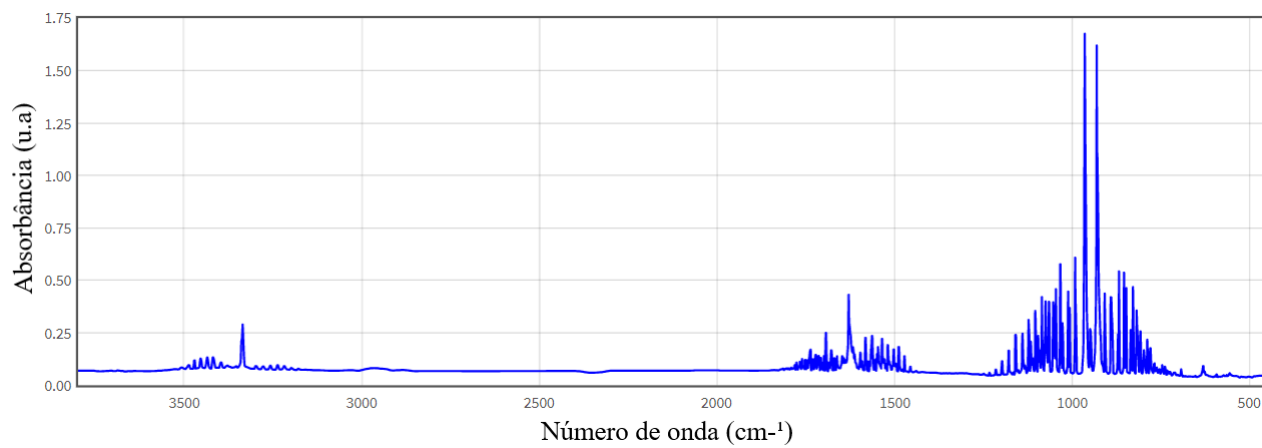


Figura 32 – Espectro padrão da Amônia.  
Fonte: Adaptação de (LINSTORM, 1998).