



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Trabalho de Licenciatura em Engenharia do Ambiente

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS A
PARTIR DO EFLUENTE DO MELAÇO GERADO NA
PRODUÇÃO DO ETANOL- “VINHAÇA”**

Autor

Macuacua, Orlando Samuel

Supervisor:

Prof. Dr. António José Cumbane Eng.º

Maputo, Outubro de 2023

Discente:

Orlando Samuel Macuacua

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS A
PARTIR DO EFLUENTE DO MELAÇO GERADO NA PRODUÇÃO
DO ETANOL-“VINHAÇA”**

Trabalho de Licenciatura apresentado à Faculdade de Engenharia da UEM, como requisito básico para a conclusão do Curso de Engenharia do Ambiente.

Supervisor:

Prof. Dr. António José Cumbane Eng.º

Chefe do departamento

Prof. Dr. Clemêncio Nhantumbo, Eng.º

Maputo, Outubro de 2023



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante _____

entregou no dia ____/____/20____ as ____ cópias do relatório do seu Trabalho de
Licenciatura com referência: _____ Intitulado

Maputo, _____ de _____ 20 _____

A chefe da Secretaria

Declaração de Honra

Eu, Orlando Samuel Macuacua, declaro por minha honra que o presente Trabalho de Licenciatura com o tema “***Avaliação do Potencial de produção do Biogás a partir do efluente do melaço gerado na produção do etanol-(Vinhaça)***” é integralmente da minha autoria e fruto da minha pesquisa, as experiências realizadas, as análises e interpretação dos resultados foram por mim efectuadas, onde foram colocadas todas as referências bibliográficas e fontes por mim utilizadas para a realização do trabalho. Declaro também que nunca foi submetido nesta e em outras instituições do ensino superior para obtenção de qualquer grau académico ou qualquer fim que seja.

Maputo, Outubro de 2023

O autor

(Orlando Samuel Macuacua)

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha falecida mãe Constância Luciano Manhisse, e à toda minha família, em especial aos meus pais Samuel Albino Macuacua e a mãe Helena Alberto Chilaúle, pela paciência, força, amor e dedicação que me deram até que eu consiga engrenar nessa instituição, por terem me agregado o valor, ensinamentos e nunca me perder para que eu tenha um futuro melhor. Diante das adversidades e dificuldades da vida sempre se preocuparam e reconheceram o valor da educação.

À minha parceira Odete Almirante Manguele que desde acreditou em mim e incentivou-me a seguir com os estudos.

Dedico também aos meus tios Orlando Macuacua, Sonia Macuacua, e meus irmãos Claudio Macuacua, Ernesto Mabui, Fernando Macuacua.

Agradecimentos

Desde o princípio fui ensinado a colocar Deus como elemento primordial em todas as circunstâncias da vida, neste caso o meu grande agradecimento vai para ele pelo dom da vida, sabedoria, e pela oportunidade de realizar essa pesquisa, pelas pessoas que colocou em nosso caminho que certamente nos ajudaram durante o processo.

Agradeço aos meus pais pelos ensinamentos éticos e princípios morais que me ajudaram a me integrar genuinamente na sociedade.

Agradeço a todos os professores do curso de Engenharia do Ambiente da Faculdade de Engenharia que contribuem com seu gracioso saber que usam durante transmissão do conhecimento, e também pelos ensinamentos de grande valor que estão a transmitir nesse processo de formação acadêmica, em especial ao meu supervisor Prof. António José Cumbane, pela simpatia, incentivo, orientações, e pela confiança depositada em mim para a realização deste trabalho. Sou grato a doutora Nazira Ornília de Jesus técnica do laboratório pela assistência e acolhimento durante a realização das experiências laboratoriais no Departamento da Engenharia Química-FEUEM.

Fora do fórum acadêmico, agradeço aos meus amigos e irmãos, Cláudio Macuacua, Ernesto Mabui, Renaldo Baptista, Bento Vilanculos, e aos meus familiares, Sónia Macuacua, Orlando Macuacua (The Best), pela força, apoio moral e financeiro, pelo acompanhamento nos momentos difíceis dando palavra amigável, corajosa na hora certa e no momento certo. Sem me esquecer das minhas grandes duas amigas a Lúcia Mutongue e Aguiresse Chave, pelo apoio dado, patrocínio na impressão desse trabalho e apoio moral.

À minha parceira, Odete Manguete, que me deu forças e acreditou no meu potencial durante todo o meu percurso estudantil, pelo apoio moral, cívico, psíquico e pela sua confiança depositada.

O meu agradecimento é extensivo e abrangente à todos colegas e amigos do ano 2019 do curso de Engenharia do Ambiente, em especial aos colegas, Danio Nhangal, Zubaida Esperança, Dinho Fernando, Emerson da Silva, Neidy Mucauque, Eive Nhone, Milene Charifo, Jemima Guambe, pelos momentos passados em *“La Família”* e pelos esforços nos grupos de estudo até que seja possível concluir o curso com êxito.

Resumo

O sector industrial apresenta na sua cadeia produtiva, etapas do processo que, se não adequadamente gerenciadas podem desencadear no meio ambiente impactos negativos, principalmente associados ao solo e à água. A vinhaça, por exemplo é o principal efluente gerado do processo de destilação do etanol hidratado, estima-se que para cada litro de etanol produzido são gerados entre 10 a 13 litros de vinhaça. Assim, umas das formas de reduzir os impactos gerados, ela pode ser utilizada na produção de biogás, a partir da biodigestão anaeróbia. O presente trabalho teve como objectivo principal a avaliação de potencial da produção de biogás a partir da vinhaça, o estudo foi realizado com amostras de vinhaça e os reactores foram inoculados com dejectos líquidos de suínos. Antes do processo de biodigestão fez-se a caracterização das amostras da vinhaça e do inóculo, onde os resultados dos parâmetros (pH, ST, STF, SV, DQO) foram próximos ou semelhantes aos citados na literatura, mostrando que é possível obter uma produção de biogás.

A produção do biogás do reactor foi avaliada em termos de volume de gás produzido por dia em diferentes concentrações de substrato-inóculo e foi feita adição de reagentes inibidores em alguns reactores com objectivo de estudar os seus efeitos na produção. Os resultados obtidos demonstraram que a produção máxima diária produzida foi de 35 mL e volume acumulado máximo de 300 mL correspondente ao terceiro reactor com 95% vinhaça +5%inóculo sem inibidores.

Os efluentes gerados foram avaliados em termos de remoção de DQO, ST, STF e SV e variação do pH. Os resultados obtidos mostraram uma remoção média em 46,24% de DQO, 16,22% ST, 32,26% SV e uma variação média de 5,76 de pH para todos os 5 reactores analisados.

Palavras-chave: Vinhaça, biogás, biodigestão anaeróbica, reactores.

ÍNDICE

Conteúdo	Página
Dedicatória	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo	iii
Lista de Abreviaturas e Siglas	vi
Lista de Símbolos	vii
Lista de Esquemas	viii
Lista de Figuras	viii
Lista de Gráficos.....	ix
Lista de Tabelas	x
1. Introdução	1
1.1. Exposição do problema	2
1.2. Objectivos.....	4
1.2.1. Geral	4
1.2.2. Específicos.....	4
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Caracterização do sector energético nacional.....	5
2.2. Biogás	7
2.2.1. Composição e características do biogás	8
2.3. Produção de Etanol e geração da Vinhaça	9
2.3.1. Vinhaça	10
2.4. Digestão Anaeróbia	13
2.4.1. Etapas da digestão anaeróbia	13
2.4.2. Vantagens da Digestão Anaeróbica.....	16
2.4.3. Factores que influenciam na produção de biogás.....	17
2.5. Potencial Bioquímico de Metano	20

2.5.1. Métodos de medição do biogás.....	21
3. Metodologia	23
3.1. Colecta da Amostra	24
3.2. Inóculo.....	24
4. Materiais e Métodos.....	25
4.1. Métodos Experimentais	26
4.2. Construção dos biodigestores	27
5. Análise e discussão dos resultados	28
5.1. Caracterização da Vinhaça e Inóculo.....	28
5.2. Avaliação do Potencial de Produção do Biogás	41
5.3. Caracterização do efluente resultante da biodigestão.....	47
6. Conclusões e Recomendações	54
6.1. Conclusões.....	54
6.2. Recomendações.....	55
Referências Bibliográficas	56
ANEXOS.....	60

Lista de Abreviaturas e Siglas

AME	Actividade Metanogênica Específica
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
BDA	Biodigestão Anaeróbica
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
FER	Fontes de Energias Renováveis
HCB	Hidroelétrica de Cahora Bassa
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
PBM	Potencial Bioquímica de Metano
pH	Potencial Hidrogeniônico
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
SV	Sólidos Voláteis

Lista de Símbolos

CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
H ₂ O	Água
H ₂ S	Ácido Sulfídrico
L	Litros
mg	Miligramas
mL	Mililitros
NaOH	Hidróxido de Sódio
NH ₃	Amônia
°C	Graus Celsius
%	Porcentagem

Lista de Esquemas

Esquema 1. Processo de produção de Biogás, Filho (2018).....	7
Esquema 2. Fluxograma de processo de produção de etanol, adaptado de Lima (2016)	10
Esquema 3. Diagrama esquemático do processo de digestão anaeróbica, adaptado de Tunes (2017).	14
Esquema 4. Metodologia para medição da produção de biogás, adaptado de Brack (2021).	21
Esquema 5. Etapas da metodologia empregue para realização do trabalho.	23

Lista de Figuras

Figura 1. Produção de energia primária em Moçambique por Renováveis-ALER (2017).6	
Figura 2. Percentagem do fornecimento total de energia primária por fonte em 2014 por Renováveis-ALER (2017).	6
Figura 3. Determinação gráfica da taxa máxima de produção de metano, (Aquino <i>et al.</i> , 2007).	22
Figura 4. Simulação laboratorial para produção do biogás.	42

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Valores obtidos para Temperatura e pH na caracterização das amostras....	30
Gráfico 2. Valores das concentrações de DQO.....	31
Gráfico 3. Percentual dos sólidos nas três amostras.....	32
Gráfico 4. Valores das concentrações dos sólidos.	33
Gráfico 5. Valores das concentrações dos metais e nutrientes.	34
Gráfico 6. Curva de DBO da amostra da vinhaça sem adição de inibidores (1ª incubação)	35
Gráfico 7. Curva de DBO da amostra da vinhaça com adição de inibidores (1ª incubação)	36
Gráfico 8. Gráfico das Curvas de DBO da amostra da vinhaça com e sem adição de inibidores (1ª incubação).	37
Gráfico 9. Curva de DBO da amostra da vinhaça sem adição de inibidores (2ª incubação).	38
Gráfico 10. Curva de DBO da amostra da vinhaça com adição de 50% Conc.Inibidores (2ª incubação).	38
Gráfico 11. Curva de DBO da amostra da vinhaça com adição de 20% Conc.Inibidores sem sacarose (2ª incubação).	39
Gráfico 12. Curva da combinação das 3 curvas de DBO da amostra da vinhaça (2ª incubação).	40
Gráfico 13. Volume de biogás deslocado por dia em cada reactor.	44
Gráfico 14. Volume de biogás acumulado por dia em cada reactor.	46
Gráfico 15. Resultados da eficiência de remoção de DQO em cada reactor.....	49
Gráfico 16. Resultados do pH antes e depois da biodigestão anaeróbica.	50
Gráfico 17. Percentual dos sólidos antes e depois da biodigestão.....	51
Gráfico 18. Resultados da eficiência de remoção de concentração dos sólidos totais..	52
Gráfico 19. Resultados da eficiência de remoção da concentração de Sólidos voláteis.	53

Lista de Tabelas

Tabela 1. Composição e características do biogás. Adaptada de Lima (2016).....	8
Tabela 2. Principais características físico-químicas da vinhaça. Adaptada de (Guerreiro 2015; Junior 2013).....	12
Tabela 3. Métodos utilizados para a Caracterização físico-química da vinhaça, inóculo, e do efluente do biodigestato.....	26
Tabela 4. Resultados da caracterização da vinhaça e inóculo.....	28
Tabela 5. Resultados da Temperatura e pH.....	29
Tabela 6. Resultados obtidos das concentrações de DQO.	30
Tabela 7. Resultados Percentuais dos sólidos.....	31
Tabela 8. Resultados das concentrações dos sólidos.....	32

1. Introdução

O racionamento de energia é um dos reflexos da crise financeira que afecta diversos países, criando uma oportunidade para reorganizar o sistema energético usando como base a eficiência, a maior participação das fontes renováveis e a descentralização da produção de energia. Neste contexto, uma das alternativas para a crise energética actual seria a produção de energia por meio da cogeração em indústrias (Sousa E. A., 2017). A energia renovável tornou-se necessária para remover o carbono da economia global e mitigar as mudanças climáticas globais por meio da exploração da biomassa (Belhamidi, 2021).

A produção do biogás por meio de digestão anaeróbica tem se tornado uma tecnologia alternativa para o tratamento dos efluentes com vista a diminuir os impactos que podem surgir devido a sua elevada carga orgânica. A biodigestão aeróbica é uma actividade complexa e faseada em que os microrganismos trabalham em conjunto em condições anaeróbicas para transformar a matéria orgânica em dois produtos principais o dióxido de carbono e metano.

O biodigestor além de produzir gás que pode ser convertido em energia eléctrica produz também o biofertilizante. Além disso, reduz potencialmente a poluição do meio ambiente, diminui o mau cheiro e também moscas e parasitas (Frigo, 2015).

O digestato produzido nos processos de digestão anaeróbia, um material rico em nutrientes, é discutido pela óptica do uso agrícola como fertilizantes considerando-se o balanço de nutrientes. (Kunz, 2019).

Por sua vez a sua eficiência é afectada por uma série de factores que vão desde as condições ambientais e de operação do sistema, natureza do substrato, até as características do biodigestor (Bem, 2021).

A biodigestão anaeróbia além de melhorar as características da vinhaça, como redução do potencial de carga orgânica, redução de acidez, diminuição da temperatura e remoção de enxofre; ainda tem como produto principal o biogás.

O biogás gerado em processos anaeróbios é uma mistura de gases composta maioritariamente por metano e dióxido de carbono. A aplicação efectiva do tratamento anaeróbio visando à geração de energia depende directamente da eficiência de processos de limpeza do biogás, de forma a reduzir e/ou eliminar compostos

indesejáveis, cuja presença e concentração varia de acordo com o afluente tratado (Lins, 2015). De acordo com Soares (2017) sobre o entendimento dos fundamentos da digestão anaeróbia, afirma que a matéria orgânica sob condições restritas de oxigênio era decomposta em metano, dióxido de carbono, hidrogênio e uma variedade de ácidos orgânicos em pequenas ou grandes quantidades.

Face aos problemas socioambientais e econômicos resultantes do uso dos combustíveis fósseis, Moçambique vem implementando diversos projectos de inclusão das energias renováveis na matriz energética nacional. Uma alternativa promissora é o uso da bioenergia, com vista a explorar seu potencial para produção sustentável de energia (Fortes, 2020).

Neste contexto, o objectivo principal do presente estudo é avaliar o potencial de geração do biogás a partir da vinhaça derivada da produção de bioetanol em escala bancada a nível laboratorial e também fazer uma caracterização composicional detalhada da vinhaça proveniente da destilação do melaço.

1.1. Exposição do problema

A produção do etanol usando como matéria-prima o melaço gera um efluente que se não for bem tratado pode causar impactos significativos ao meio ambiente, isso por se tratar de um efluente rico em matéria orgânica.

A vinhaça é um subproduto da fabricação do álcool, procedente da fermentação do mel final (Pereira, 2014) define-a como um resíduo composto de 93% de água, 7% de sólidos, sendo que destes 74,85% são matéria orgânica e 25,15%, são correspondentes à fração mineral. A composição varia de acordo com o mosto (líquido passível de sofrer fermentação), que se transforma em vinho após o processo de fermentação. Esse vinho após o processo de destilação produzirá o álcool e seu resíduo será a vinhaça.

O controle ambiental é uma grande preocupação governamental e dos centros de pesquisa que estudam tecnologias adequadas para reverter a tendência à degradação, a fim de assegurar a não ocorrência de prejuízos irreparáveis e garantir a melhoria de qualidade de vida das gerações actuais e futuras. Portanto, nas últimas décadas, desenvolveram-se vários sistemas que se baseiam na aplicação da digestão anaeróbia

para a remoção do material orgânico em efluentes quer domésticos quer industriais, (Filho, 2018).

Os estudos sobre os impactos ambientais da disposição da vinhaça no solo e na água subterrânea apresentam as seguintes conclusões: (1) é grande o potencial poluente da vinhaça em corpos de água, pois possui acção redutora extremamente alta, exigindo grandes teores de oxigênio para decompor a matéria orgânica existente neste efluente, e assim desequilibrando o ecossistema aquático (Pereira, 2014); (2) a aplicação da vinhaça provoca um aumento na salinidade do solo, devido a presença do potássio, aumentando a condutividade eléctrica do meio em função da aplicação em doses crescentes da vinhaça (Bem, 2021); (3) a disposição de vinhaça e secagem posterior ao sol polui a água superficial, o ar e as águas subterrâneas; (4) aplicação da vinhaça em altas dosagens compromete a qualidade da cana para a produção de açúcar, poluição das águas subterrâneas e salinização do solo (Pereira, 2014).

A vinhaça possui alto potencial orgânico e elevada acidez, é necessário evitar que grandes quantidades de efluentes líquidos continuem a ser lançadas no meio ambiente sem devido tratamento, pois comprometem a qualidade de vida das populações rurais e urbanas e a sobrevivência da fauna e da flora das regiões vizinhas. Uma das primeiras alternativas viáveis a serem usadas na diminuição dessa forma de poluição é o reaproveitamento energético, isto é, além de causar danos ambientais significativos deve-se optar pela sustentabilidade e preservação, gerar energia a partir dos efluentes, como é o caso da vinhaça. Com a produção do biogás a partir da vinhaça diminuirá a capacidade poluidora dos solos e dos corpos hídricos. Outra possibilidade de remanejamento do efluente reside na sua utilização como biofertilizante, os efluentes gerados após a biodigestão podem ser usados na fertilização das lavouras, trazendo ganhos econômicos ao produtor rural, sem comprometer a qualidade do solo e do meio ambiente.

Para Gaspar (2013), o biodigestor apresenta-se como fonte alternativa de produção e geração de energia. Evidentemente, a quantidade de energia produzida é, em geral, muito menor que a das hidroeléctricas, devido, especialmente ao porte destas em relação ao número de biodigestores, mas em compensação os impactos ambientais e sociais aproximam-se do zero, a produção de energia é barata, e o aproveitamento dos resíduos animais evita que estes sejam lançados no meio ambiente, poluindo-o.

Tendo esses pressupostos houve a necessidade de criar mecanismos de diminuir a poluição dos solos e dos recursos hídricos, acredita-se que a geração do biogás a partir dos efluentes provenientes da produção do etanol, pode ser uma das alternativas que minimizará os efeitos negativos advindo do lançamento inadequado da vinhaça no meio ambiente.

1.2. Objectivos

1.2.1. Geral

- Avaliar o potencial de geração de biogás a partir da Vinhaça, efluente do melaço resultante da produção do etanol;

1.2.2. Específicos

- Caracterizar a vinhaça efluente gerado a partir da produção do etanol;
- Simular a produção de biogás por meio de uma experiência laboratorial a uma escala bancada a partir da vinhaça;
- Analisar o efeito de adição de reagentes inibidores na produção de biogás;
- Caracterizar o efluente (biofertilizante) gerado após processo de biodigestão anaeróbica;

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Caracterização do sector energético nacional

Face aos problemas socioambientais e económicos resultantes do uso dos combustíveis fósseis, Moçambique vem implementando diversos projectos de inclusão das Fontes de Energias Renováveis (FER) na matriz energética nacional. Uma alternativa promissora é o uso da bioenergia, com vista a explorar seu potencial para produção sustentável de energia (Fortes, 2020).

A produção de biocombustíveis no País iniciou-se em 2007, e pela dinâmica do sector, têm ocorrido mudanças nas estruturas produtivas, concorrendo para a substituição da matriz produtiva local, alterando as produções familiares, elevando as densidades técnicas e as formas de usos e aproveitamento da terra (Fortes, 2020). A demanda mundial por biocombustíveis deverá crescer a taxas elevadas, motivada pela conscientização da necessidade de deter o processo de aquecimento global, bem como pela preocupação de uma possível escassez de petróleo (Alves, 2016).

As FER desempenham um papel importante na matriz energética moçambicana. Uma parte substancial da procura de energia, cerca de 80% é satisfeita através da biomassa tradicional, usada para atender as necessidades energéticas domésticas, embora alguns empreendimentos comerciais e industriais também usam a biomassa para gerar calor, (Fortes, 2020).

Produção de Energia Primária

A Figura 1 representa a produção de energia primária em Moçambique de 1972 a 2014, onde um crescimento exponencial é verificado a partir de 1997.

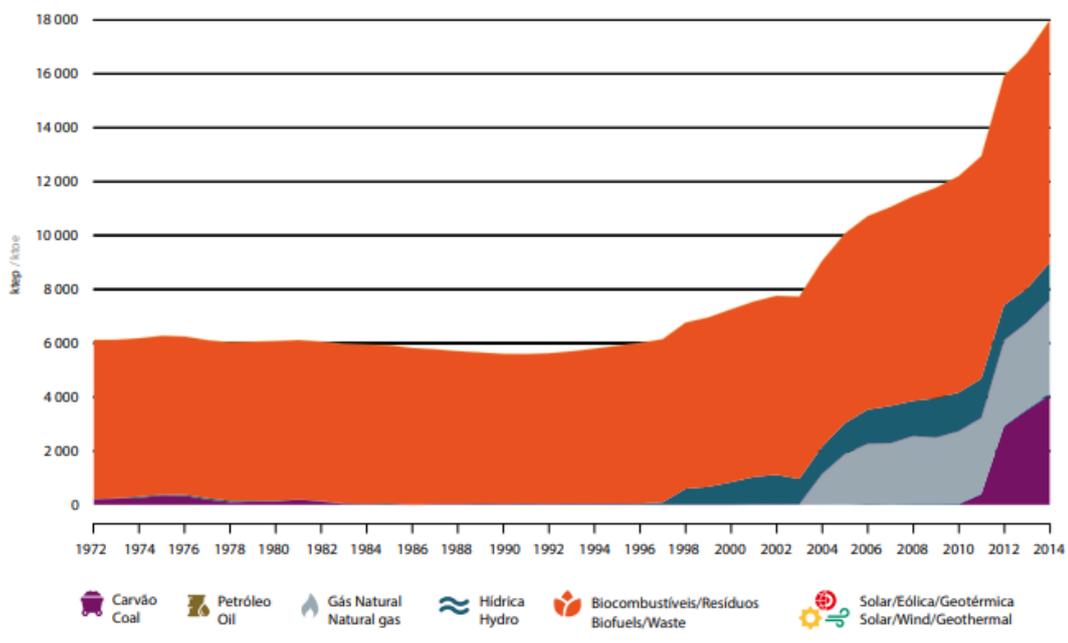


Figura 1. Produção de energia primária em Moçambique por Renováveis-ALER (2017).

Em termos de fontes de energia renovável a biomassa lenhosa (carvão vegetal e lenha) manteve-se consistentemente como a principal fonte de energia. A energia hídrica tornou-se expressiva a partir de 1997, ano em que a HCB voltou a entrar em funcionamento. (Renováveis-ALER, 2017).

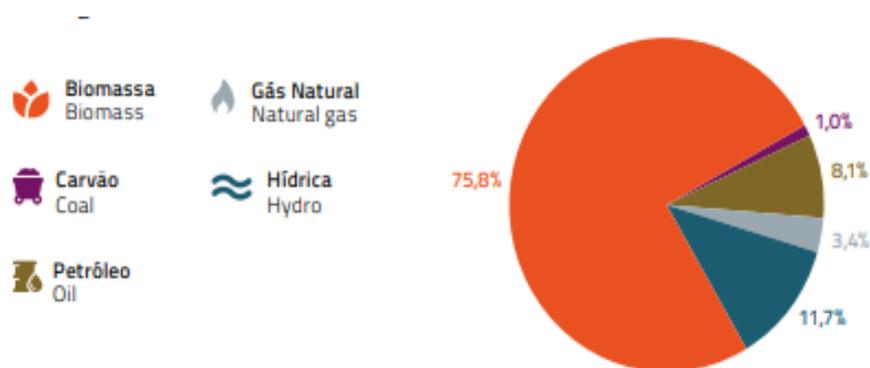


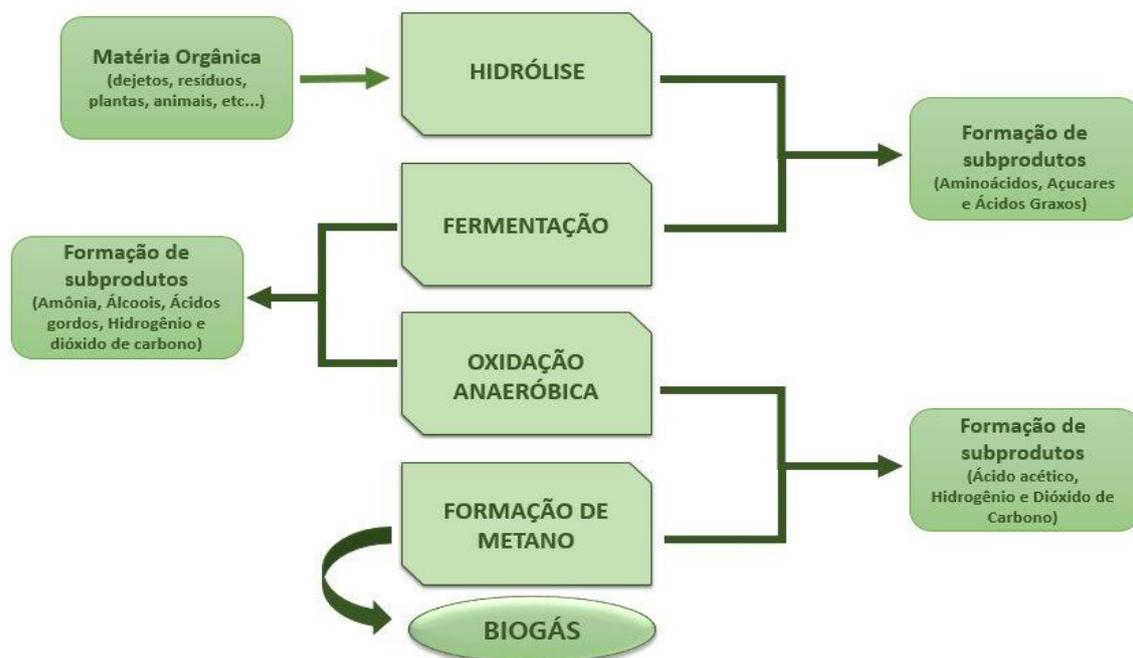
Figura 2. Percentagem do fornecimento total de energia primária por fonte em 2014 por Renováveis-ALER (2017).

2.2. Biogás

O biogás é o produto formado através da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos e pode ser considerado como uma fonte alternativa de energia, contribuindo na solução de problemas ambientais, pois reduz os impactos da fonte poluidora (Baldacin, 2015).

Um dos combustíveis que possui carácter renovável e de baixa geração de carbono é o biogás, que é originado do processo de BDA através de microrganismos (bactérias) degradadores de matéria orgânica.

Define-se como um gás energético, resgatado através do processo de BDA, com composição essencialmente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), e que pode ser produzido a partir de várias fontes de compostos orgânicos, como lixos urbanos e industriais, resíduos agrícolas e resíduos de animais (Santos R. C., 2020). O biogás é também um gás altamente inflamável, inodoro e incolor, e possui outras frações de gases em sua composição, como nitrogênio (N_2), ácido sulfídrico (H_2S), hidrogênio (H_2), amônia (NH_3), oxigênio (O_2) e monóxido de carbono (CO) (Colturato, 2015).



Esquema 1. Processo de produção de Biogás, Filho (2018).

O biogás além de ser uma fonte renovável e um subproduto da degradação de um resíduo; também pode apresentar vantagens como: benefícios socioambientais, uma vez que sua utilização evita o lançamento de metano na atmosfera, visto que seu potencial de poluição global é de 21 vezes maior que o de CO_2 ; possibilidade de venda de electricidade à rede, redução do consumo de combustíveis fósseis, que são os principais responsáveis pelo efeito estufa e como consequência pode trazer retorno financeiro (Baldacin, 2015).

Geralmente esse gás pode ser encontrado na natureza, em locais onde a matéria orgânica sofre decomposição como em pântanos (Bairro Chiango e Costa de Sol), lamas escuras, aterros sanitários (como a lixeira de Hulene), e estações de tratamento de esgoto (como na estação de tratamento de águas residuais de Infulene) na cidade de Maputo.

2.2.1. Composição e características do biogás

O biogás é uma mistura de gases gerados durante a degradação da matéria orgânica. Sua composição é variável, dependendo do tipo e concentração da matéria orgânica a ser digerida, das condições físico-químicas no interior do digestor (pH, alcalinidade, temperatura) e da presença de outros ânions, como o sulfato e o nitrato (Colturato, 2015).

Na Tabela 1 são listadas as médias das principais frações presentes no biogás, e esses valores geralmente são homogêneos e parecidos em todos os textos da literatura estudados.

Tabela 1. Composição e características do biogás. Adaptada de Lima (2016).

Elemento	Fração volumétrica (%) [1]
Metano	48 – 70
Dióxido de carbono	26 - 42
Nitrogênio	0 - 10
Hidrogênio	0 – 2
Ácido sulfídrico	0 – 1
Ácido sulfídrico	0 – 1
Amônia	0 – 1

[1] Valores médios das referências

Na composição do biogás os elementos em concentrações menores são bastante importantes, devido aos perigos que podem apresentar, sendo por vezes necessária à sua remoção (Bertoncini, 2018).

Apesar de vestigiais, estes compostos quando libertados na atmosfera têm efeitos nocivos como a depleção da camada de ozono, o aumento do efeito de estufa e a redução da qualidade do ar. Para os COV (compostos orgânicos voláteis) a sua concentração presente no biogás produzido nos aterros é bastante superior àquela que se encontra quando o biogás provém de digestores, (Crespo, 2013).

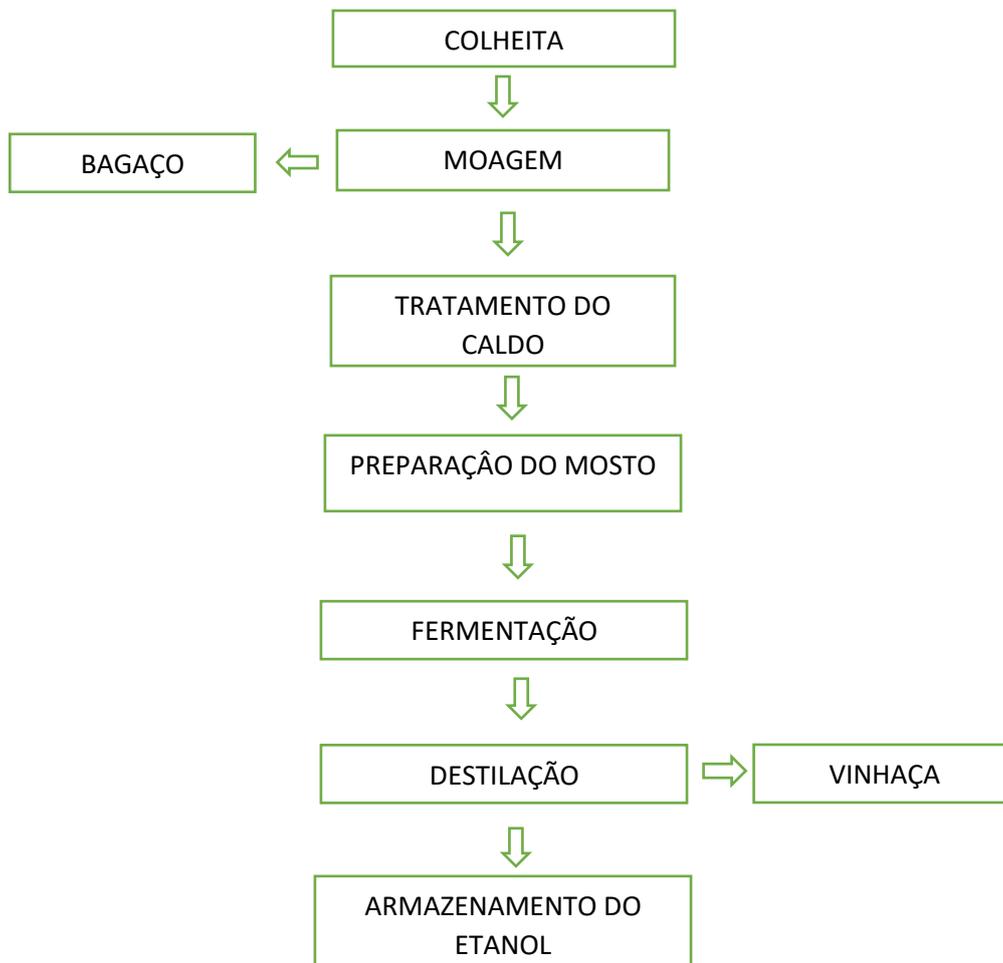
Além da mistura de gases, o biogás também apresenta água (humidade) em sua composição, em concentrações médias de 6% quando a uma temperatura de 40°C. Quando não removida do biogás, a água pode acumular nos dutos via processos de condensação, resultando em problemas de corrosão ou entupimento em caso de congelamento (Kunz, 2019).

2.3. Produção de Etanol e geração da Vinhaça

A vinhaça apresenta características de um efluente altamente poluente produzido em grande escala nas refinarias por meio da destilação e fermentação da cana-de-açúcar para a fabricação do etanol. Este resíduo é um composto de água, matéria orgânica e minerais, e, devido ao grande volume gerado, é de difícil transporte e armazenamento, e, em virtude destes problemas, têm ocorrido várias pesquisas neste assunto (Sousa R. d., 2018).

Qualquer tipo de líquido capaz de sofrer fermentação é denominado mosto (Esquema 2). No processo de produção do etanol três tipos de mostos podem ser utilizados: caldo de cana puro, melaço ou mistura de caldo de cana/melaço. Esses mostos sofrem fermentação por meio de leveduras, originando uma solução alcoólica denominada vinho, (Lima, 2016). A destilação dessa solução gera a vinhaça como subproduto. As propriedades físico-químicas da vinhaça irão depender do tipo de mosto utilizado no processo. Por exemplo, a vinhaça proveniente de mosto de caldo de cana puro apresenta-se mais diluída, se comparada à que é oriunda somente de mosto de melaço.

A matéria prima utilizada promove alterações nas propriedades físico-químicas da vinhaça. Além disso, outros factores como tipo e maturação da cana utilizada, método de fermentação adotado, levedura usada e técnica de destilação empregada, também influenciam na composição final da vinhaça (Veroneze, 2019).



Esquema 2. Fluxograma de processo de produção de etanol, adaptado de Lima (2016)

2.3.1. Vinhaça

De acordo com Frigo (2015) a vinhaça é um subproduto derivado da produção do etanol. Além de ser rica em nutrientes, possui potencial para geração de biogás devido ao seu alto teor de matéria orgânica.

Em certos casos o volume de vinhaça gerado é, quase sempre, utilizado na lavoura da cana de açúcar num processo chamado de fertirrigação, que mantém a fertilidade do solo após anos de cultivo, mineralizando a matéria orgânica, aumentando conteúdo de

cálcio, potássio, nitrogênio e fósforo e redução da utilização de fertilizantes químicos (Colturato, 2015).

Esta utilização da vinhaça é reconhecida como a solução para o problema do direcionamento desde subproduto, porém, o nitrogênio presente na composição química da vinhaça pode infiltrar no solo atingindo camadas profundas até o lençol freático, isto acontece quando numa única área é dosado uma quantidade superior a 400 m³ de vinhaça por hectare (Sousa E. A., 2017).

A vinhaça possui elevada carga orgânica e de nutrientes que podem ser utilizados na fertilização de solos agrícolas. Sua composição também é muito influenciada por adições feitas ao mosto para fermentação. São adicionados ao mosto, nutrientes, ácido fosfórico e proteínas, sendo esta última etapa chamada de sangramento (Sousa R. d., 2018). Isto influencia nas características qualitativas da vinhaça, diminuindo a quantidade de sólidos suspensos, representados por leveduras mortas contidas neste subproduto da produção de açúcar e álcool.

2.3.1.1. Características e composição químicas da vinhaça

A composição da vinhaça é muito variável, dependendo de vários factores, mas um deles apresenta significância garantida na composição final desse efluente e diz respeito a sua origem (Neto A. P., 2011). Quando se utiliza o caldo da cana para a fermentação, a vinhaça resultante possui menor concentração de nutrientes se comparado àquela oriunda de mosto de melaço e mosto misto. Portanto, a concentração desse efluente varia da fonte produtora para outra.

A vinhaça é caracterizada como efluente de destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante; o poder poluente, cerca de cem vezes maior que o do esgoto doméstico, decorre da sua riqueza em matéria orgânica, baixo pH, elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), além de elevada temperatura na saída dos destiladores; é considerada altamente nociva à fauna, flora, microfauna e microflora das águas doces, além de afugentar a fauna marinha que vem às costas para procriação, (Silva, 2006).

De acordo com Santos (2018) a vinhaça é obtida com temperaturas acima de 100°C e a hidrólise ocorre de maneira mais eficiente em faixas de 55 a 70°C para se trabalhar na faixa termofílica, portanto, é necessário um sistema de controle de temperatura, o que

faz a maior parte dos biodigestores trabalharem na faixa mesofílica. O pH do meio deve ser mantido entre 6 e 8, sendo a faixa de 7,0 e 7,2 considerada a melhor para o mantimento da vida das bactérias.

O constituinte principal da vinhaça é a matéria orgânica, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos e, em maior quantidade, por cátions como o potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), sendo que sua riqueza nutricional está ligada à origem do mosto (Silva, 2006).

A vinhaça é rica em nutrientes como potássio, fósforo, cálcio, amônia, alumínio, cloreto, ferro, magnésio, manganês, enxofre e elevado conteúdo de matéria orgânica, baixo pH (variando de 3,5 a 5,0) e temperatura elevada na saída dos destiladores (aproximadamente 80°C) (Baldacin, 2015).

Tabela 2. Principais características físico-químicas da vinhaça. Adaptada de (Guerreiro 2015; Junior 2013).

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Unidades
pH	3,5	4,9	4,15	--
Temperatura	65	111	89	°C
DBO₅	6.680	75.330	16.950	mg/L
DQO	9.200	97.400	28.450	mg/L
DBO₅/DQO	0,3	0,6	0,4	mg/L
Nitrogênio	90	885	357	mg/L
Total				
Fósforo total	18	188	60	mg/L
Potássio total	814	3852	2035	mg/L
Cálcio	71	1096	515	mg/L
Magnésio	97	456	226	mg/L
Ferro	2	200	25	mg/L
Sódio	8	220	52	mg/L
Cloreto	480	2300	1219	mg/L

Os efeitos da aplicação de vinhaça ao solo também foram estudados por Fuess (2016) constatando-se que a aplicação de vinhaça no solo em altas doses (> 250m³/ha) pode ser prejudicial ao crescimento das culturas e à fertilidade do solo. Já o seu uso em doses menores (125 m³/ha) promove e melhora na germinação e crescimento das culturas.

Segundo Neto A. (2011) a aplicação da vinhaça também resultou numa melhora na actividade enzimática e bacteriana dos solos. Porém, também foi constatado que sua alta carga orgânica tende a diminuir o seu potencial nutritivo, além disso, a contaminação de água superficial e subterrânea e a acumulação de sal nos solos podem gerar diversos problemas ambientais (Bertoncini, 2018).

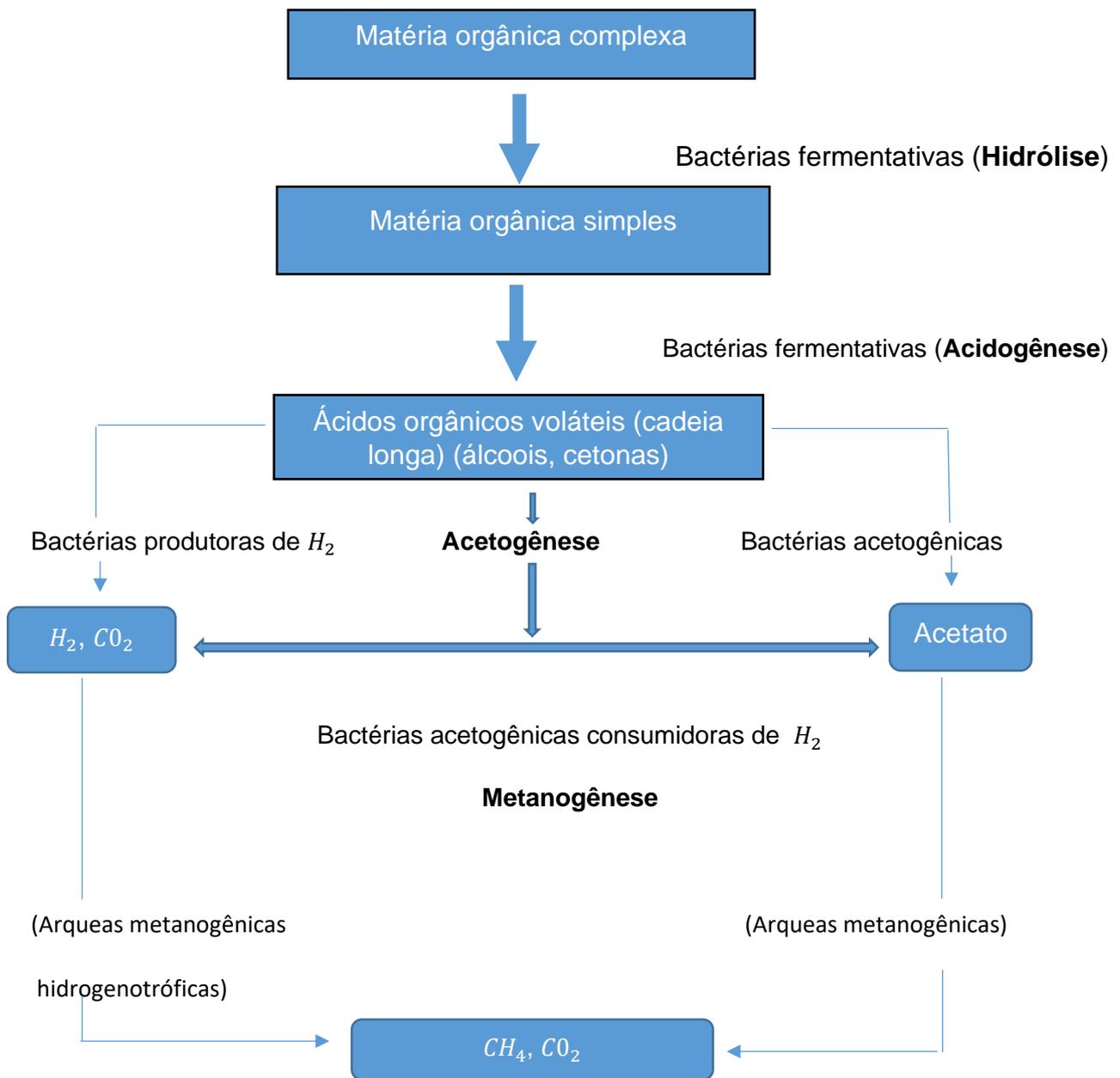
Devido ao seu alto teor de matéria orgânica e nutrientes, quando despejada em rios e lagos, a vinhaça pode provocar o fenômeno da eutrofização, além da depleção do oxigênio, prejudicando a vida aquática e impedindo o aproveitamento de mananciais contaminados para o abastecimento humano (Belhamidi, 2021).

2.4. Digestão Anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia consiste na acção de diferentes tipos de microrganismos que, na ausência de oxigênio, transformam compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídeos em produtos mais simples, como por exemplo, metano e dióxido de carbono (Silva, 2006). A digestão anaeróbia tem sido muito utilizada no tratamento de resíduos sólidos e líquidos, incluindo despejos de animais, lixo urbano e efluentes industriais, como por exemplo, a vinhaça (Victorino, 2017).

2.4.1. Etapas da digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia é constituído por várias etapas, como a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese, a metanogênese e dependendo do efluente a ser tratado e caso contenha compostos de enxofre, o processo de digestão anaeróbia pode conter também a fase de sulfetogênese (Baldacin, 2015).



Esquema 3. Diagrama esquemático do processo de digestão anaeróbica, adaptado de Tunes (2017).

Hidrólise

O primeiro passo da degradação anaeróbica consiste na hidrólise (Esquema 3) de compostos orgânicos complexos, tais como hidratos de carbono, proteínas e lípidos, que são transformados em compostos solúveis mais simples. Nesta etapa as proteínas são convertidas em aminoácidos; os polissacáridos em monossacáridos; os lípidos em ácidos gordos e os ácidos nucleicos em purinas e pirimidinas. Todo este processo é

realizado por bactérias hidrolíticas (Crespo, 2013). Ocorre a liberação, pelas bactérias, no meio anaeróbico, de enzimas extracelulares, que causam a hidrólise das partículas orgânicas, transformando as moléculas em moléculas menores e solúveis ao meio (Gomes, 2020).

Hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros) em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores), os quais podem atravessar as paredes celulares dos microrganismos fermentativos (Costa, 2013). Esta conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos é conseguida através da acção de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas (Belhamidi, 2021).

Acidogênese

Na segunda fase, as bactérias acidogênicas, também conhecidas como formadoras de ácidos, convertem os produtos gerados na hidrólise em substâncias orgânicas simples como ácidos graxos voláteis (AGV), ácido acético, fórmico, propiónico, butírico e láctico, além do etanol e compostos minerais tais como, CO_2 , H_2O , NH_3 , H_2S , (Tunes, 2017).

Em geral, a população fermentativa é estritamente anaeróbia e representa cerca de 90% da população bacteriana total dos digestores. Entretanto, algumas espécies são facultativas e podem metabolizar o material orgânico por via oxidativa. Isso adquire suma importância para o referido processo, uma vez que o oxidante presente de forma eventual poderia se tornar uma substância tóxica para as arqueas metanogênicas se não fosse removido pelas acidogênicas facultativas (Belhamidi, 2021).

Os principais gêneros de bactérias fermentativas acidogênicas são: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Escherichia*, *Desulfobacter* e *Micrococcus* (Tunes, 2017).

Acetogênese

É nesta fase que ocorre a conversão dos produtos gerados na acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção de metano (Júnior, 2022). A função dos microrganismos nessa fase é degradar os ácidos graxos e álcoois dando origem ao acetato, H_2 e CO_2 . A reação de acetogênese é mostrada abaixo.

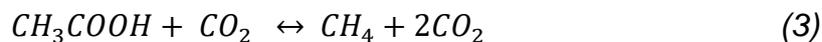
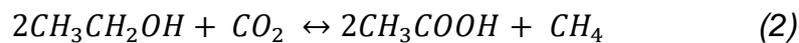


As bactérias acetogênicas responsáveis por essa fase são: *Syntrophobacter wolinii* e *Syntrophomonas wolfei*. Outras bactérias são: *Clostridium* spp., *Peptococcus anerebus*, *Lactobacillus* e *Actinomyces* (Tunes, 2017).

Metanogênese

Nesta etapa, o acetato, o hidrogênio e o dióxido de carbono são convertidos em gás metano e dióxido de carbono, através da ação de micro-organismos metanogênicos, que também são classificados como arqueas metanogênicas, responsáveis pela fase limitante do processo (Pereyra, 2019).

O metano pode ser produzido pelas arqueas acetotróficas a partir da redução do ácido acético (CH_3COOH) ou pelas hidrogenotróficas, que utilizam o dióxido de carbono (CO_2) e o hidrogênio (H_2) para produzir metano (Sagura, 2012). Cerca de 70% do metano produzido é proveniente da redução de acetato, enquanto que aproximadamente 30% provêm da redução de CO_2 com H_2 . As reações metanogênicas podem ser escritas como (Tunes, 2017).



2.4.2. Vantagens da Digestão Anaeróbica

Muitos dos impactos negativos oriundos dos resíduos orgânicos são causados pela matéria orgânica presente no mesmo, tais como doenças infecciosas, vermes, poluição da água, mau cheiro e emissão de gases do efeito estufa (Cordeiro, 2018). Considerando que a matéria orgânica representa aproximadamente 50% em peso do total de resíduos e observando uma tendência actual de busca por alternativas tecnológicas que possibilitem a recuperação da matéria e energia dos resíduos, é possível notar como a digestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU tem assumido crescente visibilidade, por associar uma eficiente gestão do RSU a uma série de vantagens como (Sagura, 2012) :

- Redução de emissões de gases efeito estufa, possibilitando a comercialização de Receitas Certificadas de Emissões por meio de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL);
- Geração de biogás, com variadas formas de utilização, como geração de energia térmica e eléctrica, além de uso como combustível veicular;
- Geração de biofertilizante rico em nutrientes apropriado para recuperação de solos degradados;
- Geração de emprego e renda;
- Maior recuperação de recicláveis uma vez que a triagem é necessária para que o processo ocorra com alta eficiência.

2.4.3. Factores que influenciam na produção de biogás

A digestão anaeróbia da matéria orgânica é um processo complexo que envolve uma série de etapas de degradação. Os microrganismos que participam do processo são específicos para cada etapa e, portanto, possuem diferentes requisitos e condições ambientais para seu desenvolvimento, tais como: temperatura, pH, DQO, agitação, substrato e Tempo de Retenção Hidráulica (Veroneze, 2019).

Temperatura

A temperatura é um factor determinante para o desenvolvimento de microrganismos da biomassa, a melhor faixa de temperatura é aquela que possibilita um rápido crescimento de microrganismos durante o menor período de tempo, cada grupo de bactérias cresce em determinadas faixas de temperatura, sendo classificadas em: psicrófilas, mesofílicas e termófilas (Comin, 2017).

Organismos psicrófilos apresentam ótimo desenvolvimento em temperaturas inferiores a 20°C, organismos mesófilos crescem em faixa de temperatura entre 20 a 45°C e, os organismos termófilos desenvolvem-se em temperaturas entre 45 a 70°C (Rodrigues, 2019).

Dois níveis de temperatura são considerados óptimos para a digestão anaeróbia e produção de metano, uma faixa mesófila (30 a 35°C) e outra termófila (50 a 55°C), porém a mais utilizada é a mesófila (Blasius, 2019).

pH

A acidez ou alcalinidade do meio é indicada por meio do pH, a alcalinidade indica a quantidade de carbono presente na solução, conforme as bactérias produzem ácidos, diminuindo o pH, o carbonato reage com os ácidos, controlando a acidez do meio (Moreira, 2021).

O pH depende do tipo dos microrganismos envolvidos no processo de digestão e do tipo do substrato, entretanto, o pH no processo de digestão anaeróbia deve estar situado na faixa de 6,3 a 7,8, faixa na qual observa-se a maior eficiência da fase metanogênica (Junior, 2013), pois é preferencialmente em ambiente neutro que as bactérias metanogênicas desenvolvem-se, podendo ocorrer sua inibição fora desse intervalo (Rocha, 2017).

Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A DQO é um parâmetro importante a ser monitorado durante a digestão anaeróbia, pois indica a estabilização da matéria orgânica.

Conhecendo-se os valores de DQO iniciais do resíduo adicionado no biodigestor e a concentração de DQO após tratamento, é possível conhecer a eficiência de remoção da matéria orgânica, quanto maior sua eficiência de remoção, maior será a degradação do resíduo (Bruinsma, 2015).

Agitação

A agitação promove a mistura do líquido e da biomassa dentro do reactor, aumentando a velocidade de degradação da matéria orgânica, a forma e a intensidade da agitação são importantes principalmente durante a etapa de reação, podendo ser realizada de diferentes formas entre essas: reciclo do gás produzido, recirculação da fase líquida e agitação mecânica (Gomes, 2020).

A agitação também evita que o material se acumule no fundo do biodigestor e reduz o risco de formação de espuma. Além disso, facilita a transferência de hidrogênio a partir de metano e permite que os microrganismos realizem oxidação anaeróbia (Eckert, 2015).

Substrato

A digestão anaeróbia é fortemente afectada pelo tipo, disponibilidade e complexidade do substrato. Diferentes tipos de substrato orgânicos suportam e se adequam a distintos grupos de microrganismos, sendo necessário proceder com sua caracterização para saber os teores de carboidratos, proteínas, lipídios e fibras, antes da partida do experimento (Belhamidi, 2021). Existem também alguns elementos que até determinada concentração funcionam como estimulantes, mas em concentrações elevadas podem tornar-se inibitórios ou mesmo tóxicos, facto que reforça a importância em se trabalhar com substratos equilibrados em relação aos nutrientes (Bem, 2021). A biodegradabilidade do substrato orgânico está relacionada com sua composição, tornando-se essencial descobrir exactamente quais as características da matéria orgânica a ser digerida, a fim de tornar o processo de digestão anaeróbia mais previsível e eficiente em resultados. Além disso, o substrato também deve ser caracterizado pela quantidade de metano que pode ser produzida potencialmente em condições anaeróbias (Comin, 2017).

Tempo de Retenção Hidráulica

O TRH indica o tempo em que a fração líquida dos resíduos permanece no reactor em contacto com a biomassa. O factor mais importante no dimensionamento do digester anaeróbio é o tempo que as bactérias necessitam para se reproduzir e metabolizar os sólidos voláteis (Fuess, 2016). Segundo Barcelos (2019) resíduos contendo compostos simples como o açúcar (facilmente degradável) requerem baixos TRH, enquanto que resíduos complexos como os compostos orgânicos clorados, são lentamente degradáveis e precisam de mais tempo para seu metabolismo.

Nutrientes

Nitrogênio, fósforo e enxofre são os nutrientes contidos nas células dos microrganismos anaeróbios nas quantidades próximas de 12, 2 e 1%, respectivamente, de toda matéria seca (Alves, 2016). Além disso, são essenciais para a digestão anaeróbia as relações de 700:5:1 correspondentes à demanda biológica de oxigênio, nitrogênio e fósforo. (Bertoncini, 2018)

Para um óptimo desempenho do processo anaeróbio são fundamentais os íons de enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato. Já para auxiliar no crescimento das

células dos microrganismos anaeróbios são relevantes elementos com baixa concentração como ferro, cobre, zinco, magnésio (Sales, 2022).

Inibidores

De acordo com Coulturato (2015), com relação à toxicidade, os organismos anaeróbicos, particularmente os metanogénico, são bastante susceptíveis a uma grande variedade de componentes. Os microrganismos anaeróbios são inibidos por substâncias presentes no substrato, como amônia, metais pesados, compostos halogenados e cianeto, e pelos subprodutos metabólicos de microrganismos, como amônia, sulfeto, e os ácidos graxos voláteis (Belhamidi, 2021).

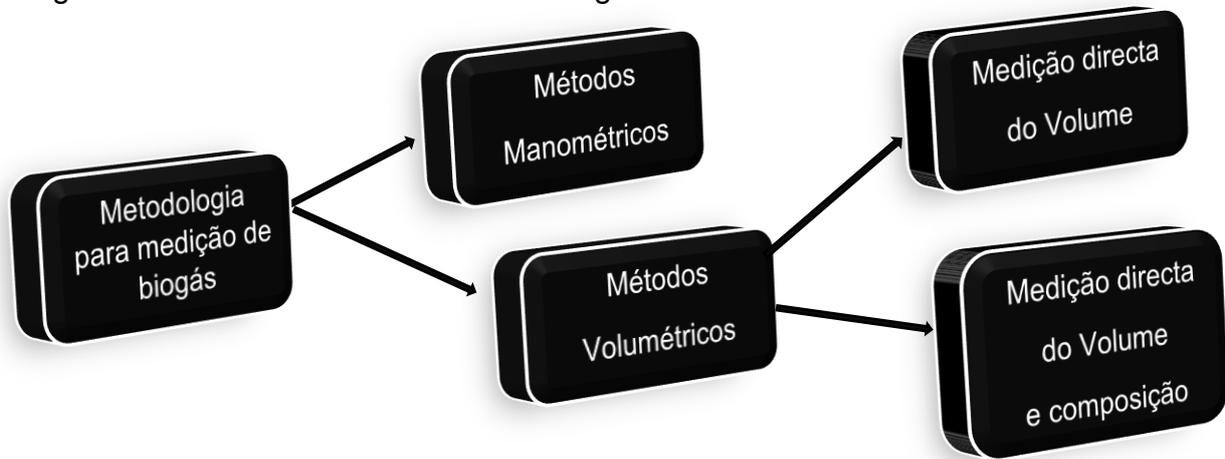
2.5. Potencial Bioquímico de Metano

O ensaio de PBM pode ser influenciado por diversos factores relacionados com o inóculo, substrato, método utilizado na quantificação do biogás, parâmetros operacionais (temperatura, fração inóculo-substrato, tempo de ensaio, etc) (Alves, 2016). Entretanto este processo pode demorar de 20 a mais de 100 dias, o que não é favorável ao processo de tomada de decisão por parte das indústrias. Dada a esta limitação, modelos teóricos e algumas relações empíricas baseadas na composição química e bioquímica do substrato têm sido propostos (Blasius, 2019).

O Potencial Bioquímico de Metano (BMP – Biochemical Methane Potencial) é uma medida de biodegradabilidade de uma amostra (Bruinsma, 2015). O ensaio de Potencial Bioquímico de Metano, ou teste de biodegradabilidade anaeróbio, tem como finalidade avaliar a biodegradabilidade de resíduos mediante a produção total de metano realizada sob condições óptimas de degradação (Magalhães, 2018). Apesar de não ser internacionalmente normatizado (Guerreiro, 2015), tem se desenvolvido como um método analítico frequentemente utilizado na previsão do potencial de geração de biogás a partir de amostras de resíduos.

2.5.1. Métodos de medição do biogás

Diversos métodos de medição do biogás são empregues actualmente, sob diferentes condições e para distintas finalidades. As principais metodologias de quantificação do biogás dividem-se de acordo com o fluxograma abaixo.



Esquema 4. Metodologia para medição da produção de biogás, adaptado de Brack (2021).

2.5.1.1. Métodos Manométricos

Esta metodologia baseia a medição do biogás produzido através da variação de pressão exercida sobre um sensor (membrana transdutora de pressão) que fica acoplado ao frasco de reacção. O registo diário de pressão permite determinar a taxa diária de produção de biogás ou a parcela referente somente ao metano, dependendo a configuração do sistema de pressão. A grande vantagem deste método deve-se a possibilidade de automação do mesmo, através da acoplagem dos medidores de pressão aos microcomputadores, permitindo assim o monitoramento instantâneo. Enquanto que a maior desvantagem é devido ao alto custo de aquisição dos equipamentos (Sagura, 2012).

2.5.1.2. Método Volumétrico: Medição de Volume e Composição do Biogás

Os testes de Actividade Metanogênica Especifica em lodos anaeróbios, baseados nesta metodologia, iniciam-se com a inoculação do lodo, do substrato, e dos nutrientes em frascos reacionais submetidos a condições controladas de temperatura (Filho, 2018). O Nascimento (2019) diz que a finalização do ensaio normalmente se dá no momento da

estabilização da quantidade de metano gerada, desde que se possa garantir que a taxa máxima de produção já foi atingida.

O monitoramento da produção de biogás pode ser feito diariamente com o auxílio de uma seringa esmerilhada (que não ofereça resistência ao deslocamento) e a determinação da composição do biogás amostrado pode ser realizado por cromatografia gasosa (Ferreira, 2017). Neste caso, a produção diária de metano é calculada pela multiplicação da percentagem de metano no biogás e do volume de gás produzido.

Finalmente a AME pode ser determinada através de um gráfico “volume acumulado de metano” versus “tempo de incubação” onde o coeficiente angular da região de maior inclinação é valor da taxa máxima de produção de metano, como mostra a Figura 3 (Aquino, *et al.*,2007).

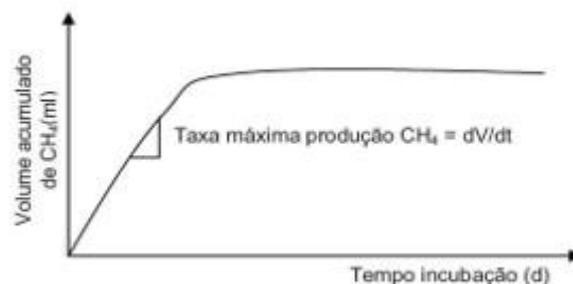


Figura 3. Determinação gráfica da taxa máxima de produção de metano, (Aquino *et al.*, 2007).

Diariamente são realizadas medidas de volume de gases produzidos através da metodologia de deslocamento de líquido. Os reactores são todos hermeticamente vedados, o que proporciona o aumento de pressão dentro dos frascos devido à produção dos gases (Costa, 2014).

A determinação do potencial de geração de metano consiste em um método biológico sujeito a grandes variações, pois os inóculos utilizados não são padronizados e os resíduos têm composição heterogênea, denotando a necessidade da existência de procedimentos que permitam repetibilidade e reprodutibilidade dos experimentos (Aquino *et al.*, 2007).

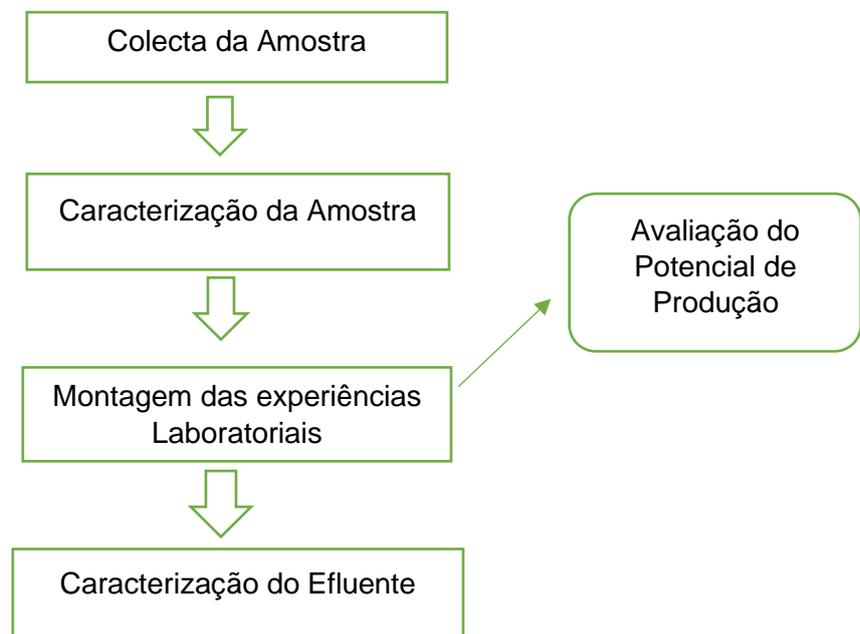
3. Metodologia

O presente estudo tem como base para a sua realização uma metodologia mista, isto é, uma abordagem qualitativa e quantitativa.

A abordagem qualitativa teve foco em pesquisas bibliográficas feita em teses e artigos científicos que relatam sobre o tema de produção do biogás a partir da vinhaça, efluente resultante da produção do etanol. Nele foram abordados conceitos ligados às características físico-químicas do efluente gerado e os procedimentos usados para a produção do biogás a uma escala laboratorial e avaliação do seu potencial.

Na abordagem quantitativa foi feita uma pesquisa de campo de tipo experimental que consiste na determinação do objecto de estudo que são os efluentes gerados após a produção do etanol, consistiu na quantificação do biogás gerado por dia, pelo método de deslocamento de volume da água.

De uma forma esquemática o diagrama abaixo ilustra todas as etapas feitas para o alcance dos objectivos pretendidos.



Esquema 5. Etapas da metodologia empregue para realização do trabalho.

3.1. Colecta da Amostra

Para a realização do presente estudo, as amostras da vinhaça foram obtidas nos edifícios do Laboratório de Engenharia de Processos Ambiente Consultoria e Serviços-EPACS, estas, resultantes da destilação simples do melaço para a produção do etanol. As amostras usadas para sua caracterização, estavam armazenadas em recipientes de 25 L por um período de 40 dias após o processo de destilação a uma temperatura ambiente. Obteve-se uma segunda amostra dos efluentes, que foram obtidos logo após o processo de destilação, 2 horas depois.

3.2. Inóculo

O inóculo é importante para auxiliar o início da fermentação ou o processo de digestão anaeróbica, por possuir uma gama de concentração de microrganismos activos para o efeito. De acordo com Sales (2022) para aumentar o desempenho do processo de digestão anaeróbia, uma alternativa é a aplicação de um inóculo, que tem a responsabilidade de acelerar o início da produção de biogás. É apropriado que este inóculo seja um lodo anaeróbio com a mesma composição do material teste, mas já digerido ao processo, contendo microrganismos específicos da digestão anaeróbia, com a capacidade de fermentar o novo material em um curto tempo de detenção.

Para o presente estudo, o inóculo usado foram amostras de efluente colectados de um biodigestor em funcionamento localizado em Macaneta.

As amostras foram colectadas num recipiente de 5 L e em seguida foi feita a caracterização das mesmas, onde os resultados são mostrados na tabela 4.

4. Materiais e Métodos

Para o alcance dos objectivos do presente estudo, foram usados alguns materiais para montagem dos experimentos e análises laboratoriais, como também alguns reagentes.

a) Materiais e Reagentes

Reagentes

- Água destilada;
- Hidróxido de Sódio NaOH;
- Sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}$)
- Bicarbonato de Sódio ($NaHCO_3$)
- Hidrogenofosfato de potássio (K_2HPO_4)
- Dihidrogenofosfato de potássio (KH_2PO_4)
- Cloreto de Amónio (NH_4Cl)

Materiais

- Garrafas de 1000, 500, 1500 e 5000 mL;
- Mangueira de Silicone;
- Balão simples;
- Pinça;
- Cadinhos;
- Dessecador.

b) Vidrarias

- Frasco de vidro de 2000 mL;
- Pipetas volumétricas de baixa quantidade (1 mL ou 2,5mL);
- Pipetas graduadas de 10 mL;
- Béquer de 250 mL e 1000 mL;
- Proveta de 100 mL e 1000 mL;
- Bastão de vidro;
- Balão volumétrico de 50mL.

c) Equipamentos

- Termômetro Digital Fluxe 51
- Espectrofotômetro HT 1000
- HQ40D HACH pHmetro
- Espectrofotômetro HACH DR 1900
- Termoreactor Lovibond RD 125
- Incubadora Lovibond DB 600
- Balança analítica
- Mufla
- Estufa (Incubador)

4.1. Métodos Experimentais

Neste tópico são descritas as unidades experimentais adoptadas neste estudo para atender aos objectivos propostos, conforme o fluxograma do esquema 5. Este trabalho foi desenvolvido nos edifícios do Laboratório da Faculdade de Engenharia, sendo que algumas análises (determinação do pH, Temperatura, DBO, DQO) foram realizadas no Laboratório de Engenharia de Processos Ambiente Consultoria e Serviços-EPACS, a montagem das experiências para avaliação do Potencial de produção do biogás foi feita nos edifícios do Laboratório de Engenharia de Processos Ambiente Consultoria e Serviços-EPACS.

A tabela 3 mostra os parâmetros e os respectivos métodos de análise usados. A explicação de como foram realizados os procedimentos experimentais podem ser encontrados no anexo 1.

Tabela 3. Métodos utilizados para a Caracterização físico-química da vinhaça, inóculo, e do efluente do biodigestato.

Parâmetro	Método
pH	Potenciométrico
Temperatura	Termômetro Digital
Sólidos (ST, STF, STV)	Filtração e gravimetria ^[2]
Cloretos, Nitratos, Sulfatos	Fotômetro multiparamétrico

Metais (Zn,Pb,Cd,Cr,Ni,Cu,Fe,Na e K)	Fotômetro multiparamétrico
DBO	Respirométrico; sensor de pressão electrónico ^[3]
DQO	Titulométrico
Biogás (Produção de Biogás)	Deslocamento de volume

^[2] ST-Gravimetria após filtração e secagem da amostra a 105°C, STV-Gravimetria após calcinação dos sólidos Totais a 550°C.

^[3] Consumo de oxigênio durante o período de incubação de 5 dias a 20°C, com inibição da nitrificação.

4.2. Construção dos biodigestores

Com o objectivo principal de avaliar o potencial de produção do biogás a partir da vinhaça, foram montados biodigestores laboratoriais simples a uma escala bancada, para analisar a possível produção do biogás, para o efeito foram construídos 6 biodigestores ao longo do experimento, conforme descrição no Anexo 3. O primeiro teve uma referência “zero”, e noutros 5 foi quantificado o volume de biogás gerado diariamente por de método de deslocamento do volume da água. Os 5 reactores têm as seguintes referências:

Reactor 1 – 100% Vinhaça sem adição de Inibidores (R1)

Reactor 2 – 100% Vinhaça + inibidores (R2)

Reactor 3 – 95% Vinhaça + 5% inóculo sem adição de inibidores (R3)

Reactor 4 – 95% Vinhaça + 5% inóculo com adição de inibidores (R4)

Reactor 5 – 99% Vinhaça + 1% inóculo com adição de inibidores (R5)

5. Análise e discussão dos resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e a discussão destes. Nele teremos a descrição dos resultados da caracterização da vinhaça, do inóculo, monitoramento da avaliação do potencial de produção do biogás, e da caracterização dos efluentes gerados após a biodigestão.

5.1. Caracterização da Vinhaça e Inóculo

A amostra colectada para a primeira caracterização estava armazenada por um período de 40 dias, e a segunda foi obtido logo após o processo de destilação, durante as análises e medições feitas obteve-se os seguintes resultados para as duas amostras.

Com vista a auxiliar o início do processo de biodigestão, foram utilizados dejectos líquidos de suínos, para o efeito, antes fez-se a caracterização dos mesmos. Os parâmetros analisados foram: pH; Temperatura; DQO; Sólidos Totais, Fixos e Voláteis; onde foram obtidos os seguintes resultados.

Tabela 4. Resultados da caracterização da vinhaça e inóculo.

Parâmetro	Amostra 1	Amostra 2	Inóculo	Unidades
pH	4,96	4,76	7,95	
Temperatura	28,4	47,6	22,5	°C
ST	78458,67	82950,33	6252,51	mg/L
STF	26424	25313,33	2363,75	mg/L
STV	52034,67	57637	3888,75	mg/L
DQO	9342,75	11376	5678	mg/L

A tabela 4 acima mostra os resultados obtidos dos parâmetros analisados em amostras de vinhaça e inóculo, viu-se a necessidade de caracterizar os dois efluentes com vista a ter maior fiabilidade dos resultados, pode se perceber que a maior parte dos parâmetros analisados os resultados da segunda amostragem são superiores aos da primeira.

Amostra 1 corresponde a amostra da primeira vinhaça;

Amostra 2 corresponde a amostra da segunda vinhaça.

Potencial Hidrogeniônico (pH) e Temperatura

Para o experimento, o potencial hidrogeniônico (pH) da amostra 1 foi medido após a obtenção da vinhaça armazenada por 40 dias e para amostra 2 após 2 horas do processo

de destilação que foi gerada a vinhaça como efluente, e a medição do pH do inóculo foi após a colecta, resultando em 4,96; 4,76 e 7,95 para amostra 1, amostra 2 e inóculo respectivamente, como pode ser verificado na tabela 5. Todas as leituras de pH realizadas antes do início do experimento ficaram dentro da faixa considerada óptima na literatura para amostras de vinhaça (tabela 2).

Tabela 5. Resultados da Temperatura e pH.

Amostra	pH	Temperatura (°C)
Amostra 1 Vinhaça	4,96	28,4
Amostra 2 Vinhaça	4,76	47,6
Inóculo	7,95	22,2

pH

O pH é um dos indicadores mais utilizados no monitoramento do processo de biodigestão anaeróbica, ele pode indicar acidez ou alcalinidade, para valores a baixo de 7 e superiores a 7 respectivamente. De acordo com os resultados obtidos o pH é ácido, a sua variação foi mínima que pode ser precipitado pelo acondicionamento da vinhaça. Os dois resultados das amostras estão dentro dos limites previstos pela literatura. O pH do Inóculo está próximo do neutro pelo facto de digestão anaeróbia ter um pH óptimo próximo do neutro para evitar a inibição. O controle do pH visa a eliminação do risco de inibição das bactérias metanogênicas pelos baixos valores de pH.

Temperatura

Para a temperatura a variação foi notável, normalmente o seu valor médio é de 89°C, isso quando a vinhaça é obtida logo após o processo de destilação, visto que o processo ocorre a uma temperatura de 80°C a 90 °C. Entretanto a vinhaça da primeira amostragem não foi obtida logo após do processo destilação, mas sim depois de estar armazenada e exposta às condições atmosféricas por um período de tempo, enquanto que para a segunda amostra, a medição de temperatura foi feita 2 horas depois da saída do processo de destilação, essa é a razão que dita a diferença de temperaturas. Para amostra do Inóculo o valor da temperatura tido deve-se ao facto dela ter estado já no processo de digestão anaeróbica, podendo estar nos limites psicrófila (0 a 20 °C).

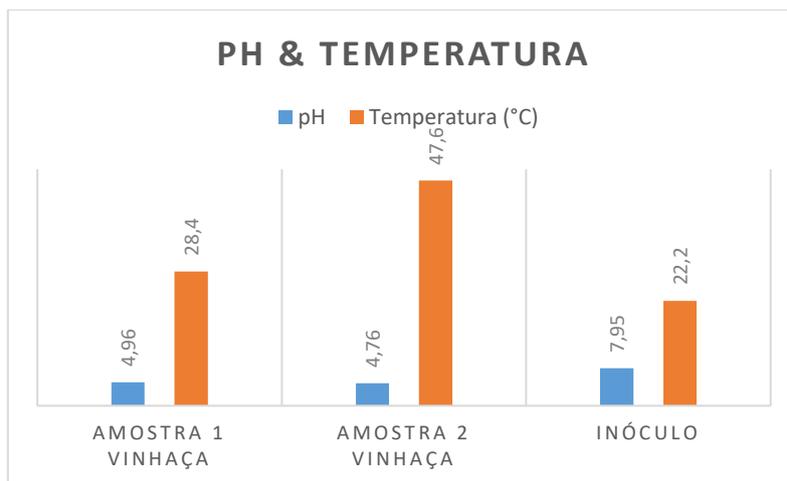


Gráfico 1. Valores obtidos para Temperatura e pH na caracterização das amostras.

Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Para o presente estudo foi determinado os valores de DQO correspondentes as 3 amostras, duas da vinhaça e uma do inóculo e obteve os seguintes resultados.

Tabela 6. Resultados obtidos das concentrações de DQO.

Amostra	DQO (mg/L)
Amostra 1 Vinhaça	9343
Amostra 2 Vinhaça	11376
Inóculo	5678

A DQO é um parâmetro importante a ser monitorado durante a digestão anaeróbia, pois indica a estabilização da matéria orgânica. Os dois valores de DQO estão dentro dos limites previstos pela literatura, como se pode ver nas tabela 2 e 6. Como já se referenciou que a primeira esteve armazenada por 40 dias em recipientes devidamente fechados, pode ter ocorrido a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos, ditando o decaimento do seu valor, o efluente contém compostos simples como o açúcar por essa razão o tempo de degradação é reactivamente baixo. A segunda consideravelmente fresca apresenta o seu resultado maior comparado ao primeiro.

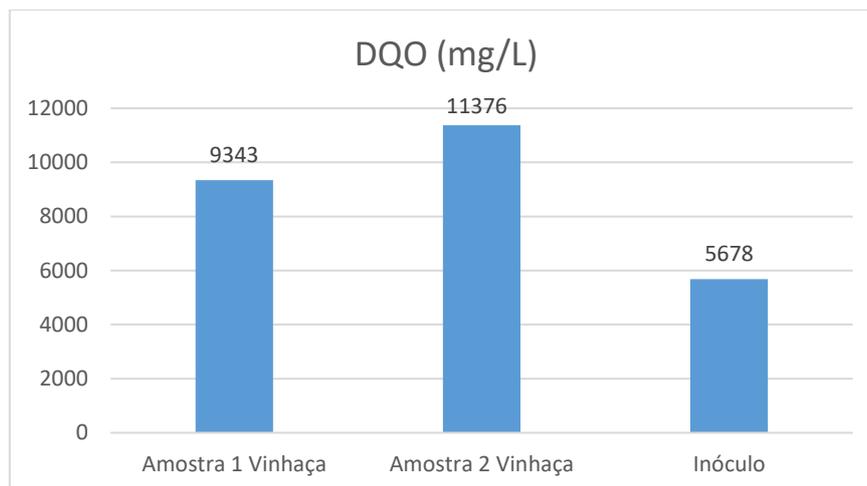


Gráfico 2. Valores das concentrações de DQO.

Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

No estudo em questão, foi realizada uma caracterização dos sólidos das amostras da vinhaça e do inóculo para obter conhecimento do potencial de produção de biogás.

Na Tabela 7, apresentam-se os valores percentuais de ST, SF e SV encontrados para cada amostra analisada.

Tabela 7. Resultados Percentuais dos sólidos.

Amostra	ST (%)	SF (%)	SV (%)
Vinhaça 1	8,86	33,66	66,33
Vinhaça 2	8,70	30,51	69,48
Inóculo	0,57793	37,75	62,63

É possível verificar que os valores obtidos de SV da segunda amostra são superiores que a primeira, porém ambas são ótimas, assim como do inóculo são ótimos para a obtenção considerável de biogás durante o experimento. Conforme (Cordeiro, 2018), quanto maior a quantidade de SV na amostra, maior a perspectiva de alcançar melhor e maior produção de biogás. De acordo com (Blasius, 2019), um factor muito importante que deve ser considerado, quando optado pelo processo de digestão anaeróbia em busca da eficiência energética, é o teor de sólidos dos substratos. Os sólidos totais (ST) representam parte de matéria sólida que a amostra contém, mesmo após retirada a

humidade. Já os sólidos não voláteis, denominados de fixos (STF), significam a parcela de matéria inorgânica ou mineral da amostra (Guerreiro, 2015).

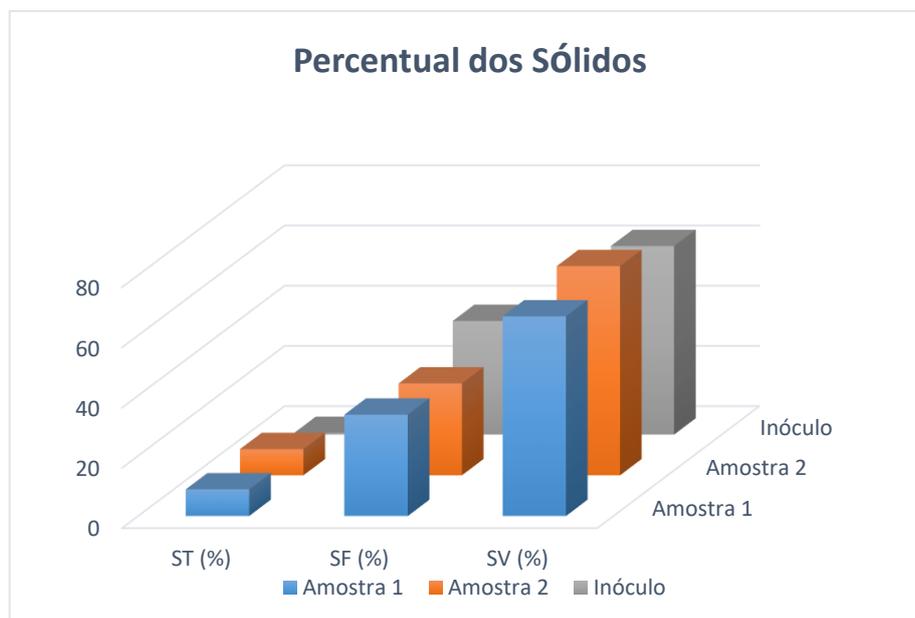


Gráfico 3. Percentual dos sólidos nas três amostras.

A tabela 8 mostra os valores dos ST, STF e SV em termos de concentrações (mg/L).

Tabela 8. Resultados das concentrações dos sólidos.

Amostra	ST (mg/L)	STF (mg/L)	SV (mg/L)
Amostra 1	78458,67	26424	52034,67
Amostra 2	82950,33	25313,33	57637
Inóculo	6252,51	2363,75	3888,75

Realizar a determinação de sólidos voláteis (SV) auxilia a reconhecer qual a quantidade de matéria biodegradável contida no substrato. Isso porque os SV caracterizam a parcela de matéria orgânica que têm a possibilidade de ser convertida em biogás, sendo assim, é importante que os teores sejam altos (Bruinsma, 2015).

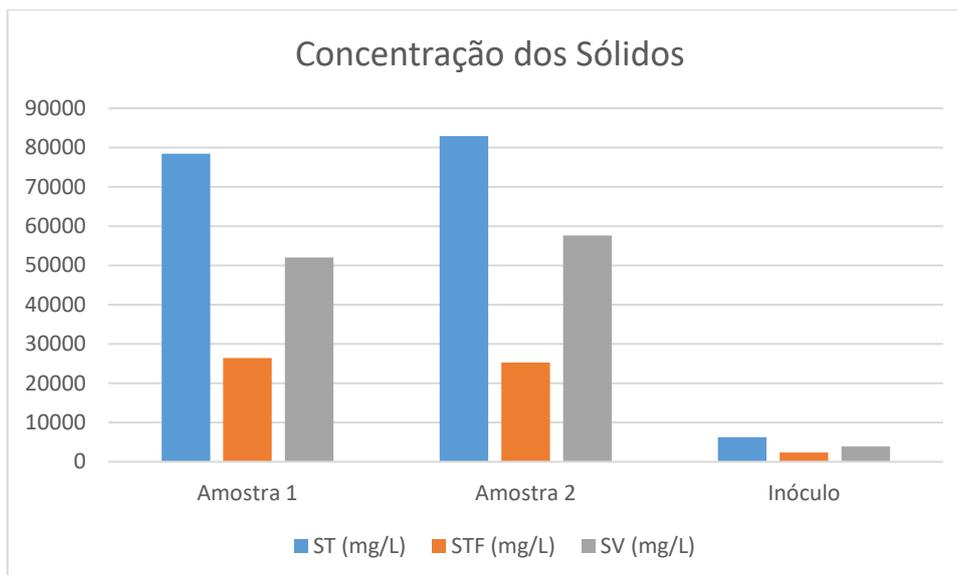


Gráfico 4. Valores das concentrações dos sólidos.

O autor Barcelos (2019) descreve que um substrato com um elevado teor de SV possibilita considerar alta capacidade de converter o substrato em biogás através do inóculo. Usualmente, o substrato padrão mais utilizado com o intuito de quantificar qual o potencial do inóculo é a celulose microcristalina, pois a mesma possui óptimo potencial de produção de biogás.

Observou -se que tanto em percentagem como em concentração (mg/L) os valores do inóculo são relativamente baixos em relação as outras duas amostras da vinhaça, a amostra 2 apresenta boas condições para a obtenção considerável de biogás durante o experimento.

Metais e Nutrientes

Foi feita a caracterização de alguns metais e nutrientes apenas para as amostras da vinhaça, os resultados obtidos são minimamente fiáveis pelo facto do método usado não apresentar resultados precisos, foi usado espectrofotômetro que contém faixas de concentrações para cada parâmetro a ser analisado, o que obrigou a diluição das amostras para que o instrumento fizesse a leitura. O gráfico 5 mostra os resultados obtidos na caracterização dos nutrientes e alguns metais para as duas amostras de vinhaça.

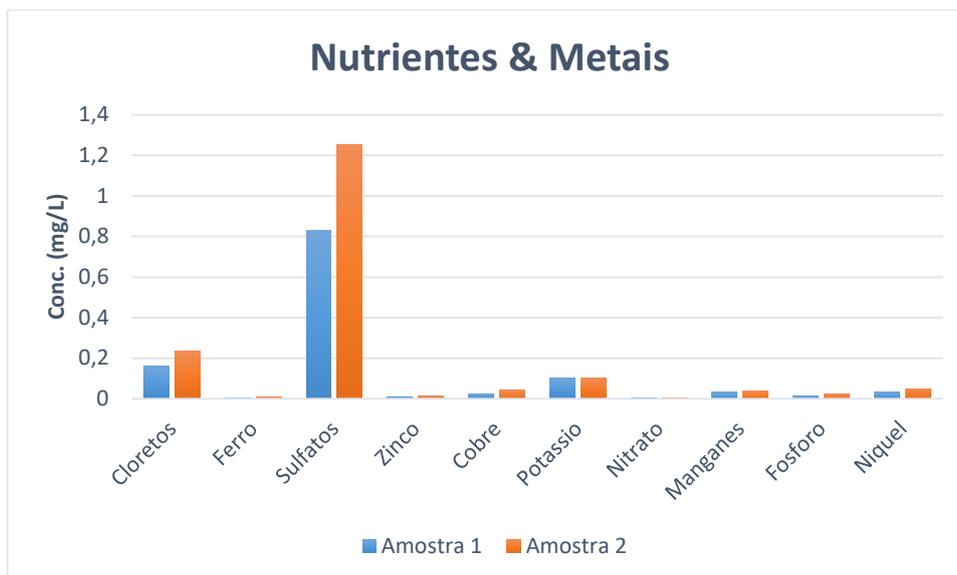


Gráfico 5. Valores das concentrações dos metais e nutrientes.

Para um óptimo desempenho do processo anaeróbio são fundamentais os íons de enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato. Já para auxiliar no crescimento das células dos microrganismos anaeróbios são relevantes elementos com baixa concentração como ferro, cobre, zinco, magnésio

Os resultados obtidos não estão dentro dos limites estabelecidos pela literatura (tabela 2), o método usado para análise pode ter influenciado nos baixos valores destes parâmetros. Porém é notável alguma presença dos íons de sulfatos, potássio e cloretos que são fundamentais para o desempenho do processo anaeróbico.

A segunda amostra consideravelmente fresca apresenta valores de nutrientes e metais todos superiores aos da primeira.

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Para este parâmetro químico foi usado método automático que ajuda a minimizar os erros da determinação de DBO.

O princípio do método de medição de DBO é feito por diferencial de pressão em sistema fechado (medição respirométrica de DBO). O sistema de medição registra uma medição a cada hora no primeiro dia, a cada duas horas no segundo dia e uma vez a cada 24 horas a partir do terceiro dia.

Foi feita a análise da curva de DBO pela incubação de 5 frascos das amostras, dos quais dois continham 100% vinhaça sem adição de inibidores e outros três foi feita adição dos reagentes inibidores com composições diferentes.

O gráfico 6 mostra a curva da concentração de DBO (mg/L) em função do tempo (h), essa foi a primeira incubação do frasco contendo a amostra da vinhaça em estudo sem adição dos reagentes.

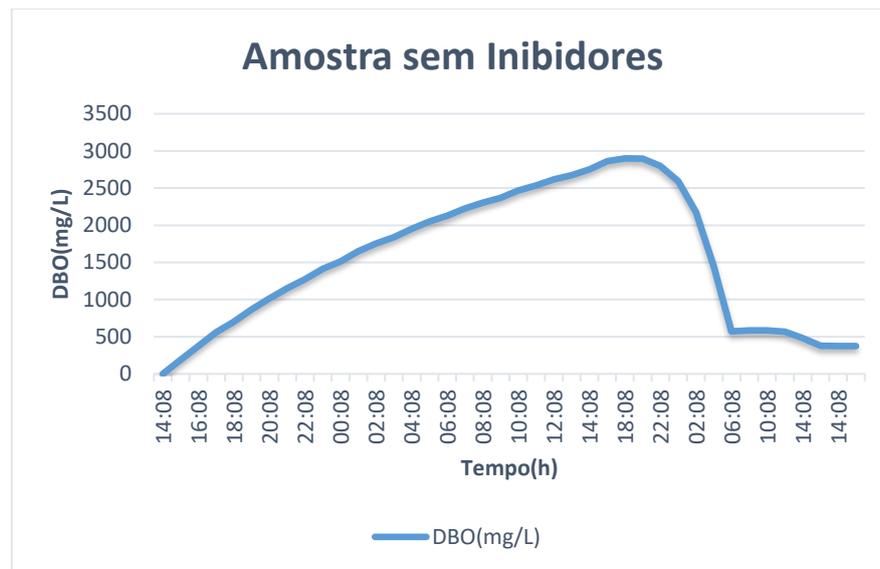


Gráfico 6. Curva de DBO da amostra da vinhaça sem adição de inibidores (1ª incubação).

Na mesma incubação, nas mesmas condições foi colocado outro frasco da amostra de vinhaça contendo alguma concentração dos reagentes (inibidores) e a curva da concentração de DBO (mg/L) esta ilustrada no gráfico 7 abaixo.

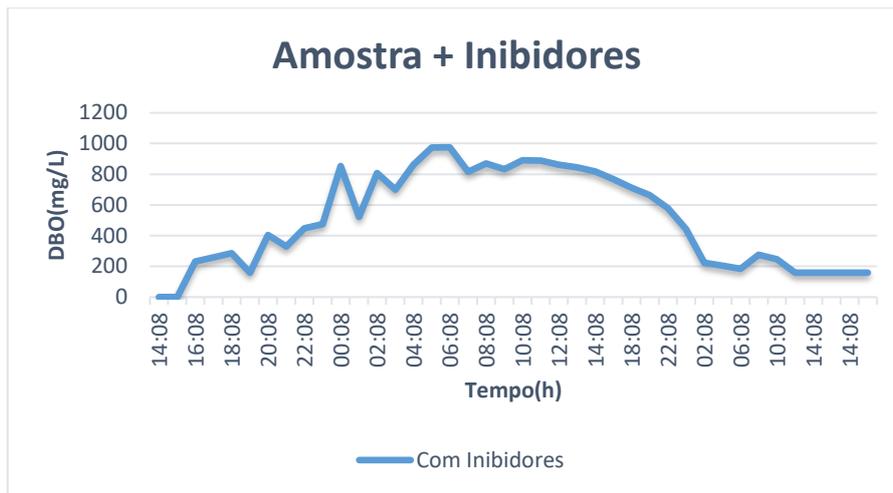


Gráfico 7. Curva de DBO da amostra da vinhaça com adição de inibidores (1ª incubação).

Fazendo a combinação das duas curvas e sua interpretação das duas curvas no gráfico 8, em que a primeira amostra contém a amostra da vinhaça simples e a segunda foi adição de reagentes, as condições de entrada foram descritas anteriormente.

Os valores de medição de DBO devem ser sempre superiores aos do dia anterior, os mesmos valores de medição de DBO não aumentam linearmente. O aumento é sempre menor do que no dia anterior, a curva sem inibidores no gráfico 6, apresentou um comportamento não linear, significando um bom desempenho com uma exibição de DBO de aproximadamente 3000 mg/L de O_2 , o seu aumento foi menor aos do dia anterior, porém não foi observado o mesmo na segunda amostra (curva com adição de reagentes), os valores de DBO tiveram uma variação diária pelo facto bactérias nitrificantes também consumirem o oxigênio.

Esse consumo pode ocorrer já nos primeiros cinco dias, principalmente em amostras com baixos valores de DBO (Barcelos, 2019). Com o inibidor de nitrificação na segunda amostra (adição de reagentes), a actividade dessas bactérias pode ter sido suprimida por meio de supressão enzimática de forma que apenas a degradação de substâncias orgânicas constitua a DBO de uma amostra.

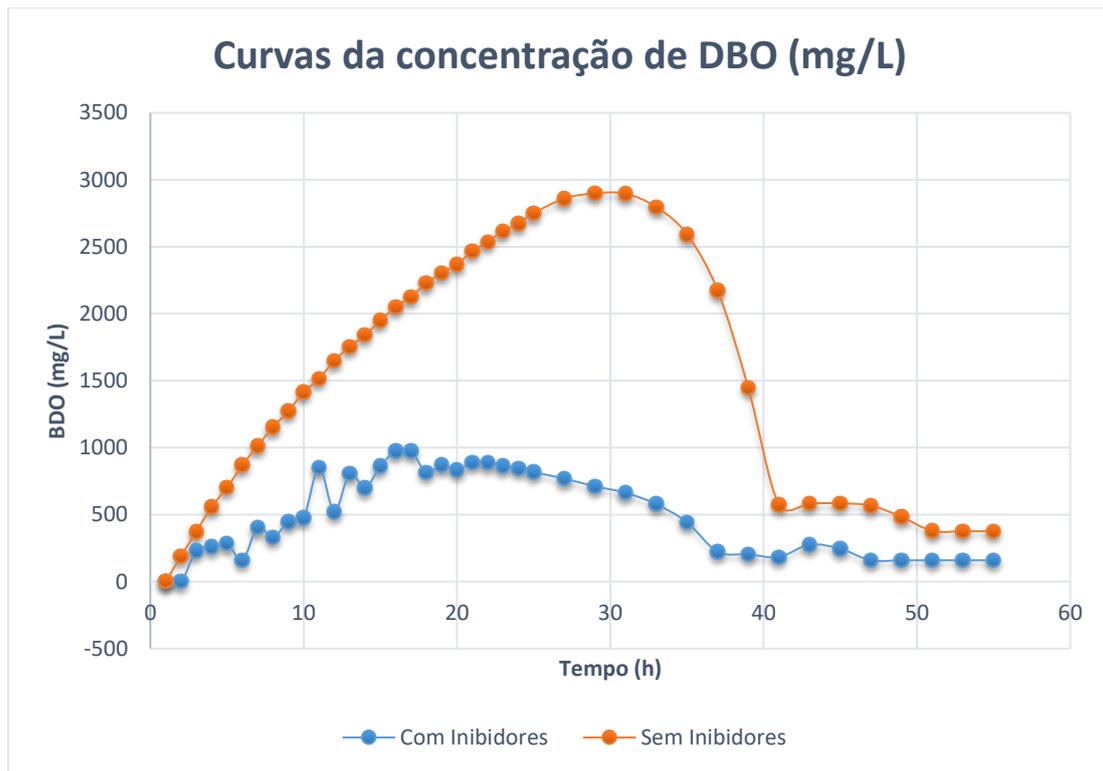


Gráfico 8. Gráfico das Curvas de DBO da amostra da vinhaça com e sem adição de inibidores (1ª incubação).

Se o consumo de oxigênio durante a nitrificação (N-DBO) é determinado, uma comparação da amostra com e sem inibidor de nitrificação pode ser a diferença entre os valores de DBO corresponde então à necessidade de oxigênio das bactérias nitrificantes (Junior, 2013).

DBO da segunda Incubação

Os gráficos 9, 10 e 11 mostram as curvas das concentrações de DBO (mg/L) da segunda incubação, onde foram incubados 3 frascos dos quais um com 100% vinhaça sem adição dos reagentes (gráfico 9) e outros dois (gráficos 10 e 11) com uma composição dos reagentes de 50 e 20% (sem sacarose) respectivamente das concentrações.

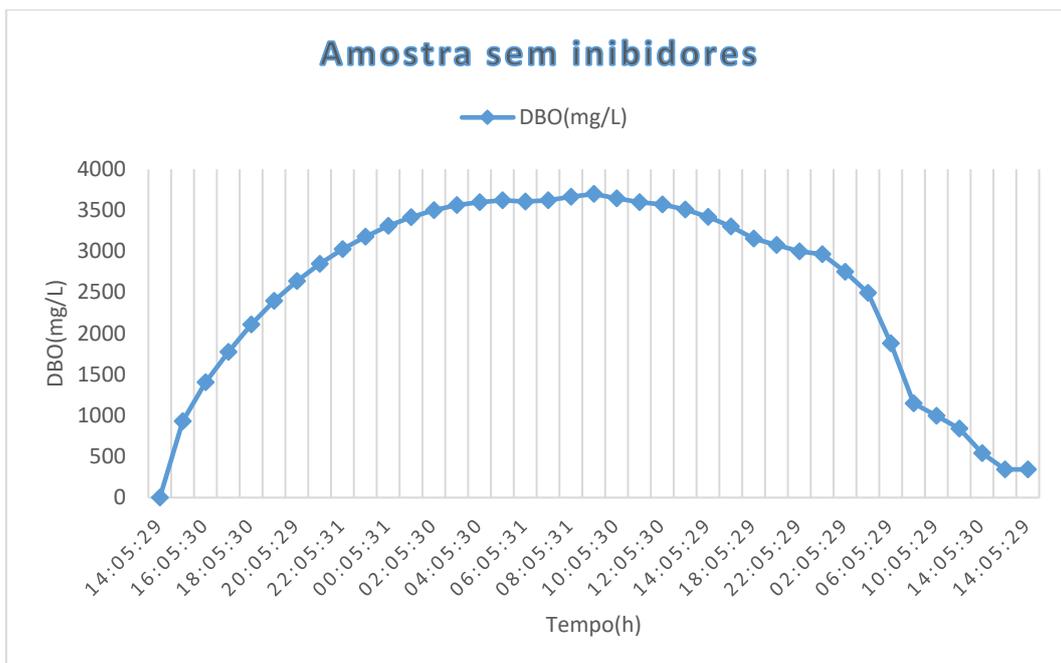


Gráfico 9. Curva de DBO da amostra da vinhaça sem adição de inibidores (2ª incubação).

Amostra com 50% da concentração dos reagentes

Curva da concentração de BDO (mg/L) com 50% da concentração dos reagentes.

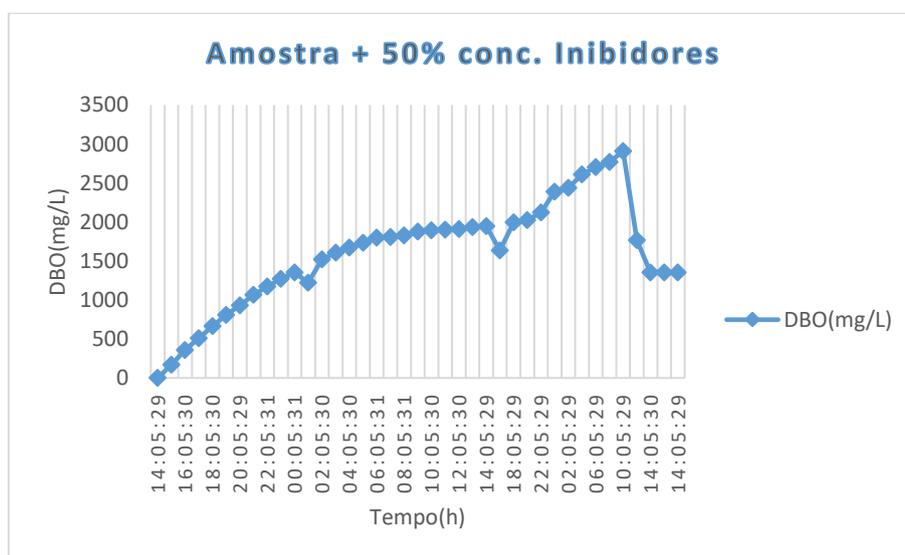


Gráfico 10. Curva de DBO da amostra da vinhaça com adição de 50% Conc. Inibidores (2ª incubação).

Curva da concentração de BDO (mg/L) com 20% da concentração dos reagentes sem Sacarose.

Observa-se que a amostra com 20% da concentração dos reagentes e sem sacarose teve maior variação e decaimento do DBO, pela ausência da sacarose. A presença desses inibidores nas amostras, os resultados da medição foram muito baixos. Nutrientes (nitrogênio, fosfato) e oligoelementos (ferro) também devem estar disponíveis em concentrações suficientes; caso contrário, podem ocorrer limitações de crescimento das bactérias e, portanto, leituras de DBO baixas.

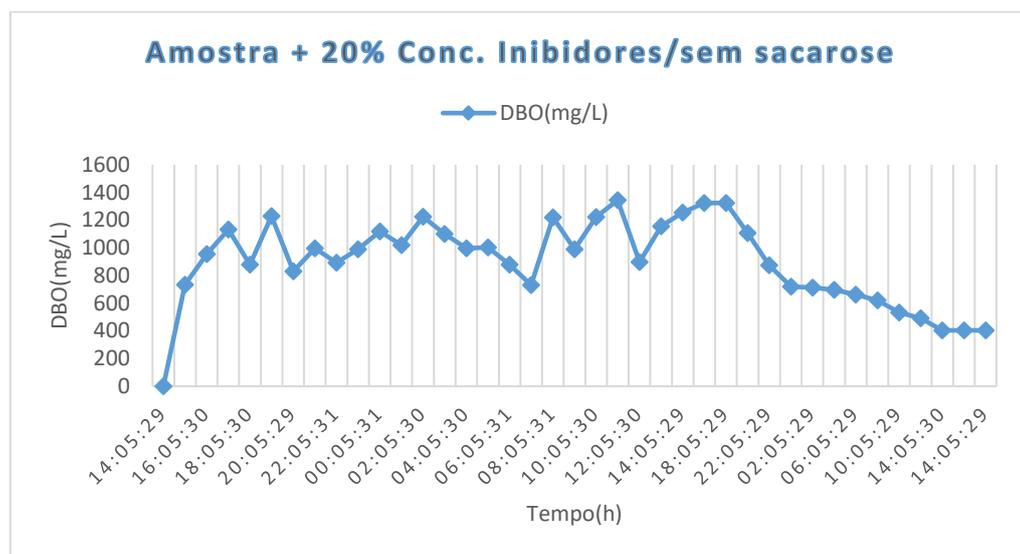


Gráfico 11. Curva de DBO da amostra da vinhaça com adição de 20% Conc. Inibidores sem sacarose (2ª incubação).

O gráfico 12 ilustra as curvas das três combinações das incubações feitas para análise de DBO, é possível observar que a amostra sem adição de reagentes os valores de DBO sempre foram superiores aos do dia anterior tendo mostrado com o valor de exibição máximo para a faixa de medição cerca de 3500 mg/L de O_2 , depois de 3 dias os valores de DBO caírem durante a medição, o sistema podia estar com vazamento. A amostra que continha 50% da concentração dos reagentes mostrou uma exibição máxima no valor de 2800 mg/L de O_2 , a última amostra que foi adicionada 20% da concentração dos reagentes e sem sacarose, o seu desempenho foi baixo tendo mostrado uma exibição de 1200mg/L de O_2 .

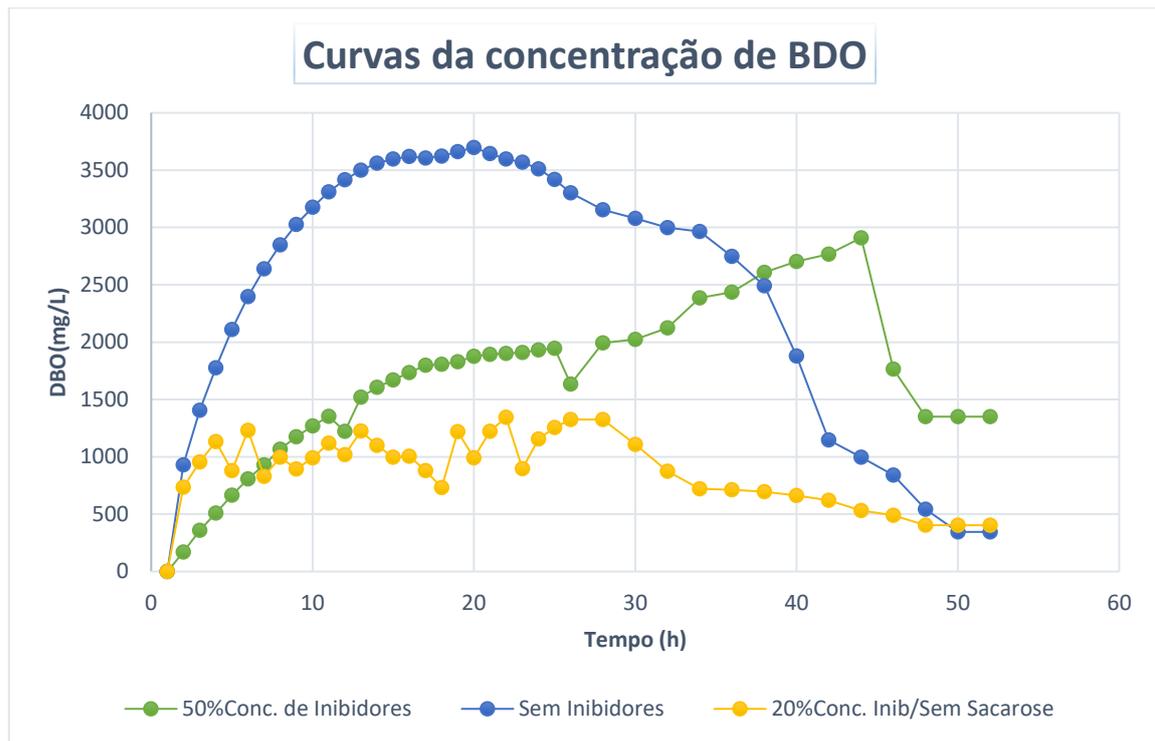


Gráfico 12. Curva da combinação das 3 curvas de DBO da amostra da vinhaça (2ª incubação).

Se os valores de medição de DBO caírem durante a medição, o sistema pode estar com vazamento, as amostras com 50% e 20% da concentração dos reagentes apresentaram decaimentos durante a medição de DBO. Ainda as especificações referem-se sempre a amostras regulares e ao comportamento normal das bactérias ao longo de uma medição de DBO. No entanto, casos especiais são sempre possíveis e ocorrem com base nas respectivas circunstâncias como é o caso da adição de reagentes inibidores. Uma indicação de zero após 5 dias pode ser indicativa de um sistema com vazamento ou supressão pesada. As águas residuais industriais estão frequentemente sujeitas a circunstâncias especiais (Belhamidi, 2021). Por exemplo, pode conter substâncias tóxicas. Neste contexto pode se explicar o facto ocorrido nas amostragens com adição de reagentes, que interferiram directamente na toxicidade.

Observando as duas incubações feitas, nota-se que as duas apresentam algumas semelhanças, após 3 dias em ambas incubações os valores tiveram um decaimento, e também em alguns casos houve erros nas medições, tendo usado os valores acumulados de DBO.

De acordo com a especificações, para garantir o ajuste correcto da temperatura das amostras, quando o *autostart* é activado, o dispositivo espera até uma leve queda de pressão na garrafa após o início. Este valor de pressão é tomado como um valor inicial para o cálculo de DBO posterior. Nesta conexão, um tempo de espera máximo de aproximadamente de três horas são especificadas, após as quais o dispositivo usa automaticamente o valor de pressão actual, mesmo que nenhuma queda de pressão tenha sido detectada (Magalhães, 2018).

O uso da função de início automático não substitui o controle adequado da temperatura da amostra antes do início da medição (Brack, 2021). A temperatura pode ter influenciado directamente nas medições de DBO em todas as amostras feitas, pelo facto de as amostras de DBO foram testadas cuja temperatura variava muito em relação à temperatura do ponto de ajuste, entre tanto ocorreu um erro na determinação do valor de DBO devido à mudança de pressão.

5.2. Avaliação do Potencial de Produção do Biogás

Avaliação do Biodigestor 0

Experimento 0

Com objectivo de fazer uma análise previa de produção de biogás foi montado o biodigestor 0, que foi feito o monitoramento do tamanho do balão por dia, com o aumento do tamanho do balão foi possível analisar a formação do biogás.

Para este biodigestor foram adicionadas as seguintes quantidades volumétricas da vinhaça e do inóculo, 1000 e 200 mL respectivamente, a adição do inóculo teve como objectivo auxiliar no início do processo de digestão anaeróbica. Acoplou-se um balão volumétrico para acumular o biogás gerado durante o processo de biodigestão.

Nesta experiência a amostra usada foi a primeira, armazenada por 40 dias.

O pH inicial foi de 5 que é aproximadamente igual ao valor obtido durante a caracterização no dia 14/04/2023 de 4,96.

Para o processo de digestão anaeróbica o pH pode precipitar a inibição do processo, as bactérias metanogênicas desenvolvem-se preferencialmente em ambiente neutro. Neste caso ajustou-se o pH da vinhaça até 7,06 usando uma base forte, o hidróxido de sódio.

A análise feita no dia 11/05/2023 para o inóculo, o pH encontrava-se perto do neutro, não havendo necessidade da sua alteração.



(A)

(B)



(C)

(D)

Figura 4. Simulação laboratorial para produção do biogás.

(A)- Primeiro dia do experimento

(B)- Terceiro dia do experimento

(C)- Sexto dia do experimento

(D)- Décimo dia do experimento

A principal razão que ditou a rápida biodigestão deve-se ao facto de efluente conter compostos simples como o açúcar, o tempo de degradação é reactivamente baixo. O tempo de retenção hidráulica que as bactérias necessitam para se reproduzir e metabolizar os sólidos voláteis é baixo, enquanto que resíduos complexos como os compostos orgânicos clorados, são lentamente degradáveis e precisam de mais tempo para seu metabolismo.

Deslocamento do volume

Na segunda avaliação foi quantificada a quantidade de biogás gerada por dia por meio de deslocamento do líquido. O volume de medição deste deslocamento é fixo, com o método de observação de nível o olho nu, através da variação do nível da água por dia. O sistema mostra o volume total gerado por dia, mas não as dinâmicas da produção de biogás, os gráficos 13 e 14 mostram os volumes deslocados e acumulados respectivamente em cada reactor.

Condições de operação

Os valores de pH iniciais foram medidos para todas as misturas testadas, após a adição da solução de NaOH (0,1N), que foi realizada para o ajuste do pH no intervalo óptimo de operação. Todos reactores foram alimentados com a vinhaça da segunda amostra.

Para os retores que contém a vinhaça e inóculo, a adição do inóculo foi feita de acordo com a capacidade do reactor, fez-se a medição do pH e à posterior o seu ajuste até as condições óptimas de operação.

Os resultados de pH e DQO (mg/L) de operação e as concentrações dos reagentes adicionados para cada reactor estão apresentados no anexo 4.

Volume deslocado em cada reactor

O gráfico 13 abaixo ilustra os resultados do volume deslocado em cada reactor após 32 dias de biodigestão anaeróbica.

De acordo com os resultados obtidos do gráfico 13 o reactor 3 (R3) com 95% de vinhaça e 5% inoculo teve uma produção máxima diária de 35 mL, o reactor 1 com 100% de vinhaça a produção máxima diária foi de 30 mL, o efeito de inibidores fez com que os reactores 2, 4 e 5 apresentem uma taxa de produção baixa.

De acordo com Guerreiro (2015), o inóculo é um material que contém microrganismos adeptos ao processo por já ter passado pelo processo de digestão anaeróbica. Actuando como um catalizador da reação, o inóculo acelera a decomposição da matéria orgânica e, em contrapartida, reduz o tempo que é necessário para a produção de biogás.

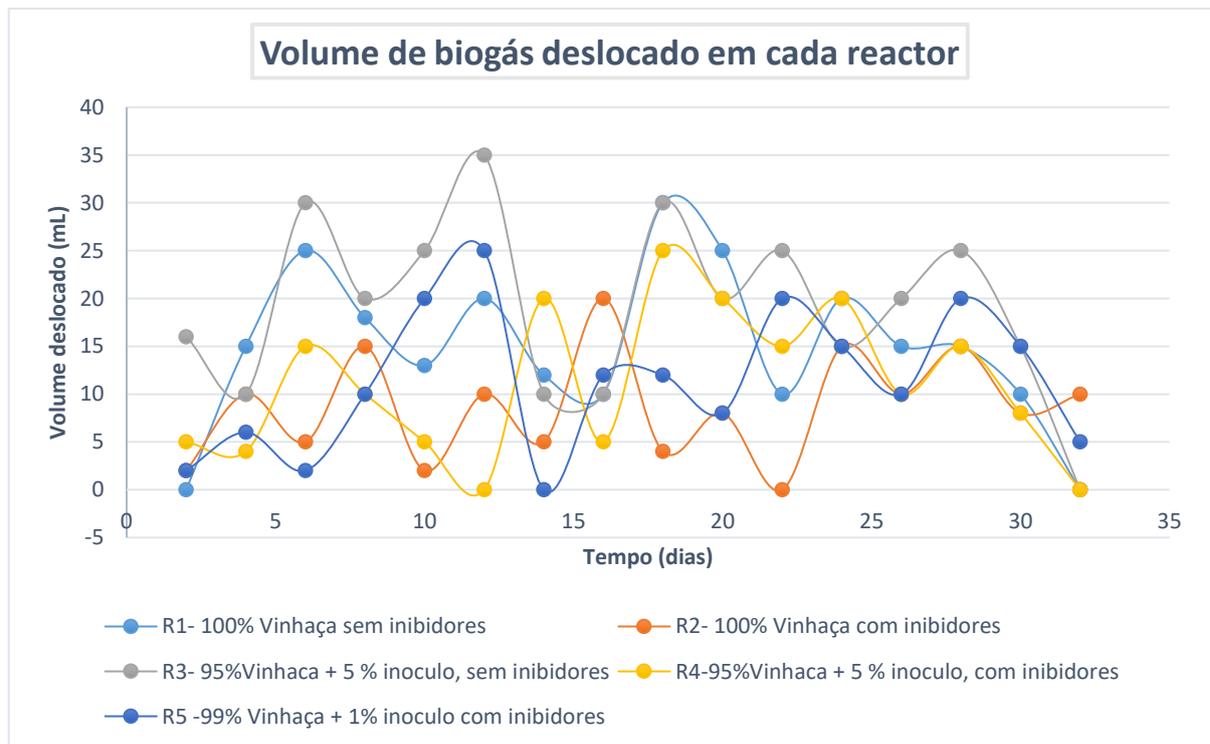


Gráfico 13. Volume de biogás deslocado por dia em cada reactor.

Os reactores R3, R4 e R5 com adição do inóculo de 5% sem inibidores, 5% com inibidores e 1% com inibidores respectivamente, apresentaram volumes deslocados no início de 16, 5, e 3mL respectivamente, desta forma o inóculo não teve influência directa nos reactores R4 e R5, devido a presença de inibidores. A produção máxima obtida para

os reactores 4 (R4) e 5 (R5) foi de 25mL mesmo com diferentes volumes do inóculo, o efeito de inibição teve mesma proporção nos dois reactores.

A amostra da vinhaça continha a concentração de sólidos voláteis de 57637 mg/L correspondente à fração da matéria orgânica presente na amostra que é relativamente superior a amostra de inóculo que tinha uma concentração de 3888 mg/L.

Os reactores 1 (R1) com 100% vinhaça e 3 (R3) 95% vinhaça + 5% inóculo ambos sem adição dos reagentes, pela caracterização da vinhaça e inóculo os valores de DQO obtidos foram de 11376 mg/L e 5678 mg/L respectivamente, significando que a amostra da vinhaça é susceptível a oxidação, a quantidade de carbono susceptível de ser consumido pela população microbiana em condições óptimas de funcionamento é maior comparado ao de inóculo.

Entretanto o R1 teve um bom desempenho de produção mesmo sem adição do inóculo, devido as suas características físico-químicas da vinhaça. O R3 a sua produção de biogás não foi tão alta nos últimos dias devido aos microrganismos estarem inativos e não possuírem mais material para degradar.

Os reagentes adicionados, em condições óptimas podem ser considerados macronutrientes, favorecendo o a reprodução dos microrganismos

O autor Gomes (2020) diz que a mistura de (KH_2PO_4) e (K_2HPO_4) actua como uma solução tampão para minimizar as variações bruscas do pH no meio racional, porém em concentrações elevadas pode baixar o pH, colocando o meio racional em ácido.

Volume acumulado em cada reactor

O gráfico 14 abaixo ilustra o volume de biogás acumulado em cada reactor nas condições óptimas de operação já descritas (anexo 4).

Nota-se que nos rectores R2 e R4 as curvas durante o intervalo de 2 a 16 dias, o comportamento desenvolvido pelos dois reactores é visivelmente parecido, diferenciado em deslocamento ínfimo de volumes nos dois reactores, verifica-se que nos dias 13 e 16 o volume acumulado foi o mesmo. Como já se referenciou no gráfico 13 o inóculo tinha valor de DQO (mg/L) baixo comparado ao da vinhaça.

O reactor 3 (R3) com 95% vinhaça + 5% inóculo sem adição de reagentes, apresentou uma maior taxa de produção diária, com um valor acumulado do biogás gerado versus tempo de aproximadamente 300mL.

Ao analisar comparativamente a taxa de produção entre os reactores 1 (R1) e 3 (R3) a tendência de produção de produção de biogás entre os reactores com 100% vinhaça e 95% vinhaça + 5% inóculo respectivamente, ambos sem adição de reagentes, nota-se que o reactor 3 (R3) produziu maior volume, isso deve ao facto de conter inóculo, porem no 30º dia os dois reactores a sua produção teve uma tendência de cessar.

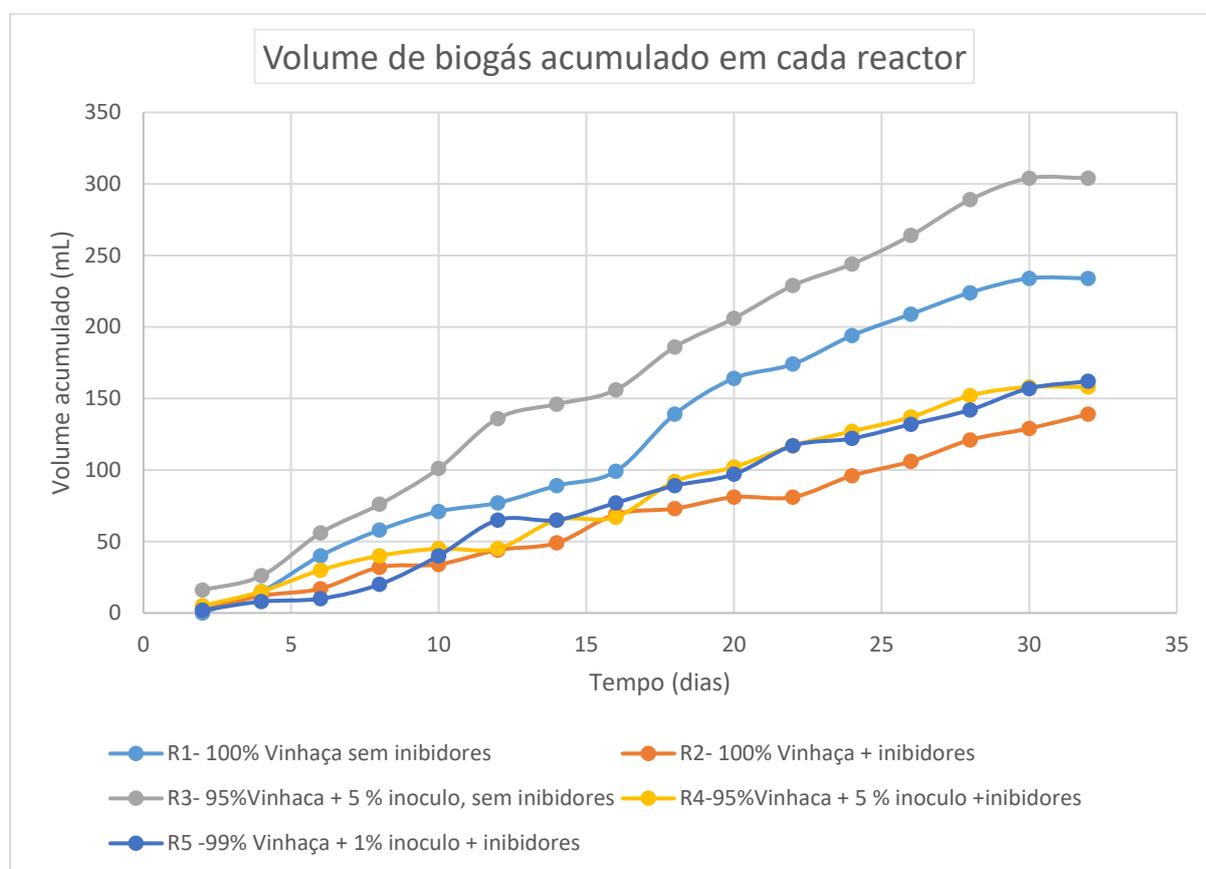


Gráfico 14. Volume de biogás acumulado por dia em cada reactor.

As curvas referentes aos reactores 4 (R4) e 5 (R5) após o 17º apresentaram aproximadamente o mesmo comportamento, ambos com a mesma composição dos reagentes, nos primeiros dias no reactor 4 (R4) a decomposição da matéria orgânica foi rápida em relação ao reactor 5 (R5) e após 30 dias o R4 baixou a sua taxa de produção e o R5 aumentou, significando que o inóculo reduziu o tempo de produção.

De acordo com Karlsson (2014) substrato com açúcares simples e dissacarídeos são degradados de maneira fácil e rápida, o que pode levar a problemas de instabilidade devido à quantidade de ácidos graxos que são formados. Quando o material de entrada contém quantidades elevadas desses açúcares, a hidrólise faz com que a degradação seja muito rápida, como também acontece na fermentação (Fumian, 2020). As bactérias metanogênicas formam o metano lentamente e ainda degradam os ácidos graxos.

Como a vinhaça contém açúcares simples, pode ser beneficiado para a rápida degradação da matéria orgânica e por consequência baixa produção de biogás devido à quantidade de ácidos graxos que são formados nos reactores.

Outro factor importante que é crucial na produção do biogás é a agitação (Karlsson, 2014) a agitação facilita o contacto entre o substrato, os microrganismos e os nutrientes, fornecendo temperatura uniforme ao longo do processo. É particularmente importante que os microrganismos hidrolíticos tenham contacto com as várias moléculas que são rompidas no processo de digestão, de modo que suas enzimas possam ser disseminadas a uma grande superfície de contacto do substrato.

A partir do gráfico 14 é possível perceber algum desequilíbrio na produção do biogás em todos reactores, isso pode ter acontecido devido à falta de um factores cruciais para a produção do biogás a agitação.

5.3. Caracterização do efluente resultante da biodigestão

Segundo Karlsson (2014) a degradação da matéria orgânica em um processo de biogás também gera resíduos, mas de boa qualidade que pode ser utilizado como biofertilizante. Os nutrientes minerais disponíveis no material orgânico (substrato) são concentrados no produto final já digerido. Se a digestão é realizada com substratos reactivamente “limpos”, como dejectos, resíduos de alimentos e de material vegetal, o produto final pode ser usado como biofertilizante (Magalhães, 2018).

Após o processo de biodigestão foi feita a caracterização dos efluentes resultantes dos 5 reactores, os resultados são descritos a seguir.

Eficiência de remoção de DQO

Comparando os valores de DQO iniciais e finais (grafico 15), é possível verificar que houve diminuição das cargas orgânicas ao final do experimento. O resultado de DQO apresentou concentração inicial alta de 11376 mg/L, correspondente a amostra da vinhaça e finais entre 3786 mg/L e 8345 mg/L.

As eficiências de remoção de DQO são parâmetros confiáveis para o processo de digestão anaeróbia, visto que o acúmulo de DQO no processo pode demonstrar um desequilíbrio metabólico no sistema, além da inibição da produção de biogás (Rocha, 2017).

A concentração de DQO no substrato afluente (R1) com 100% Vinhaça sem reagentes apresentou um valor de 11367 mg/L, e no efluente apresentou uma média de 4562, atingindo-se eficiência de remoção de 59,89%.

O reactor 1 (R1) com 100% Vinhaça sem reagentes, teve uma eficiência de degradação 59,89 % sendo o segundo com maior eficiência de remoção.

Comparando a remoção percentual de DQO das amostras sob aplicação de diferentes composições de misturas de inóculos e de reagentes, em condição de operação os resultados dos reactores (R3) e (R1) apresentaram eficiência de remoção superior, isso pode ser explicado pela adição do inóculo feita no R3 que refletiu na maior capacidade de conversão de substratos orgânicos em biogás.

O reactor 1 (R1) teve uma eficiência de aproximadamente 60%, a amostra da vinhaça tinha uma grande quantidade de carbono susceptível de ser consumido pela população microbiana, já se tinha referenciado na discussão do volume diário produzido. Comparando o teor de remoção de DQO das misturas de resíduos alimentares, é observado um padrão decrescente, independente das condições dos testes, que seguiu a ordem: R3>R1>R5>R4>R2. Esse diferencial na eficiência do processo na ordem dessas misturas pode estar relacionado a distinta biodegradabilidade e efeito dos reagentes adicionados, cujo os microrganismos encontram-se num meio em que a concentração de nutrientes é superior às necessidades do microrganismo.

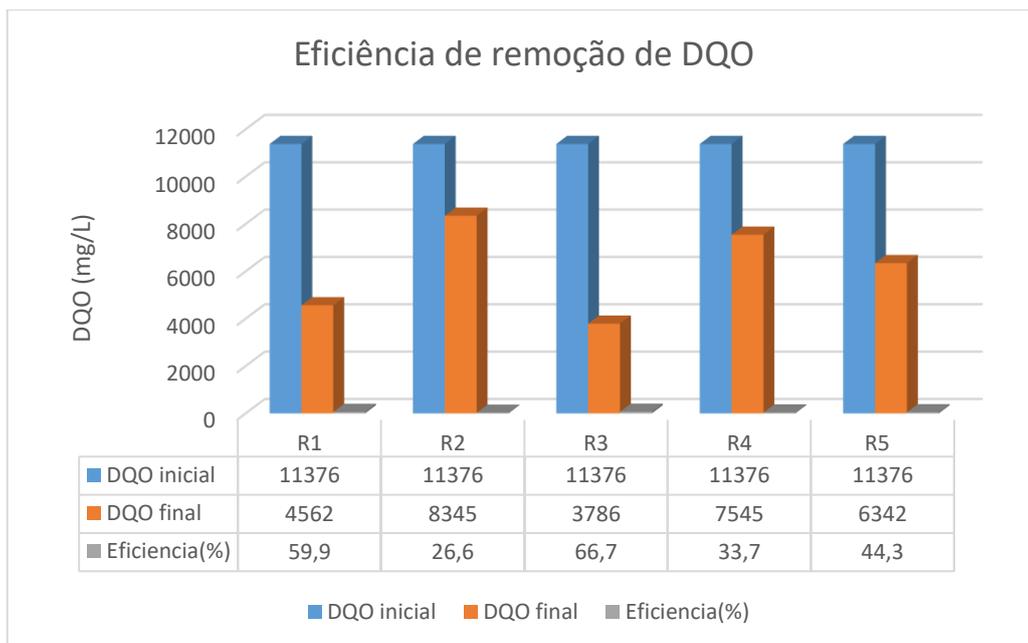


Gráfico 15. Resultados da eficiência de remoção de DQO em cada reactor.

Sob condições de operação, foi observada uma redução percentual de DQO de 59,89% (R1), 26,64% (R2), 66,71% (R3), 33,67% (R4) e 44,25% (R5).

O autor Alves (2016) diz que a luz não sendo letal para bactérias metanogênicas, pode inibir em parte o seu metabolismo. Assim, é prudente que o processo ocorra em ausência total de luz. Nesse pressuposto do autor, pode ser um dos factores que aumentou a inibição do metabolismo nas reações visto que todos os reactores estavam expostos a luz visível.

Potencial Hidrogeniónico (pH)

Na caracterização do efluente foi obtido um valor de pH medio de 4,76 antes do ajuste do mesmo para as condições óptimas de operação.

O pH ideal para a digestão anaeróbia é na faixa da neutralidade (6,5 - 7,5), sendo que valores afastados desta faixa podem inibir completamente as bactérias formadoras de metano (Moreira, 2021).

De acordo com os resultados obtidos após a caracterização do afluente em cada reactor, o afluente do reactor 1 (R1) com 100% vinhaça sem adição de reagentes, teve maior variação do pH, onde variou de 7,51 para 5,41, e o afluente do reactor 4 (R4) a sua variação do pH foi mínima.

O pH ideal para a digestão anaeróbia situa-se no intervalo entre 6.8 e 7.4, observa-se que ao longo do processo houve um importante decaimento dos valores de pH em todas as condições experimentais, exceto R4 (95%Vinhaca + 5 % inoculo, com inibidores), que foi o único que não houve uma diminuição significativa.

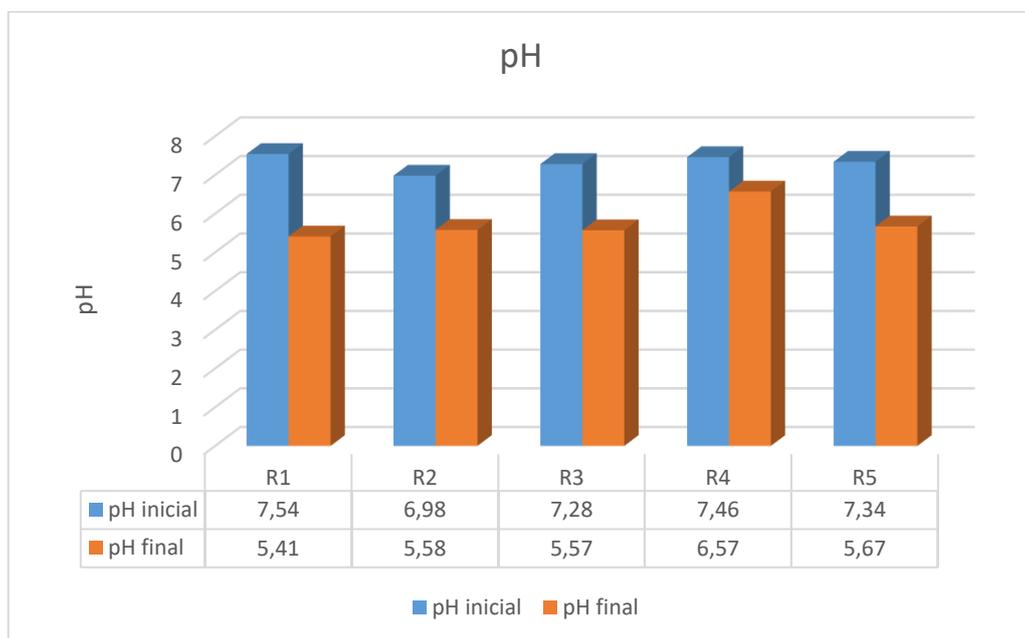


Gráfico 16. Resultados do pH antes e depois da biodigestão anaeróbica.

Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

O gráfico 17 apresenta os resultados encontrados em relação aos parâmetros de %ST, %STF e %SV, observando-se que houve uma transformação de massa de sólidos totais e voláteis, que se deve a materiais de fácil biodegradação, tais como proteínas, açúcares, lipídios, amido etc.

A partir do gráfico 17 é notável que o R5 teve um comportamento mais satisfatório que os outros reatores, em seguida o R3 teve uma redução da percentagem dos SV, ST e STF maior em relação a outros 3 reatores.

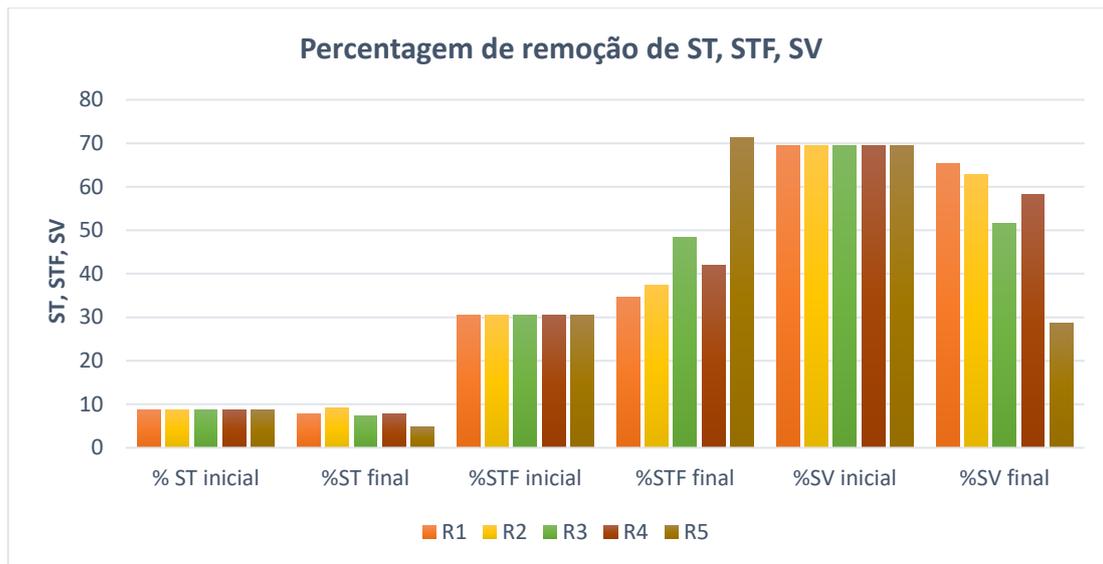


Gráfico 17. Percentual dos sólidos antes e depois da biodigestão.

Observa-se que a variação das percentagens dos 3 parâmetros não foi alta, isso pode ter ocorrido porque a biodigestão pode ter sido afectada por uma série de factores que vão desde as condições ambientais e de operação do sistema, natureza do substrato, até as características do biodigestor.

Sólidos Totais e Voláteis

Os gráficos 18 e 19 apresentam os valores para análise de sólidos totais, sólidos voláteis totais encontrados no início e após o processo de biodigestão dos reactores em termos de concentrações (mg/L).

O teor de ST (mg/L) do afluente foi, em média de 82950 mg/L, enquanto que no efluente foi, em média, de 61151 mg/L, atingindo uma eficiência média de remoção de 16,22% em todos os reactores.

Observou-se que o R5 (99% Vinhaça + 1% inoculo com reagentes) teve um bom desempenho de remoção dos ST (mg/L), visto que teve a maior eficiência de todas de 44,1%, e em seguida o R3 (95%Vinhaca + 5 % inoculo, sem reagentes) com uma eficiência de 18,5%.

Com relação ao teor de STF do afluente foi em média de 25313,33 mg/L, enquanto que no efluente foi em média de atingindo uma eficiência média de 31051 mg/L, todos os reactores obtiveram valores superiores aos iniciais pelo facto de STF significarem a parcela de matéria inorgânica ou mineral da amostra da vinhaça.

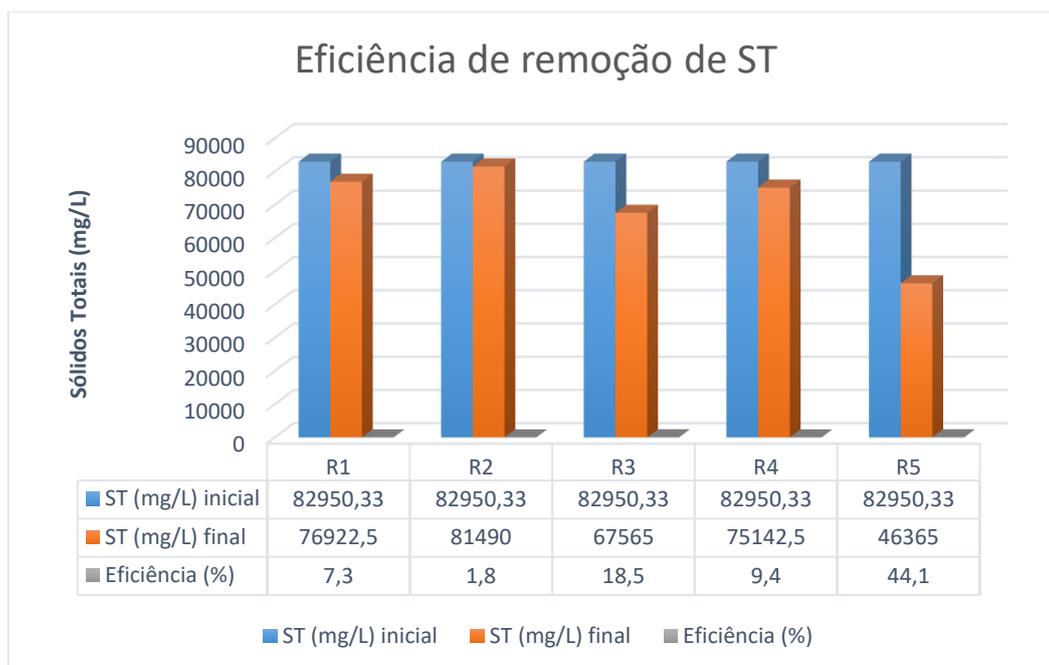


Gráfico 18. Resultados da eficiência de remoção de concentração dos sólidos totais.

Eficiência de remoção de Sólidos voláteis

O gráfico abaixo (19) ilustra a eficiência de remoção da concentração dos sólidos voláteis (mg/L) nos 5 reactores.

O teor de sólidos voláteis (SV), parâmetro muito utilizado para medida do estado de biodegradabilidade da fração orgânica, apresentou um valor considerável de remoção nos reactores 3 e 5 com 95%Vinhaça + 5 % inóculo, sem reagentes e 99% Vinhaça + 1% inóculo com reagentes respectivamente, o R5 teve um bom desempenho de remoção já que na literatura valores na faixa de 75% a 79% são considerados óptimos. Em seguida o R3 indicando uma mínima satisfatória eficiência de remoção de sólidos voláteis no interior do reactor, podendo proporcionar, conseqüentemente, uma taxa satisfatória de produção de biogás e de gás metano, consideravelmente o R3 teve a maior produção,

já para os reactores com adição de reagentes o R5 teve maior produção de biogás, indicando uma influência directa.

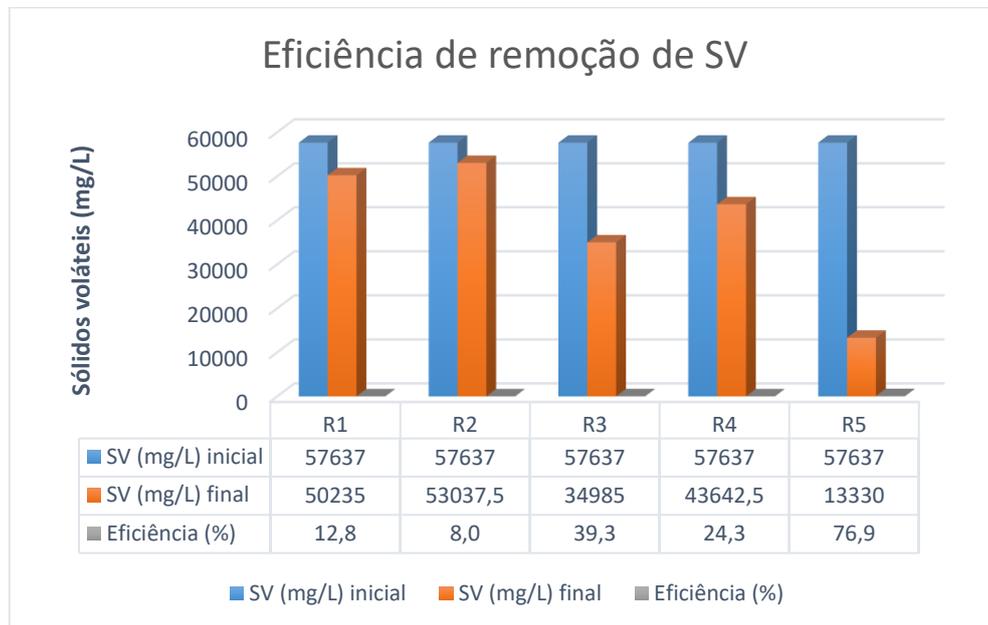


Gráfico 19. Resultados da eficiência de remoção da concentração de Sólidos voláteis.

6. Conclusões e Recomendações

6.1. Conclusões

O processo de biodigestão anaeróbica usando como matéria prima a vinhaça é um assunto que vem sendo levantado actualmente. Vários autores tem discutido o aproveitamento do seu potencial energético com vista à redução da sua carga poluidora ao ser lançado no meio ambiente. Usando este tipo de metodologias para minimizar danos ambientais, biodegradando diferentes tipos de substratos é aplicável visto que o metano possui alto poder calorífico.

Durante a realização das experiências, foi possível alcançar o volume máxima de produção de biogás de 35mL/dia corresponde ao terceiro reactor com 95%Vinhaca + 5 % inoculo, sem adição de reagentes, tendo sido o segundo reactor que apresentou melhores eficiências de remoção em todos parâmetros analisados. A capacidade produção de biogás como também valores de pH, ST, STF, SV, DQO foram próximos ou semelhantes aos citados na literatura, mostrando que é possível obter uma produção de biogás em condições óptimas de operação.

Ao fim dos 32 dias de experimentos os reactores contendo reagentes apresentaram os mais baixos valores de volume acumulado de biogás, 135 mL para o R2, 158 mL para o R4, e 162 mL para o R5, porém foram os 3 reactores que apresentaram variação diária de DBO, não tendo um comportamento linear nem curvilíneo devido as dinâmicas que ocorriam dentro dos reactores pela adição de reagentes.

A quantidade de inóculo utilizada nos bioreactores pode ser que não tenha favorecido, consideravelmente, o equilíbrio do processo de digestão, não reduzindo o tempo de estabilização da matéria orgânica.

Ao concluir análise dos dados colectados pode-se fazer uma avaliação comparativa da influência dos reagentes adicionados sobre a produção de biogás. Observou-se uma distinção significativa no perfil de produção de biogás.

Na caracterização do efluente gerado após a biodigestão obteve-se uma eficiência de remoção satisfatória somente no reactor 5 (99% Vinhaça + 1% inoculo com inibidores), uma vez que a quantidade de SV dos substratos inseridos nos reatores pode representar a matéria orgânica disponível a ser digerida, espera-se que um processo de BDA ocorra de maneira eficiente quando o consumo de sólidos voláteis totais seja elevado.

O comportamento diferenciado da produção do biogás e das eficiências dos reactores deve-se a factores cruciais que influenciam no processo de biodigestão não terem sido observados, como é o caso de agitação, Temperatura, intensidade luminosa.

6.2. Recomendações

Para trabalhos futuros que envolvam estudo da vinhaça para aprofundar a sua aplicação na produção de biogás, são dadas as seguintes recomendações:

- Recomenda-se a realização de análise cromatográfica do biogás produzido, para verificar a evolução da degradação da matéria orgânica;
- Recomenda-se testar os inóculos (esterco bovino, lamas de ETAR) utilizando factores de inóculos diferentes para efeitos de estudo da vinhaça;
- Recomenda-se a utilização de um reactor com alimentação contínua e fazer a colecta dos efluentes produzidos nos reactores durante todo o experimento, fazer caracterização dos mesmos olhando para todos parâmetros para facilitar o monitoramento da digestão anaeróbia;
- Recomenda-se a que se faça a caracterização dos efluentes gerados após o processo de biodigestão olhando a quantidade macro e micronutrientes, é uma forma de agregar conhecimento nessa área em expansão;
- Para o caso de estudos que envolvam adição de reagentes, recomenda-se que se faça uma variação concentrações dos reagentes nos reactores, afim de estudar o comportamento em cada composição dos reagentes;
- Recomenda-se a utilização de frascos com volume mínimo de 5L para colecta do biogás, a posterior fazer a análise das fracções, pôs assim é possível apresentarem resultados confiáveis.

Referências Bibliográficas

- Alves, C. I. (2016). *Otimização do desempenho da digestão anaeróbia de resíduos agroindustriais*. Coimbra.
- Aquino, S. F.; Chernicharo, C. A. L.; Foresti, E.; Dos Santos, M. L. F.; Monteggia, L. O.; *Metodologias para Determinação da Atividade Metanogênica Específica (AME) em Lodos Anaeróbios*; Revista de Engenharia Sanitária Ambiental; Vol. 12-Nº2; 2007. São Paulo.
- Baldacin, A. C. (2015). *BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA: APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS*. Campinas.
- Barcelos, B. R. (2019). *AVALIAÇÃO DE DIFERENTES INÓCULOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS*. BRASÍLIA/DF.
- Belhamidi, S. (2021). *Biogas production from vinasse derived from ethanol manufacturing using a continuous stirred tank reactor pilot plant*. Kenitra – Marrocos.
- Bem, E. C. (2021). *POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASSA IN NATURA E ENSILADA DE CULTURAS ENERGÉTICAS*. Rio Verde – GO.
- Bertoncini, E. I. (2018). *TRATAMENTO DE EFLUENTES E REÚSO DA ÁGUA NO MEIO AGRÍCOLA*. Rio de Janeiro: Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária.
- Blasius, J. P. (2019). *INFLUÊNCIA DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE RESÍDUOS ALIMENTARES NO PROCESSO DE BIOMETANIZAÇÃO*. Rio Claro - SP.
- Brack, L. B. (2021). *Determinação da Atividade Metanogênica Específica (AME) Através da Biodigestão Anaeróbia de Materiais Colagênicos*. Porto Alegre.
- Bruinsma, E. (2015). *AVALIAÇÃO DE PRÉ-TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CAMA DE FRANGO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS*. CERRO LARGO – RS.
- Colturato, L. F. (2015). *DESSULFURAÇÃO DE BIOGÁS DA METANIZAÇÃO DA VINHAÇA: UMA NOVA ABORDAGEM PARA REMOÇÃO DE ALTAS CONCENTRAÇÕES DE H₂S*. Belo Horizonte.
- Comin, A. M. (2017). *Proposta de tratamento complementar ao efluente proveniente de uma indústria de cosméticos*. Porto Alegre.
- Cordeiro, F. B. (2018). *ANÁLISE DE TECNOLOGIAS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA PARA TRATAMENTO DE FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS*. Rio de Janeiro.
- Costa, R. F. (2014). *PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE VINHAÇA*. Assis.RJ
- Crespo, E. d. (2013). *Digestão Anaeróbia de resíduos agroalimentares: Reutilização das frações líquidas e sólidas (state-of-art)*. Lisboa.

- Eckert, C. T. (2015). *Construção De Biodigestores De Batelada Para Escala Laboratorial*. RJ-Brasil : Revista Brasileira de Energias Renováveis.
- Endler, I. A. (2021). *AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO ORGÂNICO DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA*. Rio de Janeiro.
- Endler, I. A. (2021). *AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO ORGÂNICO DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA*. Lajeado.
- Ferreira, D. C. (2017). *PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA REATOR UASB*. Goiânia: Centro Científico Conhecer
- Filho, A. S. (2018). *DIMENSIONAMENTO DE UM REATOR UASB PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMESTICOS E RECUPERAÇÃO DO BIOGÁS PARA PRODUÇÃO ENERGÉTICA: UM ESTUDO DE CASO EM POUSO ALEGRE (MG)*. tajubá (MG): Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.7, n.1, p. 77-94.
- Fortes, A. G. (2020). *Bioenergia em Moçambique: tecnologias de produção, uso e aspetos sustentáveis*. Nampula,.
- Friego, K. D. (2015). *Biodigestores: seus modelos e aplicações*. UNIOESTE: Acta Iguazu, Cascavel.
- Fuess, A. J. (2016). *ADEQUAÇÃO DA VINHAÇA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA REUSO AGRÍCOLA: AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO E POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS*. Rio Claro – SP.
- Fumian, V. A. (2020). *Avaliação da produção de biogás obtido a partir de dejetos bovino e casca de café*. RJ, Brasil : Latin American Journal of Energy Research.
- Gaspar, R. M. (2013). *UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES EM PEQUENAS E MÉDIAS PROPRIEDADES RURAIS COM ÊNFASE NA AGREGAÇÃO DE VALOR: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DE TOLEDO-PR*. Florianópolis.
- Gomes, B. C. (2020). *Utilização de melaço de soja (resíduo) da produção de proteína de soja para a geração de biometano em reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)*. São Paulo.
- Guerreiro, L. d. (2015). *VINHAÇA TRATADA ANAEROBIAMENTE POR PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE OXIDAÇÃO AVANÇADA COM REAGENTE FENTON*. BRASÍLIA.
- Junior, A. E. (2013). *PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE VINHAÇA E MELAÇO EM REATORES UASB TERMOFÍLICOS, EM DOIS ESTÁGIOS*. JABOTICABAL – SÃO PAULO.
- Júnior, Z. A. (2022). *Análise das propriedades do biogás produzido através de diferentes substratos provenientes do mercado grossista do Zimpeto*. Maputo.

- Karlsson, T. (2014). *Manual básico de biogás*. Lajeado - RS, Brasil: 1ª edição - Ed. da Univates,.
- Kunz, A. (2019). *FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA, PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS, USO E TRATAMENTO DO DIGESTATO*. Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves.
- Lima, F. d. (2016). *Revisão sobre a toxicidade e impactos ambientais relacionados à vinhaça, efluente da indústria sucroalcooleira*. São Paulo-Brazil: CADERNOS UniFOA Edição 32 .
- Lins, L. (2015). *COMPOSIÇÃO MÉDIA DO BIOGÁS DE DIFERENTES TIPOS DE BIOMASSA*. Rio de Janeiro - RJ.
- Magalhães, G. V. (2018). *Avaliação Da Biodigestão Anaeróbia De Resíduos Orgânicos: Ensaio De Potencial Bioquímico De Metano (Bmp) E Projeto Piloto De Um Biodigestor Em Escala Real*. Fortaleza.
- Moreira, A. J. (2021). *APLICAÇÃO DE MODELOS CINÉTICOS A TESTES DO POTENCIAL DE BIOMETANIZAÇÃO DE SUBSTRATOS ORGÂNICOS DIVERSOS*. Florianópolis, SC.
- Nascimento, J. B. (2019). *Biodigestor De Bancada Para Produção De Biogás A Partir De Vinhaça: Uma Proposta Para Aulas Experimentais*. João Pessoa- Brazil.
- Neto, A. P. (2011). *VINHAÇA: PRODUÇÃO E DESTINAÇÃO VIA FERTILIZANTE NA FORMA DILUÍDA OU CONCENTRADA*. Belo Horizonte-Brazil.
- Pereira, S. Y. (2014). *OS ESTUDOS DOS IMPACTOS DA VINHAÇA NO SOLO E NA ÁGUA SUBTERRÂNEA, ÊNFASE NA EDR - RIBEIRÃO PRETO - UMA ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL DO CONHECIMENTO E PERSPECTIVAS*. Costão do Santinho – Florianópolis – Santa Catarina.
- Pereyra, D. d. (2019). *Cofermentação de glicerol e melaço como alternativas para produção de biocombustíveis e produtos de valor agregado*. Maceió.
- Renováveis-ALER, A. L. (2017). *Energias Renováveis em Moçambique – Relatório Nacional do Ponto de Situação (Segunda Edição)*. Maputo: Loures Gráfica.
- Rocha, O. E. (2017). *Factores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás*. Maceió: Nativa, Sinop, v.5, esp., p.509-514, dez. 2017. .
- Rodrigues, B. C. (2019). *Aproveitamento do Melaço de Soja para Produção de Biometano em Reator UASB*. Araraquara.
- Sagura, A. L. (2012). *BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE CAMA DE FRANGO EM CO-DIGESTÃO COM CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR* Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura). BOTUCATU-SP.
- Sales, N. G. (2022). *Produção de Biogás a Partir de um Resíduo da Indústria Sucroalcooleira: Avaliação da Vinhaça como Substrato no Biodigestor*. Brasília, DF: UnB Gama.

- Santos, E. A. (2018). *BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA: APROVEITAMENTO ENERGÉTICO*. Brasília.
- Santos, R. C. (2020). *Biodigestão Anaeróbica Da Vinhaça: Abordagem Do Modelo Adm1 Em Usinas Sucroalcooleiras Do Centro-Oeste*. Brasília.
- Silva, M. A. (2006). *Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático*. Goiânia.
- Soares, C. M. (2017). *Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbica na produção de biogás*. Paraná, Brasil.
- Sousa, E. A. (2016). *Simulador Do Reator UASB Para Conversão De Vinhaça Em Biogás*. Brasília.
- Sousa, E. A. (2017). *SIMULAÇÃO PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA*. Goiânia.
- Sousa, R. d. (2018). *Análise Exergética Da Vinhaça Para Produção De Biogás*. Londrina.
- Tunes, C. R. (2017). *Produção De Biogás A Partir Da Digestão Anaeróbica De Efluentes Orgânicos Em Reator Uasb*. Caroline Ribeiro Tunes.
- Veroneze, M. L. (2019). *AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE CERVEJARIA. PARANÁ – BRASIL*.
- Victorino, A. (2017). *POTENCIAL DA DIGESTÃO ANAERÓBIA NA GESTÃO DE RESÍDUOS E PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL:UM ESTUDO DE CASO-TESE DE DOUTORADO*. Brasília/DF.

ANEXOS

A. Anexo 1: Procedimentos Experimentais

Este anexo apresenta todos os procedimentos experimentais realizados nesta pesquisa. As experiências obedeceram a três fases nomeadamente: Caracterização da Amostra e do inóculo, produção de biogás e caracterização do efluente gerado após a biodigestão anaeróbica.

Para a caracterização da amostra e do inóculo e do efluente gerado após a biodigestão anaeróbica foram usados os mesmos métodos e procedimentos experimentais.

A-1: pH

Amostragem: recipiente de vidro

Tipo de amostra: simples

Volume: 50ml Preservação: análise imediata

Tempo de armazenamento: não houve armazenamento

Instrumento: HQ40D HACH pHmetro

Procedimento:

Colectou-se a amostra num frasco de vidro;

Ligou-se o equipamento e introduziu-se o pHmetro;

Fez-se a leitura do resultado obtido.



Figura. A1-1: Medição do pH

A-2: Temperatura

Amostragem: recipiente de plástico

Tipo de amostra: simples Volume: 50ml

Preservação: análise imediata

Tempo de armazenamento: não houve armazenamento

Instrumento: Termometro Digital Fluxe 51

Procedimento:

- Colectou-se a mostra num frasco plástico;
- Introduziu-se a extremidade do termómetro;
- Fez-se a leitura do valor lido pelo termômetro.



Figura. A2-2: Medição de Temperatura

A-3: Metais

Amostragem: recipiente de vidro

Tipo de amostra: diluídas

Volume: 10ml

Preservação: refrigeração

Tempo de armazenamento: 2h

Instrumento: Espectrofotômetro HT 1000

Procedimento:

- Tendo duas cubetas de 10ml sendo uma de branco (água destilada) e outra contendo uma diluição 1:71 e 1:51 para a primeira e segunda análises respectivamente (10ml de amostra e 700-500ml de água);
- No aparelho, colocou-se a cubeta do branco para zerar o mesmo e de seguida a cubeta da amostra diluída;
- Esperou-se que o aparelho fizesse a leitura e leu-se o resultado. Assim se procedeu para cada metal em cada amostra. O fotômetro multiparamétrico tem uma certa faixa de leitura e esse é o motivo das diluições feitas.



Figura. A3-3: Análise de nutrientes e metais

A-4: Cloretos, sulfatos e nitratos

Amostragem: recipiente de vidro

Tipo de amostra: diluídas

Volume: 10ml Preservação: refrigeração

Tempo de armazenamento: 2h

Instrumento: Espectrofotômetro HT 1000

Procedimento:

O procedimento para estes parâmetros foi o mesmo que o anterior (A-3).

Cálculo do factor de diluição

Para calcular o factor de diluição aplicou-se a seguinte fórmula.

$$F = \frac{V_{amostra}}{V_{amostra} + V_{H2O}}$$

A-5: Sólidos

Sólidos Totais, Sólidos Totais Fixos, Sólidos Totais Voláteis.

Amostragem: recipiente de vidro

Tipo de amostra: simples

Volume: 150ml

Preservação: refrigeração

Tempo de armazenamento: 2h

Instrumentos: estufa, mufla, balança analítica

Procedimento:

- Com 3 cadinhos limpos e retirados da estufa à 110°C, fez-se a pesagem dos mesmos para obter o peso dos cadinhos vazios;
- Em cada cadinho adicionou-se 25 ml das amostras, pesou-se e subtraiu-se o **P** peso dos cadinhos vazios para obter o P_0 (peso da amostra);
- Levou-se os cadinhos para a estufa com temperatura de 110°C durante 12h;
- Após retirar os cadinhos da estufa e deixar arrefecer em um dessecador, pesou-se novamente para obter o P_1 ;
- Os cadinhos foram introduzidos na mufla à 550°C por 12h;
- Removidos da mufla e colocados no dessecador, após arrefecimento os cadinhos foram pesados para obtenção do P_2 .



Figura. A5-5: Análises de sólidos totais, fixos e voláteis

Através das equações foi estabelecido o percentual de sólidos presentes em cada amostra.

$$\text{Sólidos Totais (\%)} = \frac{(P_1 - P)}{P_0} \times 100\% \quad (1)$$

Onde:

P_1 = Peso pós-estufa

P = Peso do cadinho vazio

P_0 = Peso da amostra

$$\text{Sólidos Voláteis (\%)} = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1 - P} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

P_1 = Peso pós-estufa

P = Peso do cadinho vazio

P_2 = Peso pós-mufla

$$\text{Sólidos Fixos (\%)} = \frac{(P_2 - P)}{P_1 - P} \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

P_1 = Peso pós-estufa

P = Peso do cadinho vazio

P_2 = Peso pós-mufla

Através das equações foi estabelecida a concentração em mg/L de sólidos presentes em cada amostra.

$$\text{Sólidos Totais (mg/L)} = \frac{(P_1 - P)}{V \text{ (mL)}} \times 10^6 \quad (4)$$

Onde:

P_1 = Peso pós-estufa

P = Peso do cadinho vazio

V = Volume da amostra

$$\text{Sólidos Voláteis (mg/L)} = \frac{(P_1 - P_2)}{V \text{ (mL)}} \times 10^6 \quad (5)$$

Onde:

P_1 = Peso pós-estufa

P_2 = Peso pós-mufla

V = Volume da amostra

Sólidos Totais Fixos (mg/L)

$$\text{STF} = \text{ST} - \text{STV} \quad (6)$$

A-6: Determinação da Demanda Química de Oxigênio- DQO

Amostragem: recipiente de vidro, cubetas marcados com volume de 10 mL;

Tipo de amostra: com reagentes

Volume: 2ml

Preservação: refrigeração

Tempo de armazenamento: 2h

Instrumentos: Termoreactor Lovibond RD 125 e Espectrofotômetro DR 1900

Procedimento:

- Colocou-se 100 mL de amostra em um frasco e misturou-se 30 segundos ou até homogeneizar;
- Para a faixa de 200–15.000 mg/L ou para melhorar precisão e reprodutibilidade das outras faixas, despejou-se a amostra homogeneizada em um béquer de 250 mL e agitou-se suavemente;
- Preparação da amostra: Removeu-se a tampa de um frasco para o intervalo selecionado. À posterior segurou-se o frasco em um ângulo de 45 graus, usando uma pipeta limpa para adicionar 2,00 mL de amostra ao frasco.
- Preparação do branco: Removeu-se a tampa de um segundo frasco para o intervalo selecionado. À posterior segurou-se o frasco em um ângulo de 45 graus, usando uma pipeta limpa para adicionar 2,00 mL de água destilada ao frasco.
- Segurou-se os frascos pela tampa, invertendo suavemente várias vezes para misturar. Os frascos ficam muito quentes durante a mistura por essa razão de segurar pela tampa;
- Colocou-se os frascos no reactor DRB200 pré-aquecido e fechou-se a tampa;
- Foram colocados a aquecer os frascos por 2 horas a uma temperatura de 150 °C;
- Desligou-se a energia do reactor. Deixando os frascos esfriarem no reactor por aproximadamente 20 minutos.
- Inverteu-se cada frasco várias vezes ainda morno.

Parte II

- Usou-se o espectrofotômetro DR 1900 para análise do valor de DQO;
- Colocou-se o frasco branco no instrumento para zerar;
- Depois foi colocado o frasco com amostra e o DR 1900 fez a leitura de DQO;



Figura. A6-8: Análise de DQO parte I (Termoreactor Lovibond RD 125)

Parte II

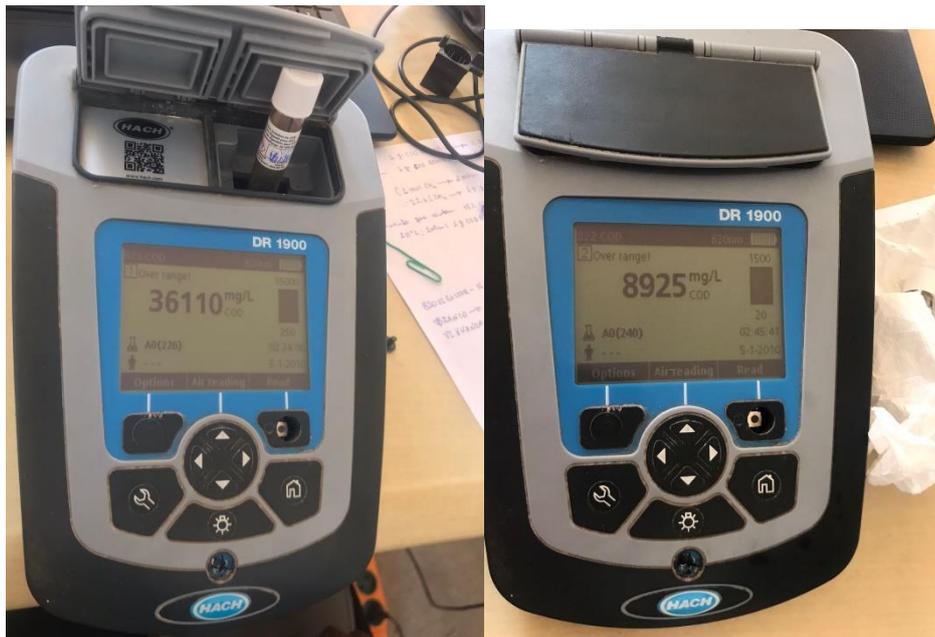


Figura. A6-9: Análise de DQO parte II (Heach DR 1900).

A-7: Determinação da Demanda Bioquímica de Oxigênio- DBO

Princípio de medição

A unidade de medição de DBO, compreendendo o frasco de teste e o sensor de DBO, é um sistema fechado. Com a quantidade de amostra cheia, há um compartimento de gás com uma quantidade definida de ar no frasco de teste. As bactérias na amostra enchida na garrafa (a amostra pode ser usada diluída ou não diluída) consomem o oxigênio dissolvido na amostra durante a medição de DBO. É substituído por oxigênio do ar do compartimento de gás do frasco de teste. O dióxido de carbono que se desenvolve simultaneamente é quimicamente ligado pelo hidróxido de potássio no copo de vedação do frasco de teste. Como resultado, ocorre uma queda de pressão no sistema, que é medida pelo sensor DBO e mostrada directamente no visor como um valor BOD em mg/l O_2 .

Amostragem: recipientes de vidros

Tipo de amostra: com reagentes para alteração do pH

Volume: 400 mL

Preservação: refrigeração

Tempo de armazenamento: 2h

Instrumentos: Incubadora Lovibond DB 600

Procedimento

- Foi feito o teste o valor de pH da amostra, o valor de pH ideal situa-se entre o pH 6,5 e 7,5. Qualquer desvio maior fornece um valor de BOD mais baixo;
- Nas amostras em que o valor do pH era muito baixo foi neutralizado com uma solução de hidróxido de sódio;
- A amostra foi bem misturada, deixada e homogeneizada;
- Mediu-se a quantidade exata de amostra necessária com o balão volumétrico de transbordo apropriado e adicionado ao frasco de teste (usando um funil conforme necessário);
- Os volumes de amostra especificados foram preenchidos com muita precisão;
- Estimou-se a faixa de medição da amostra a ser testada e o volume da amostra;
- Colocou-se a barra de agitação magnética na garrafa BOD;
- Aparafusou-se os sensores BOD nas garrafas de teste;
- Pendurou-se a amostra no porta-garrafas;
- Iniciou-se o teste;
- Incubou-se a amostra de acordo com as especificações (BOD5 a 20°C).



Figura. A7-11: Análise de DBO (Lovibond DB 600)

B. Anexo 2: CONSTRUÇÃO DO BIODIGESTOR

Biodigestores 0, 1 e 5

Uma mangueira foi colocada nos biodigestores 0,1 e 5 (garrafas pets de 1500, 1500 e 5000 mL respectivamente) e no biodigestor 0 ligou-se à outra garrafa pet de 1000 mL, um outro pedaço da mangueira para saída da garrafa pet até ao balão que armazenará o biogás. Para os B1 e B5 foram usadas garrafas graduadas para fazer o acompanhamento do deslocamento do liquido. Foi preciso vedá-los com cola para evitar possíveis vazamentos.

Para todos os biodigestores 0, 1, 2, 3, 4 e 5 foram utilizados os seguintes materiais:

- Garrafas de água mineral – 1500 e 5000mL
- Garrafas pet – 1000 mL
- Garrafas de vidro de 2500 mL
- Tigela Plástica
- Mangueira transparente – 0,8 metros
- Balão de festa simples
- Tubo de ensaio de vidro 1000 mL
- Cola

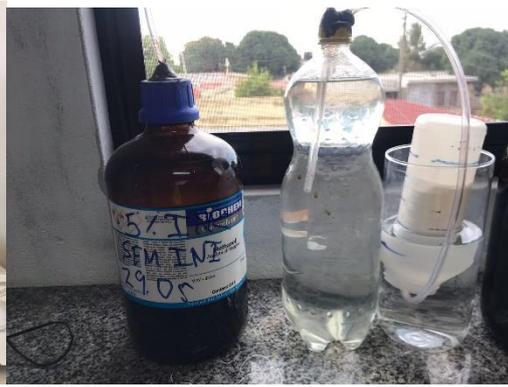


(a)

(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura. B1-2: Biodigestores construídos para a realização das experiências.

Os modelos dos biodigestores 2,3 e 4 foram os mesmos que os outros, porém, usou-se garrafas de vidro de 2500 mL além das garrafas pet.

(a)- Reactor "0" 80% Vinhaça + 20% inóculo, sem reagentes

(b)- Reactor 1 – 100% Vinhaça sem adição de Inibidores (R1)

(c)- Reactor 2 – 100% Vinhaça + inibidores (R2)

(d)- Reactor 3 – 95% Vinhaça + 5% inóculo sem adição de inibidores (R3)

(e)- Reactor 4 – 95% Vinhaça + 5% inóculo com adição de inibidores (R4)

(f)- Reactor 5 – 99% Vinhaça + 1% inóculo com adição de inibidores (R5)

C. Anexo 3. Volumes deslocados e acumulados

Tabela. C1-1: Volumes deslocados e acumulados

Data	R1- 100% Vinhaça sem inibidores		R2- 100% Vinhaça com inibidores		R3- 95%Vinhaca + 5 % inoculo, sem inibidores		R4- 95%Vinhaca + 5 % inoculo, com inibidores		R5 -99% Vinhaça + 1% inoculo com inibidores	
	Volume deslocado (mL)	Volume acumulado (mL)	Volume deslocado (mL)	Volume acumulado (mL)	Volume deslocado (mL)	Volume acumulado (mL)	Volume deslocado (mL)	Volume acumulado (mL)	Volume deslocado (mL)	Volume acumulado (mL)
30/06/2023	0	0	2	2	16	16	5	5	2	2
02/06/2023	15	15	10	12	10	26	4	15	6	8
06/06/2023	25	40	5	17	30	56	15	30	2	10
08/06/2023	18	58	15	32	20	76	10	40	10	20
10/06/2023	13	71	2	34	25	101	5	45	20	40
12/06/2023	20	77	10	44	35	136	0	45	25	65
13/06/2023	12	8	5	49	10	146	20	65	0	65
14/06/2023	10	99	20	69	10	156	5	67	12	77
16/06/2023	30	139	4	73	30	186	25	92	12	89
19/06/2023	25	164	8	81	20	206	20	102	8	97
21/06/2023	10	174	0	81	25	229	15	117	20	117
23/06/2023	20	194	15	96	15	244	20	127	15	122
26/06/2023	15	209	10	106	20	264	10	137	10	132
28/06/2023	15	224	15	121	25	289	15	152	20	142
30/06/2023	10	234	8	129	15	304	8	158	15	157
02/07/2023	0	234	10	139	0	304	0	158	5	162

D. Anexo 4: Condições de operação dos reactores e valores das concentrações dos reagentes.

O Valor de pH para a amostra colocada no frasco para primeira incubação de DBO, sem as concentrações dos reagentes é mostrado na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor	Volume total (mL)
pH	7,23	400

O Valor de pH para a amostra colocada no frasco para incubação com concentrações dos reagentes é mostrado na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor	Volume total (mL)
pH	6,98	400

O Valor de pH para a amostra colocada no frasco para segunda incubação de DBO sem adição dos reagentes é mostrado na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor	Volume total (mL)
pH	6,97	400

O Valor de pH para a amostra colocada no frasco para incubação de DBO com 50% das concentrações dos reagentes é mostrado na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor	Volume total (mL)
pH	7,48	400

O Valor de pH para a amostra colocada no frasco para incubação com 20% das concentrações dos reagentes sem sacarose é mostrado na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor	Volume total (mL)
pH	7,48	400

Concentração dos reagentes (inibidores) na amostra com 50% das concentrações dos reagentes, é mostrada na tabela abaixo.

Reagente	Concentração (grama/ litro)	Quant.(g) no Volume de 0,4L	50% da Quantidade (g) no Volume de 0,4L
Sacarose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁) (1g sacarose = 1.12 g COD)	4.0	1.6	0.8
Bicarbonato de Sódio (NaHCO ₃)	5	2	1
Hidrogenofosfato de potássio (K ₂ HPO ₄)	3	1.2	0.6
Dihidrogenofosfato de potássio (KH ₂ PO ₄)	2	0.8	0.4
Cloreto de Amônio (NH ₄ Cl)	0.5	0.2	0.1

Concentração dos reagentes (inibidores) na amostra da primeira incubação de DBO com concentrações reagentes recomendadas, é mostrada na tabela.

Reagente	Concentração (grama/ litro)	Quantidade (g) no Volume de 0,4L
Sacarose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁) (1g sacarose = 1.12 g COD)	4.0	1.6
Bicarbonato de Sódio (NaHCO ₃)	5	2
Hidrogenofosfato de potássio (K ₂ HPO ₄)	3	1.2
Dihidrogenofosfato de potássio (KH ₂ PO ₄)	2	0.8
Cloreto de Amônio (NH ₄ Cl)	0.5	0.2

Concentração dos reagentes (inibidores) na amostra com 20% das concentrações dos reagentes sem sacarose é mostrada na tabela.

Reagente	Concentração (grama/ litro)	Quantidade (g) no Volume de 0,4L	20% da Quantidade (g) no Volume de 0,4L
Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3)	5	2	1
Hidrogenofosfato de potássio (K_2HPO_4)	3	1.2	0.6
Dihidrogenofosfato de potássio (KH_2PO_4)	2	0.8	0.4
Cloreto de Amónio (NH_4Cl)	0.5	0.2	0.1

Concentrações dos reagentes (inibidores) para o segundo reactor estão apresentados na tabela abaixo.

Reagente	Concentração (grama/ litro)	Quantidade (g) no Volume de 2,3L
Sacarose ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) (1g sacarose = 1.12 g COD)	4.0	9.2
Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3)	5	11.5
Hidrogenofosfato de potássio (K_2HPO_4)	3	6.9
Dihidrogenofosfato de potássio (KH_2PO_4)	2	4.6
Cloreto de Amónio (NH_4Cl)	0.5	1.15

Concentrações dos reagentes (inibidores) para o quarto reactor estão apresentados na tabela abaixo.

Reagente	Concentração (grama/ litro)	Quantidade (g) no Volume de 2,3L
Sacarose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁) (1g sacarose = 1.12 g COD)	4.0	9.2
Bicarbonato de Sódio (NaHCO ₃)	5	11.5
Hidrogenofosfato de potássio (K ₂ HPO ₄)	3	6.9
Dihidrogenofosfato de potássio (KH ₂ PO ₄)	2	4.6
Cloreto de Amónio (NH ₄ Cl)	0.5	1.15

Concentrações dos reagentes (inibidores) para o quinto reactor estão apresentados na tabela abaixo.

Reagente	Concentração (grama/ litro)	Quantidade (g) no Volume de 1,4L
Sacarose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁) (1g sacarose = 1.12 g COD)	4.0	5.6
Bicarbonato de Sódio (NaHCO ₃)	5	7.0
Hidrogenofosfato de potássio (K ₂ HPO ₄)	3	4.2
Dihidrogenofosfato de potássio (KH ₂ PO ₄)	2	2.8
Cloreto de Amónio (NH ₄ Cl)	0.5	0.70

D-2: Condições de operação dos reactores

Reactor 1 – 100% Vinhaça sem adição de Inibidores (R1)

Os Valores de pH e DQO (mg/L) para as amostras colocadas no primeiro reactor são mostrados na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor	Volume total (L)
pH	7,54	4,8
DQO (mg/L)	11376	

Reactor 2 – 100% Vinhaça + inibidores (R2)

Os Valores de pH e DQO (mg/L) para as amostras colocadas no segundo reactor são mostrados na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor	Volume total (L)
pH	6,58	2,3
DQO (mg/L)	11376	

Reactor 3 – 95% Vinhaça + 5% inóculo sem adição de inibidores (R3)

Os Valores de pH e DQO (mg/L) para as amostras colocadas no terceiro reactor são mostrados na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor	Volume total (L)
pH	7,28	2,3
DQO (mg/L)	11376	

Reactor 4 – 95% Vinhaça + 5% inóculo com adição de inibidores (R4)

Os Valores de pH e DQO (mg/L) para as amostras colocadas no quarto reactor são mostrados na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor	Volume total (L)
pH	7,46	2,3
DQO (mg/L)	11376	

Reactor 5 – 99% Vinhaça + 1% inóculo com adição de inibidores (R5)

Os Valores de pH e DQO (mg/L) para as amostras colocadas no quinto reactor são mostrados na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor	Volume total (L)
pH	7,34	1,4
DQO (mg/L)	11376	

D-3:Tabela de resultados dos nutrientes e metais na caracterização da vinhaça.

Parâmetros	Amostra 1	Amostra 2	Unidades
Cloretos	0,1605	0,2366	mg/L
Ferro	0,0064	0,01	mg/L
Sulfatos	0,8309	1,2535	mg/L
Zinco	0,0073	0,0129	mg/L
Cobre	0,0259	0,0415	mg/L
Potássio	0,1014	0,1028	mg/L
Nitrato	0,0029	0,0042	mg/L
Manganês	0,0323	0,039	mg/L
Fosforo	0,0126	0,0243	mg/L
Níquel	0,0338	0,0507	mg/L

D-4: Tabelas de resultados dos percentuais dos sólidos, antes e depois.

	R1	R2	R3	R4	R5
% ST inicial	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7
%ST final	7,81	9,05	7,39	7,7	4,72
%STF inicial	30,51	30,51	30,51	30,51	30,51
%STF final	34,7	37,47	48,4	41,84	71,24
%SV inicial	69,48	69,48	69,48	69,48	69,48
%SV final	65,31	62,76	51,6	58,16	28,76

E. Anexo 5: Tabelas de resultados da caracterização dos efluentes antes e depois da biodigestão.

Tabela. E1-1: Resultados da caracterização dos sólidos dos 5 reactores depois da biodigestão anaeróbica.

Cadinho	Cad. Vazio (g)	Pamos+Cvazio	Peso da Amostra (g)	Peso a 110C (g)	Peso a 550C (g)	ST (mg/l)	STF (mg/l)	STV (mg/l)	%ST	%STF	%STV
Cadinho 1	27,2805	46,9641	19,6836	28,8191	27,8182	76930	26885	50045	7,816659554	34,94735474	65,05264526
Cadinho 2	27,4109	47,1063	19,6954	28,9492	27,9407	76915	26490	50425	7,810453202	34,44061626	65,55938374
Media						76922,5	26687,5	50235	7,813556378	34,6939855	65,3060145
Cadinho 3	25,9937	44,2514	18,2577	27,6372	26,6095	82175	30790	51385	9,001681482	37,46881655	62,53118345
Cadinho 4	29,144	48,2151	19,0711	30,8801	29,7863	86805	32115	54690	9,103302903	36,99671678	63,00328322
Media						81490	31452,5	53037,5	9,052492193	37,23276666	62,76723334
Cadinho 5	25,0968	43,6692	18,5724	26,4695	25,6062	68635	25470	43165	7,391074928	37,10934654	62,89065346
Cadinho 6	44,8124	62,7671	17,9547	46,1423	45,6062	66495	39690	26805	7,406974218	59,6886984	40,3113016
Media						67565	32580	34985	7,399024573	48,39902247	51,60097753
Cadinho 7	27,9269	47,6909	19,764	29,4909	28,6122	78200	34265	43935	7,913377859	43,81713555	56,18286445
Cadinho 8	27,5145	46,7346	19,2201	28,9562	28,0892	72085	28735	43350	7,501001556	39,86266213	60,13733787
Media						75142,5	31500	43642,5	7,707189707	41,83989884	58,16010116
Cadinho 9	25,4072	45,6009	20,1937	26,3852	26,1066	48900	34970	13930	4,843094629	71,51329243	28,48670757
Cadinho 10	25,9603	44,9781	19,0178	26,8369	26,5823	43830	31100	12730	4,609365962	70,95596623	29,04403377
Media						46365	33035	13330	4,726230295	71,23462933	28,76537067

Tabela. E2-2: Resultados da caracterização dos sólidos das duas amostras de vinhaça.

Tipo de Amostra	#	Cad. Vazio (g)	Peso da Amostra (g)	Peso a 110C (g)	Peso a 550C (g)	ST (mg/l)	STF (mg/l)	STV (mg/l)	%ST	%STF	%STV
AM1 Vinhaça	Cadinho 1	36,3785	23,6489	38,4733	37,0931	83792	28584	55208	8,857917282	34,11304	65,88696
	Cadinho 2	29,1752	22,0336	31,1786	29,8429	80136	26708	53428	9,092476944	33,32834	66,67166
	Cadinho 3	27,411	20,6323	29,1972	28,0105	71448	23980	47468	8,657299477	33,56287	66,43713
	Média					78458,67	26424	52034,67	8,869231234	33,66808	66,33192
AM1 Vinhaça	Cadinho 1	27,4086	19,4708	29,0922	27,9282	84180	25980	58200	8,646794174	30,86244	69,13756
	Cadinho 2	27,9263	18,6685	29,56342	28,425	81856	24935	56921	8,769424432	30,46203	69,53797
	Cadinho 3	36,3905	55,5784	38,0468	36,891	82815	25025	57790	2,980114577	30,21796	69,78204
	Média					82950,33	25313,33	57637	8,708109303	30,51414	69,48586

Tabela. E3-2: Resultados da caracterização dos sólidos no inóculo.

Tipo de Amostra	#	Cadin Vazio (g)	Peso da Amostra (g)	Peso a 110C (g)	Peso a 550C (g)	ST (mg/l)	STF (mg/l)	STV (mg/l)	%ST	%STF	%STV
Inóculo	Cadinho 1	27,926	23,8092	28,0635	27,9795	6875	2675	4200	0,577508	38,90909	61,09091
	Cadinho 2	42,4563	21,7631	42,5817	42,5038	6270	2375	3895	0,576205	37,87879	62,12121
	Cadinho 3	38,756	21,3663	38,8784	38,802	6120	2300	3820	0,572865	37,5817	62,4183
	Cadinho 4	36,3777	19,6362	36,4926	36,4198	5745	2105	3640	0,585144	36,64056	63,35944
	Média					6252,5	2363,75	3888,75	0,57793	37,75253	62,63299

