



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química
Curso de Engenharia Química

Design do fluxograma de processos da produção de biogás através da digestão anaeróbica da vinhaça.

Aluno: Rodolpho Lins Ribeiro Alves

Engenheiro Químico

Orientador: Giovanilton Ferreira da Silva

Engenheiro Químico

João Pessoa, 04/04/2023

Rodolpho Lins Ribeiro Alves

**Design do fluxograma de processos da produção de biogás através da
digestão anaeróbica da vinhaça.**

Trabalho Final de Curso apresentado a
Universidade Federal da Paraíba-UFPB,
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Giovanilton Ferreira
da Silva

João Pessoa – PB

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

R695d Rodolpho Lins Ribeiro Alves.

Design do fluxograma de processos da produção de biogás através da digestão anaeróbica da vinhaça. / Rodolpho Lins Ribeiro Alves. - João Pessoa, 2023.
0 f. : il.

Orientação: Giovanilton Ferreira da Silva.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Biodigestão Anaeróbia. I. Ferreira da Silva, Giovanilton. II. Título.

UFPB/BCCT

CDU 66.01(043.2)

Rodolpho Lins Ribeiro Alves

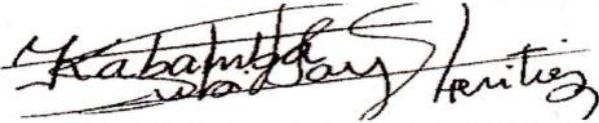
**Design do fluxograma de processos da produção de biogás através da
digestão anaeróbica da vinhaça.**

Trabalho Final de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Química
da Universidade Federal da Paraíba como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

APROVADO EM: 2023


Giovanilton Ferreira da Silva
Dr. Giovanilton Ferreira da Silva
Mat. SIAPE 1575139


Engenheiro Caio Okamoto


Engenheiro Heritier Kabamba Subssay

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a todos que estiveram do meu lado ao longo desses árduos anos de graduação com um grande foco em Angela Maria Lins Ribeiro Alves, Severino Alves Correia Filho e Lucas Lins Ribeiro Alves, que corresponde a minha amada família que sempre esteve do meu lado.

Esses últimos períodos de graduação fizeram com que essa família aumentasse mais e gostaria de deixar essa página destinada a essa pessoa, a minha noiva Jacyara Florêncio Ferreira pessoa essa que sempre me apoiou independente da minha decisão e que eu amo tanto.

Para finalizar, gostaria de agradecer a todos que contribuíram para a minha formação, mas de todos em relação a área de engenharia química eu gostaria de agradecer bastante aos professores Giovanilton Ferreira da Silva, Nagel Alves Costa, Heritier Kabamba Subissay e com toda certeza ao professor Vital de Souza Queiroz e Caio Okamoto, pessoas essas que foram muito importantes para que eu me tornasse o profissional que sou hoje.

Rodolpho Lins Ribeiro Alves

João Pessoa, 08/04/2023

Resumo

Com a crescente demanda por energia renovável e proteção ambiental, a tecnologia de digestão anaeróbica para a produção de biogás tem atraído atenção considerável em torno do mundo. A digestão anaeróbica é um processo biológico que converte a matéria orgânica em um gás rico, o metano. É uma tecnologia bem estabelecida para o tratamento de resíduos e efluentes com alto conteúdo orgânico, provenientes de processos industriais e atividades domésticas. Neste estudo, a vinhaça, um subproduto da indústria sucroalcooleira, foram avaliados para produção de biogás em reator UASB. Apresentando assim, uma forma alternativa para o tratamento da vinhaça podendo diminuir os impactos ambientais da Fertirrigação e gerar uma nova fonte lucrativa que é a geração de biogás, que pode ser utilizada em caldeiras a gás para geração de energia elétrica ou para injetar nas linhas nacionais de gás natural.

Palavras-chave: metanização; energia sustentável; biorreator

Abstract

With the growing demand for renewable energy and environmental protection, anaerobic digestion technology for biogas production has attracted considerable attention around the world. Anaerobic digestion is a biological process that converts organic matter into a rich gas, methane. It is a well-established technology for treating waste and effluents with high organic content from industrial processes and domestic activities. In this study, vinasse, a by-product of the sugar and alcohol industry, was evaluated for the production of biogas in a UASB reactor. Thus, presenting an alternative way for the treatment of vinasse, which can reduce the environmental impacts of Fertirrigation and generate a new profitable source, which is the generation of biogas, which can be used in gas boilers to generate electricity or to inject into national lines. of natural gas.

Keywords: methanization; sustainable energy; bioreactor

Sumário

Agradecimentos	3
Resumo	6
1. Introdução	12
2. Objetivos	13
3. Fundamentação Teórica	13
3.1 Digestão anaeróbica	13
3.2 Hidrólise	14
3.3 Acidogênese	15
3.4 Acetogênese	15
3.5 Metanogênese	16
3.6 Parâmetros que influenciam na digestão	17
3.6.1 Pressão parcial de hidrogênio	18
3.6.2 Temperatura	18
3.6.3 pH	19
3.7 Vinhaça	20
3.8 Composição Química da vinhaça	20
3.9 O uso da vinhaça de cana-de-açúcar no Brasil	21
3.10 Biodigestores	22
3.11 Biodigestor UASB	23
3.12 Parâmetros que interferem na digestão anaeróbica em reatores UASB	24
3.13 Dimensionamento do UASB	25

3.14	Purificação	26
3.15	Remoção de água	28
3.16	Remoção de H ₂ S	29
4	Resultados	29
5	Variabilidade Econômica	32
6	Conclusão	34
7	Referencias	34

Lista de Figuras

Figura 1: Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese	14
Figura 2: Mecanismo de hidrólise.....	14
Figura 3: Exemplo da reação de Strickland (decomposição do amino ácido),	15
Figura 4: (a) Formação de metano pelo acetato; (b) formação de metano pelo dióxido de carbono.....	17
Figura 5: Equilíbrio químico entre dióxido de carbono- íon bicarbonato	19
Figura 6: Projeto de Fabricação Etanol.....	20
Figura 7: Reator UASB.....	23
Figura 8: Etapas de tratamento e purificação do biogás para concentração do biometano de acordo com seu uso final.....	28
Figura 9: Processos tecnológicos mais comumente observados para a dessulfurização do biogás	29
Figura 10: Fluxograma do Processo, Fonte elaboração Própria	30
Figura 11: Simulação do Processo	31
Figura 12: Fluxo de caixa durante a execução do projeto.	33

Lista de Tabelas

Tabela 1:Reações acetogênicas.....	16
Tabela 2:Reação de metanogenese	17
Tabela 3:Faixa de operação ótima dos principais parâmetros do processo de digestão anaeróbia	18
Tabela 4:Faixa de operação dos microorganismos	19
Tabela 5:Composição média da vinhaça.....	21
Tabela 6:Configuração da digestão.....	22
Tabela 7:Características físico-químicas da vinhaça - Usina São Martinho.....	24
Tabela 8:Informações do projeto	26
Tabela 9: Principais impurezas do biogás, problemas gerados e requisitos de qualidade para fins energéticos	28
Tabela 10:Vantagens e desvantagens das técnicas de remoção de água do biogás	29
Tabela 11: Resultados da simulação, Fonte elaboração própria	32
Tabela 12: lista de equipamentos e perifericos, Fonte elaboração própria	33

1. Introdução

A revolução industrial conduziu a humanidade, por um lado, na direção de benefícios, facilidades e conforto. Por outro lado, alterou de forma significativa e cada vez mais intensa a relação entre homem e natureza. Para as atividades industriais, a demanda por recursos energéticos, insumos e matérias-primas levaram a sociedade a buscar estas alternativas na natureza. Consequentemente, a geração de resíduos de processo e produtos utilizados, que não são dispostos ou tratados de forma incorreta, contribuiu maciçamente nas alterações ambientais.

A geração de resíduos sólidos na sociedade tornou-se um problema de grande relevância, com reflexos que extrapolam a área ambiental, visto que a ausência de sustentabilidade do ciclo linear de produção e descarte de materiais esgota as reservas naturais de forma mais rápida e causam a degradação do meio ambiente. Estes reflexos da ausência de um criterioso planejamento de ações para o gerenciamento de resíduos sólidos impactam na área social, que está integrada aos aspectos ambientais do planeta. Dessa forma, a digestão anaeróbia apresenta um grande potencial para o tratamento desses resíduos, pois é um processo metabólico que depende da atividade conjunta de uma associação de microrganismos para transformar material orgânico em dióxido de carbono e metano, gerando assim uma fonte de energia.

No Brasil, a cana de açúcar é cultivada em larga escala para a produção de combustível automotivo. O álcool é o único produto, porém, existe a geração de uma grande quantidade de gases e subprodutos líquidos e sólidos, que apresentam valores muito pequenos ou até mesmo negativo. A vinhaça é considerada o principal resíduo líquido da produção de etanol. Para cada litro de etanol produzido, cerca de 15 litros de vinhaça é gerado (Souza et al, 2005). A vinhaça é caracterizada como um efluente com enorme potencial poluente, contendo uma elevada concentração de demanda química de oxigênio e demanda bioquímica de oxigênio, baixo pH e concentrações elevadas de compostos de baixo peso molecular (Xavier,2012). Devido as suas características físico-químicas, a vinhaça é geralmente utilizada como fertilizante, apresentando algumas vantagens em termos de crescimento e produtividade da cana (Sydney, 2014). No entanto, a sua eliminação direta no ambiente pode poluir o solo e as águas subterrâneas devido ao seu alto teor de matéria orgânica e de sólidos dissolvidos que são tóxicos ou poderiam ser contaminantes sob certas condições.

Dessa forma, as indústrias sucroalcooleiras procuram por alternativas mais racionais para a utilização da vinhaça. Em virtude da sua elevada carga orgânica, a digestão anaeróbia apresenta-se como uma alternativa mais adequada em função da sua simplicidade e baixo

consumo energético. O processo de biodigestão anaeróbia da vinhaça irá consistir na biodegradação de sua carga orgânica e demais sólidos solúveis diminuindo assim o potencial poluente, fornecendo como produto biogás e um biofertilizante com reduzida carga orgânica sem, no entanto, alterar suas propriedades fertilizantes (Torquato,2015).

2. Objetivos

2.1 objetivo geral

O objetivo geral é realização de um estudo bibliográfico sobre a utilização da vinhaça para a produção de biogás e avaliar o processo como um todo.

2.2 Objetivo específico

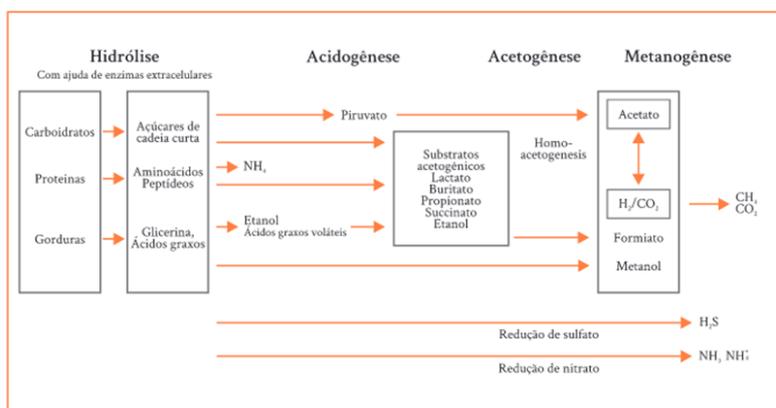
- Estudo bibliográfico do processo.
- Criação do Fluxograma da unidade de produção
- Simulação do processo
- Variabilidade Econômica

3. Fundamentação Teórica

3.1 Digestão anaeróbica

A digestão anaeróbia é um processo metabólico que requer condições anaeróbias e depende da atividade conjunta de microrganismo para converter material orgânico em dióxido de carbono e metano. O processo pode ser dividido em quatro etapas, sendo: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e metanogênese. Onde cada etapa é realizada por determinados grupos de microrganismo, e podem requerer diferentes condições ao longo do processo.

Figura 1: Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese

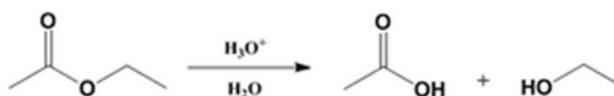


Fonte: Kuntz et al, 2022

3.2 Hidrólise

A hidrólise é a etapa que irá degradar os compostos de maior peso molecular como lipídios, polissacarídeos e proteínas em substâncias orgânicas de menor peso molecular aumentando a solubilidade das mesmas. Esse processo ocorre devido as enzimas extracelulares que foram excretadas pelas bactérias hidrolíticas. A importância do processo de hidrólise no processo de degradação depende das características do substrato, se a matéria orgânica presente no substrato for de alta complexidade a degradação se torna difícil fazendo com que o tempo do processo aumente de poucas horas chegando até dias. Sendo assim, o processo de hidrólise pode apresentar uma grande importância na velocidade de reação global, podendo ser considerado como a etapa limitante da velocidade da digestão anaeróbia.

Figura 2: Mecanismo de hidrólise



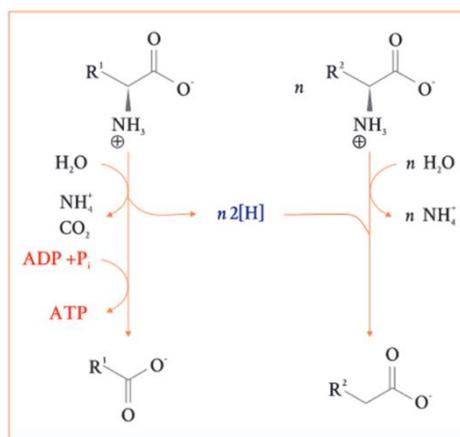
Fonte: Mcmurry, 2018

3.3 Acidogênese

Os compostos orgânicos de cadeia mais simples formados na fase hidrolítica são utilizados por diferentes bactérias anaeróbias, sendo degradado na fase acidogênica a ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas de um a cinco carbonos, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono, a pressão parcial de hidrogênio durante esse processo afeta diretamente o estado de oxidação dos produtos. Se for elevada, resultarão em produtos com maior quantidade de carbono.

Na Acidogênese, os carboidratos, como glicose, são degradados em piruvato. Esse produto é convertido em ácido láctico por Lactobacillales e em etanol pela ação de leveduras. Já os ácidos graxos são degradados, por exemplo, pela Acetobacter por oxidação. Portanto, os ácidos graxos devem ser ligados a coenzima A e a oxidação ocorre passo a passo através da liberação sequencial de duas unidades de carbono, na forma de acetato. Já os aminoácidos são degradados em pares pelo Clostridium Botulinum através da reação de Strickland (Figura abaixo), onde um aminoácido serve como doador de elétron e outro como aceptor.

Figura 3: Exemplo da reação de Strickland (decomposição do amino ácido),



Fonte: Kuntz, 2022

3.4 Acetogênese

A terceira etapa da digestão anaeróbia é conduzida por um grupo de bactérias denominadas de bactérias acetogênicas, bactérias essas que estabelecem uma relação de parasitismo com as áqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. Nessa etapa os ácidos de cadeia longa são transformados em ácidos com apenas um ou dois átomos carbonos,

com a produção de hidrogênio e dióxido de carbono. A simbiose entre organismos dos grupos microbianos distintos possibilita que ambos apresentem crescimento, assegurando a viabilidade de produção de acetato a partir de ácidos orgânicos.

Tabela 1: Reações acetogênicas

Nome	Ácido conjugado	Reação química/ composto químico	ΔG (kJ.mol ⁻¹)
Dióxido de carbono/ hidrogênio		$2CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_3COOH + 2H_2O$	-104,6
Formiato	Ácido fórmico	HCOOH	
Acetato	Ácido acético	CH ₃ COOH	
Propionato	Ácido propiônico	$CH_3(CH_2)COOH + 2H_2O \rightleftharpoons CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$	+76,1
Butirato	Ácido butírico	$CH_3(CH_2)_2COOH + 2H_2O \rightleftharpoons 2CH_3COOH + 2H_2$	+48,1
Lactato	Ácido láctico	$CH_3CHOHCOOH + 2H_2O \rightleftharpoons CH_3COOH + HCO_3^- + H^+ + 2H_2$	-4,2
	Etol	$CH_3(CH_2)OH + H_2O \rightleftharpoons CH_3COOH + 2H_2$	+9,6

Fonte: Kuntz 2022

3.5 Metanogênese

A metanogênese ocorre em condições estritamente anaeróbia. Dessa forma, o carbono contido na biomassa é convertido em dióxido de carbono e metano através das bactérias arqueas metanogênicas, que são divididas de acordo com suas vias metabólicas em acetoclástica e hidrogenotróficas. As bactérias acetoclásticas são as responsáveis pela conversão do acetato a metano e as hidrogênótroficas convertem o hidrogênio e dióxido de carbono no metano (Kuntz, 2022).

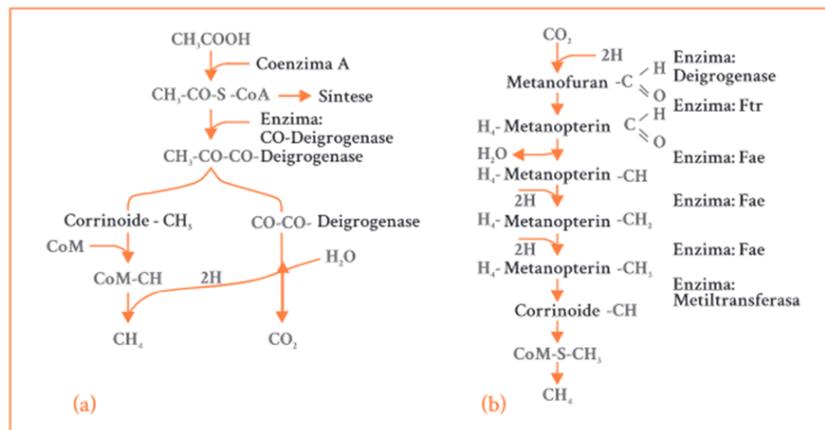
As bactérias acetoclásticas são mais sensíveis a mudança de pH e elevadas concentrações de amônia, a qual é uma característica da vinhaça. Esse fato pode implicar que na digestão da vinhaça exista um predomínio das bactérias hidrogenotróficas e devido à ausência das acetoclásticas, o acetato produzido durante a biodigestão é oxidado por bactérias homoacetogênicas produzindo CO₂ e H₂ os quais serão utilizados pelas metanogênicas hidrogenotróficas, produzindo o metano.

Tabela 2: Reação de metanogênese

Reação química	ΔG (kJ.mol ⁻¹)	Nome
$4H_2 + HCO_3^- + H^+ \rightleftharpoons CH_4 + 3H_2O$	-135,4	Várias espécies
$CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_4 + 2H_2O$	-131,0	
$4HCOO^- + H_2O + H^+ \rightleftharpoons CH_4 + 3HCO_3^-$	-130,4	Várias espécies
$CH_3COO^- + H_2O \rightleftharpoons CH_4 + HCO_3^-$	-30,9	Algumas espécies
$4CH_3OH \rightleftharpoons 3CH_4 + HCO_3^- + H^+ + H_2O$	-314,3	
$CH_3OH + H_2 \rightleftharpoons CH_4 + H_2O$	-113,0	<i>Methanobacterium</i> <i>Methanospirillum</i>
$2CH_3CH_2OH + CO_2 \rightleftharpoons CH_4 + 2CH_3COOH$	-116,3	<i>Methanosarcina</i>

Fonte: Kuntz, 2022

Figura 4:(a) Formação de metano pelo acetato; (b) formação de metano pelo dióxido de carbono.



Fonte: Kuntz, 2022

3.6 Parâmetros que influenciam na digestão

O metabolismo dos microrganismos é dependente de diversos fatores, com isso, para um ótimo processo de fermentação o máximo possível desses parâmetros deve ser respeitado

Tabela 3: Faixa de operação ótima dos principais parâmetros do processo de digestão anaeróbia

Parâmetros	Faixa geral	Hidrólise e Acidogênese	Metanogênese
pH	6,8 – 7,4	5,2 – 6,3	6,7 – 7,5
Temperatura (°C)	Mesofílica: 35 Termofílica: 55	25 -35	32 - 42 50 – 58
Ácidos graxos voláteis totais (mg/L de ácido acético)	50 - 250	-	-
Ácido acético (mg/L)	<1000	-	-
Ácido propiônico (mg/L)	<250	-	-
Potencial redox (mV)	-200 à -350	+400 à -300	<-250
Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃)	1500-3000	-	-
Relação C/N	-	10 - 45	20 - 30
Relação C: N: P	350:7:1	100:5:1	120:5:1
Hidrogênio (H ₂) (mg/L)	<100		

Fonte: KHANAL, 2008; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011.

3.6.1 Pressão parcial de hidrogênio

A pressão parcial de hidrogênio apresenta um papel fundamental na metanogênese. Sendo assim, existe uma simbiose estreita entre os microrganismos produtores e consumidores de hidrogênio molecular. Logo, a concentração de hidrogênio deve ser balanceada, pois os microrganismos metanogênicos necessitam do hidrogênio para a produção do metano. Por outro lado, a pressão parcial do hidrogênio deve ser baixa para que as bactérias acetogênicas não sejam inibidas pelo excesso, essa pressão parcial máxima depende das espécies de microrganismos utilizada e também das características do substrato.

3.6.2 Temperatura

A temperatura tem efeitos bem importantes nas propriedades físico-químicas dos componentes encontrados nos substratos, além de influenciar na velocidade de crescimento e no metabolismo dos microrganismos (livro de bioprocessos) e com isso a dinâmica populacional do biodigestor. o aumento de temperatura pode ter inúmeros benefícios, incluindo um aumento na solubilidade de compostos orgânicos, melhorando as velocidades de reações bioquímicas. Também há um aumento na taxa de eliminação de patógenos.

Porém, a temperatura influencia parâmetros como a dissociação da amônia, podendo ter um efeito inibitório além de afetar negativamente o crescimento de alguns microrganismos que são fundamentais (Kunz e Saqib, 2016), em geral os microrganismos podem ser classificados em função da temperatura, dividindo-se em três grandes grupos, e infelizmente as bactérias arqueas metanogênicas acetoclásticas se encontram no grupo mais sensível ao aumento da temperatura, logo em regiões de grande amplitude térmica, a produção de biogás

pode ser comprometida devido às elevadas variações de temperaturas. Para evitar possíveis problemas, a temperatura do reator não deve variar bruscamente mais do que 2 °C. É de fundamental importância o controle da temperatura da biomassa, a fim de garantir a uniformidade da geração de biogás.

Tabela 4: Faixa de operação dos microorganismos

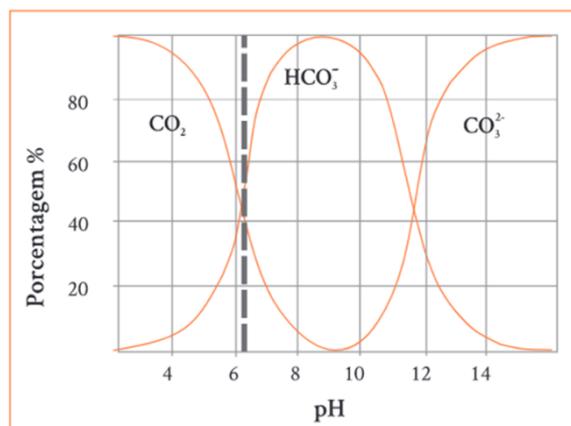
	Ótima de crescimento (°C)
Termofílicos	60
Mesofílicos	37
Psicrofílicos	15

Fonte: Kuntz, 2022

3.6.3 pH

Cada grupo de microorganismo tem um valor ótimo de pH, as bactérias metanogênicas são extremamente sensíveis ao pH, com um valor ótimo entre 6,7 e 7,5 já os microorganismos fermentativos são menos sensíveis podendo se adaptar a variações mais bruscas de pH. Os ácidos voláteis produzidos durante a biodigestão tendem a reduzir o pH do meio reacional. Essa redução é normalmente combatida pela atividade das bactérias metanogênicas, que também produzem alcalinidade na forma de dióxido de carbono, amônia e bicarbonato. Logo, o pH do sistema é controlado através da concentração de dióxido de carbono na fase gasosa e HCO_3^- alcalino na fase líquida.

Figura 5: Equilíbrio químico entre dióxido de carbono- íon bicarbonato



Fonte: Kuntz, 2022

Como mostrado no equilíbrio iônico do dióxido de carbono com a água facilmente podemos modificar o pH na medida que a concentração de HCO_3^- e o CO_3^- aumenta dentro do meio reacional. Portanto queremos manter uma faixa de CO_2 abaixo de 40% para garantir que iremos ter um pH próximo de 6,3 para favorecer todo as bactérias da digestão.

3.7 Vinhaça

O Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo e o segundo produtor mundial de etanol, sendo responsável em torno de 20% da produção e exportação mundial (ÚNICA,2015). Porém, se por um lado a atividade sucroalcooleira faz com o que o Brasil tome uma posição de destaque mundial em à produção de derivados da cana-de-açúcar, por outro, tal atividade gera uma imensa quantidade de resíduos e entre eles o mais preocupante que é a vinhaça.

A vinhaça é obtida através da destilação do etanol e representa um grande problema para o setor sucroalcooleiro devido a suas grandes quantidades produzidas e o seu grande potencial poluente. (de Prado,2017) ;(Sydney,2014).

Figura 6:Projeto de Fabricação Etanol



Fonte: Autoria Própria

3.8 Composição Química da vinhaça

A vinhaça representa uma grande mistura de água, compostos orgânicos e inorgânicos (Baez-Smith, 2006). Sua composição química pode variar a depender das características do

solo, a variedade da cana utilizada, do período de colheita, o substrato de fermentação e o processo industrial (SALOMON,2007) ;(SALOMON,2009), esse resíduo apresenta uma cor marrom claro com um teor de sólidos solúveis e um pH fortemente ácido que pode chegar até 4, segundo o trabalho de (BARROS *et al*,2010), em geral a composição da vinhaça pode apresentar:

Tabela 5: Composição média da vinhaça

Componente	Concentração
Água (%)	95-97
Demanda bioquímica de oxigênio (mg/L)	5000-10000
Demanda química de oxigênio (mg/L)	10000-210000
Glicerol (mL/L)	2,5-250
Etanol(mL/L)	0,1-120
Potássio(mg/L)	800-6500
Sulfatos (mg/L)	700-3000
Cálcio (mg/L)	70-1100
Nitrogênio (mg/L)	90-900
Magnésio (mg/L)	20-450
Fósforo (mg/L)	20-200

Fonte: Barros *et al*, 2010

3.9 O uso da vinhaça de cana-de-açúcar no Brasil

Em consequência de suas características e custo relativamente baixo, durante décadas o principal destino empregado a vinhaça no Brasil tem sido a aplicação em culturas de cana como fertilizante, do ponto de vista econômico esse descarte apresenta uma solução de menor custo e mais simples de descarte, além de resultar diversos benefícios em termos de produtividade e crescimento da cana, devido ao alto teor de matéria orgânica e nutrientes presentes na vinhaça (Sydney, 2014). Porém esse processo apresenta algumas controvérsias relacionadas com seu impacto para o solo e águas subterrâneas, pois pode promover a infiltração da vinhaça no solo contaminando os lençóis freáticos da região além de promover, acidificação e endurecimento do solo devido a seu forte pH ácido e uma crescente salinização a cada aplicação devido a quantidade de sais inorgânicos dissolvidos na vinhaça.

Sendo assim, com o passar do tempo houve um grande investimento para pesquisas afim de encontrar aplicações mais racionais para o descarte da vinhaça, a fim de diminuir os impactos ambientais devido ao descarte indiscriminado desse resíduo. Diferentes opções têm

sido propostas para utilizar a vinhaça, porém a digestão anaeróbia se destaca como tecnologia adequada para o tratamento desse resíduo. Pois, A digestão anaeróbica reduz o potencial poluidor da vinhaça, através da biodegradação de sua matéria orgânica fornecendo um fertilizante menos poluente uma vez que as cargas orgânicas de alto peso molecular foi degradada, ao mesmo tempo, tem o potencial de geração de energia através do biogás (metano).

3.10 Biodigestores

O ponto central de um sistema de tratamento anaeróbio é o modelo do biodigestor a ser utilizado. Por isso, deve-se buscar projetos adaptados aos tipos de substrato a ser tratado e o nível de investimento além das condições ambientais, os biodigestores são caracterizados pelo regime de alimentação, forma da alimentação, concentração de sólidos no reator e o seu sistema de agitação. A tabela abaixo apresenta os pontos chave para o estabelecimento de qual biodigestor deve-se utilizar.

Tabela 6: Configuração da digestão.

Tecnologia	Pontos-chave	Opções
Sistema de alimentação	Tipo de biodigestor e de matéria-prima para alimentação	Alimentação descontinua para biodigestores de batelada Alimentação contínua ou semicontínua para fluxo em pistão/digestores CSTR Sistema de alimentação sólido ou líquido, dependendo do conteúdo da matéria seca do substrato
Temperatura do reator	Risco para patógenos*	Temperatura mesofílica quando não há risco de patógenos Temperaturas termofílicas quando houver risco de patógenos (ex.: lixo orgânico doméstico)
Número de fases	Composição de substratos, risco de acidificação	Sistemas de uma fase quando não há risco de acidificação Sistema de duas fases para substratos com um elevado teor de açúcar, amido, proteínas ou de difícil degradação
Sistema de agitação	Matéria-prima seca para alimentação	Agitadores mecânicos para alta concentração de sólidos no biodigestor Sistemas de agitação mecânica, hidráulica ou pneumática para baixa concentração de sólidos no biodigestor

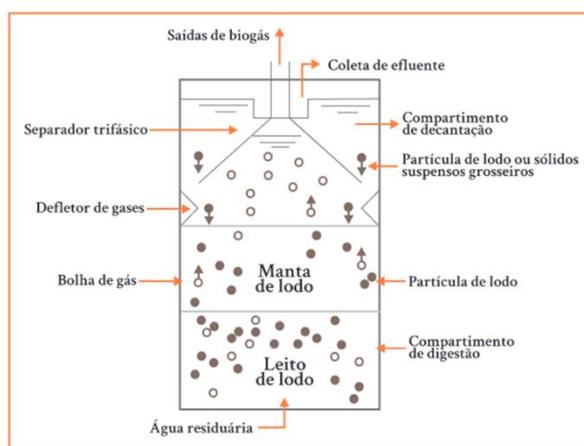
Fonte: Kuntz, 2022

Sendo assim para o processo de biodigestão da vinhaça foi optado a utilização de um sistema de alimentação contínua sob temperaturas ambientes uma vez que a vinhaça contém um baixo risco para patógeno com um sistema de agitação pneumático pois o afluente em questão corresponde a um peso em massa de 99% água, e devido as essas informações foi optado por utilizar um biodigestor do tipo *Upflow anaerobic sludge blanket* (UASB).

3.11 Biodigestor UASB

O biodigestor UASB tem como característica o fluxo ascendente do afluente por uma manta de lodo até o topo do reator, onde existe um separador trifásico como mostrado no esquema abaixo

Figura 7: Reator UASB



Fonte: Kuntz,2022

Estes reatores têm como características a alta capacidade de retenção de biomassa, permitindo trabalhar com baixos tempos de retenção hidráulica chegando no máximo até 72 horas. Além disso, os reatores apresentam grande estabilidade em situação de variação das características do afluente, além de suportar uma alta carga volumétrica de componentes orgânicos, especialmente se a matéria orgânica estiver solubilizada.

O afluente a ser tratado é bombeado pelo fundo do reator, uniformemente, e escoa através das camadas de lodo biológico ativo, onde ocorrem as reações necessárias de digestão, o efluente tratado é coletado na parte superior do reator, em vertedores. Logo a fase gasosa é separada das demais fases devido ao separador trifásico. O perfil dos sólidos no reator varia de muito, onde na base do reator localiza-se um lodo mais denso, ficando mais leve conforme vai se aproximando do topo do reator (Janssen,1998).

Esse tipo de reator já foi aplicado a digestão anaeróbia da vinhaça em algumas destilarias, na qual mostrou uma eficiência de conversão satisfatória como mostrado na tabela abaixo, além do mais a digestão anaeróbia da vinhaça tem recebido uma atenção maior apenas após o desenvolvimento dos reatores UASB, por ser mais adaptado para o tratamento da vinhaça pois possibilitam uma circularização da vinhaça através de uma região que apresenta elevada concentração de micro-organismos (Souza,2005).

Tabela 7: Características físico-químicas da vinhaça

Parâmetro	Vinhaça (antes da biodigestão)	Vinhaça (depois da biodigestão)
pH	4,0	6,9
DBO (mg/l)	29.000	9.000
Nitrogênio total (mg/l)	550	600
Nitrogênio Amoniacal (mg/l)	40	220
Fósforo P ₂ O ₅ (mg/l)	17	32
Sulfato (mg/l)	450	32
Potássio K ₂ O (mg/l)	1.400	1.400

Fonte: CORTEZ, 1996.

3.12 Parâmetros que interferem na digestão anaeróbica em reatores UASB

A tecnologia UASB traz diversas vantagens fundamentadas na menor produção de lodo e baixo gasto energético. Entretanto, traz alguns efeitos devastadores caso não sejam devidamente projetados ou operados. Contudo, para a obtenção de um processo eficiente e seguro, algumas condições básicas foram sumarizadas por Lettinga et al. (Jassen ,1998) que sempre devem ser empregadas em um reator UASB.

- Separação efetiva entre o biogás, o efluente tratado e o lodo
- O lodo anaeróbico deve apresentar boa decantabilidade e deve-se desenvolver, e se manter, preferencialmente sob a forma granular.
- A alimentação do sistema deve ser feita, sempre que possível, pelo fundo do reator, de forma a proporcionar um melhor contato entre o despejo e o lodo anaeróbico ativo;
- O arraste de partículas de lodo (grânulos) deve ser minimizado criando-se condições nas placas defletoras para que essas partículas floculem, decantem e/ou fiquem retidas em um leito de lodo secundário que se cria na superfície das placas.

Além de outros fatores como: Start-up, pH, Carga orgânica volumétrica, Tempo de retenção hidráulica e velocidade ascensional deve ser controlados a fim de garanti que o UASB apresente uma alta capacidade de tratamento.

3.13 Dimensionamento do UASB

Para determinar as dimensões e volume necessário de um biodigestor UASB torna-se necessário considerar a carga orgânica volumétrica, a velocidade superficial e o volume efetivo para o tratamento. O volume efetivo para o tratamento é o volume adicional entre a manta de lodo e o separador trifásico. O volume nominal do digestor é calculado em função da carga orgânica volumétrica como mostrado pela equação abaixo (Kuntz,2022).

$$Vn = \frac{Q * S_0}{COV}$$

Onde:

Vn = Volume nominal (m³)

Q = vazão de afluente (m³/d)

S₀ = Concentração do afluente (kg/m³)

COV = Carga orgânica volumétrica (Kg/m³ d)

Para a determinação do volume total de líquido corrigido é utilizado um fator de correção (E), o qual indica a fração ocupada pela manta de lodo. Que pode variar entre 0,8 e 0,9.

$$Vc = \frac{Vn}{E}$$

A velocidade ascensional é outra variável importante para evitar o arraste de biomassa e é encontrada pela fórmula convencional da vazão, onde A é área da seção transversal do reator.

$$v = \frac{Q}{A}$$

A velocidade de ascensão será dependente da disponibilidade da matéria orgânica presente no substrato. Podemos observar essa relação na Tabela 2

Tabela 8: Informações do projeto

Tipo de efluente	Velocidade ascensional (m.h ⁻¹)		Altura do reator (m)	
	Alcance	Típico	Alcance	Típico
DQO totalmente solúvel	1,0-3,0	1,5	6-10	8
DQO parcialmente solúvel	1,0-1,25	1,0	3-7	6
Efluente doméstico	0,8-1,0	0,7	3-5	5

Fonte: Kuntz,2022

A altura de líquido do biodigestor pode ser determinada utilizando a seguinte relação:

$$H_l = \frac{Vc}{A}$$

A altura do coletor de gás geralmente corresponde a 25% da altura de líquido logo:

$$H_t = H_l + H_g = 1,25 * H_l$$

3.14 Purificação

No Brasil, o uso energético do biogás vem sendo realizado a pouco tempo, foi iniciado e integrado no modelo da revolução verde nos anos 70. Na última década, o biogás vem sendo bastante utilizado como fonte de energia, principalmente devido ao incentivo do mercado de créditos de carbono, uma vez que busca reduzir as emissões de metano na atmosfera um dos principais componentes do efeito estufa (Wikipedia, 2023).

Atualmente o Brasil tem por volta de 123 usinas de biogás operantes (Kuntz,2022), que destinam o seu uso para mais variadas finalidades. Porém, para o biogás ser utilizado como fonte energética um dos fatores principais se torna o seu grau de pureza e dentre os principais contaminantes que afetam o potencial energético do biogás, destacam-se o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e o Dióxido de carbono (CO_2) que dependendo da composição do substrato utilizado o biogás bruto produzido apresentará composições de H_2S em casos extremos a valores da ordem de 30000 ppm. (ABATZOGLOU,2009) ;(Beil,2013).

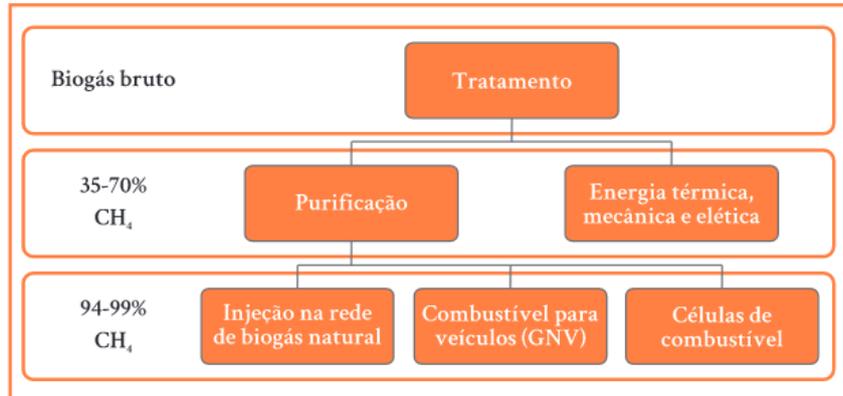
O H_2S é um gás que confere mau odor, além de ser corrosivo e tóxico. Em relação à saúde humana sabe-se que a concentração limite é em torno de 50 ppm o que pode resultar irritação da mucosa do trato respiratório, podendo ocasionar dores de cabeça, tonturas e náuseas. Concentrações elevadas entre 200 ppm a 300 ppm resultam em parada respiratória e concentrações acima de 700 ppm por mais de 30 minutos são fatais. (MDSO,1996) Além disso, a presença do H_2S no biogás causa corrosão nos tanques de armazenamento, tubulações metálicas e motores de combustão, causando deterioração da infraestrutura da produção de biogás. Já o dióxido de carbono é um dos principais constituintes do biogás podendo chegar a valores em volume de 30%. (Wellinger,2013) A sua presença interfere diretamente no potencial energético do biogás por ser inerte em termos de combustão, e além da mistura de gases presentes o biogás também apresenta água que pode reagir com o ácido CO_2 formando o ácido carbônico que é nocivo para os equipamentos da unidade de produção.

Nesse contexto, torna-se necessário a implementação de tecnologias de tratamento do biogás para a geração de um produto de qualidade para que se possa utilizá-lo como combustível ou qualquer que seja sua finalidade. Atualmente os processos de purificação do biogás tem como premissas:

- Ajuste do valor calorífico e a remoção de contaminantes que afetam a qualidade do biogás e a vida útil dos componentes do sistema.
- A purificação do biogás e a concentração de biometano para sua inserção nas linhas de distribuição e transporte de biogás.

Nesse caso, sistemas de tratamento mais simples e de baixo custo pode ser utilizados, desde que atendam aos requisitos mínimos exigidos para cada finalidade como representados abaixo.

Figura 8: Etapas de tratamento e purificação do biogás para concentração do biometano de acordo com seu uso final.



Fonte:Kuntz,2022

Tabela 9: Principais impurezas do biogás, problemas gerados e requisitos de qualidade para fins energéticos.

Contaminante	Problemas	Requisitos de aproveitamento energético
Água	<ul style="list-style-type: none"> Corrosão de compressores, tanques de combustíveis e motores pela formação de ácidos com H_2S, NH_3 e CO_2 Acumulação de água nos dutos Condensação ou congelamento por pressão 	Remoção para desempenho em motores de combustão interna, microturbinas, células de combustível de carbonato fundido; conversão à biometano
Material particulado	Entupimento pela acumulação em compressores, tanques de combustíveis e motores	
Oxigênio	Perigo de misturas explosivas pela elevada concentração de O_2 no biogás	
Amônia	Corrosão pela dissolução em água	
Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)	<ul style="list-style-type: none"> Corrosão de compressores, tanques de combustíveis e motores Concentrações tóxicas no biogás ($> 5 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3}$) Formação de SO_2 pela combustão 	<ul style="list-style-type: none"> < 250 ppm para aquecimento em caldeiras 545-1.742 ppm para motores de combustão interna 2.800 ppm para geradores 10.000 ppm para turbinas e microturbinas 2-15 ppb para injeção na rede de biogás 5 ppb para combustível veicular 1-5 ppb para células de combustível
Dióxido de Carbono (CO_2)	Baixo valor energético	$< 2\%$ na conversão a biometano
Síloxanos	Formação de SiO_2 e quartzo microcristalino pela combustão; deposição em velas de ignição, válvulas e cilindros	<ul style="list-style-type: none"> 9-44 ppm para motores de combustão interna 0,42 ppm para geradores 0,05-0,08 ppm para turbinas e microturbinas < 100 ppb para células de combustível
(Não gerados por resíduos agrícolas) Halogênios	Corrosão em motores de combustão	< 1 ppm para células de combustível

Fonte: Adaptado de Kyckebosch et al. (2011) e Sun et al.(2015).

Fonte: Kuntz,2022

3.15 Remoção de água

O biogás bruto obtido na saída do biodigestor apresenta-se uma grande composição de água que deve ser efetivamente removida. Os métodos utilizados na remoção de água do biogás apresentam-se de certa forma útil pois simultaneamente remove algumas impurezas do material como o material particulado e espumas caso exista. A remoção de água é realizada para prevenir a corrosão dos compressores e tubulações, os métodos mais utilizados para a remoção são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 10: Vantagens e desvantagens das técnicas de remoção de água do biogás

Processo	Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Adsorção	<ul style="list-style-type: none"> Sílica gel Peneira molecular Alumina 	<ul style="list-style-type: none"> Os materiais adsorventes podem ser regenerados Estes podem ser destinados a qualquer uso do biogás e com baixos custos operacionais 	<ul style="list-style-type: none"> As colunas de adsorção devem ser operadas em pressão de 6-10 bar Partículas e óleo devem ser removidas previamente
Absorção	<ul style="list-style-type: none"> Etileno glicol Selexol Sais higroscópicos 	<ul style="list-style-type: none"> Os materiais podem ser regenerados Remoção simultânea de partículas e hidrocarbonetos Não são compostos tóxicos Eficiência de remoção alta 	<ul style="list-style-type: none"> Necessidade de temperaturas e pressões altas para regeneração da solução absorvedora Precisa tratar volumes de gás elevados (>500 m³ h⁻¹) para ser econômico
Refrigeração	<ul style="list-style-type: none"> Arrefecimento a 2°C 	<ul style="list-style-type: none"> Técnica mais eficiente na remoção da umidade do biogás 	<ul style="list-style-type: none"> Elevado consumo de energia para manter a refrigeração do sistema
Condensação	<ul style="list-style-type: none"> Desembaçadores separadores de ciclone Sistemas de troca de calor na tubulação Tubulação com sistema de purga do vapor de água 	<ul style="list-style-type: none"> Podem ser aplicadas como pré-tratamento em todos os sistemas de geração de biogás Redução de vapor de água em até 0,15% do volume inicial Elimina partículas de hidrocarbonetos e óleo, tecnologia simples 	<ul style="list-style-type: none"> As tubulações devem ser longas e instaladas com inclinação para permitir purga do vapor de água Tubulações devem ser resistentes ao congelamento

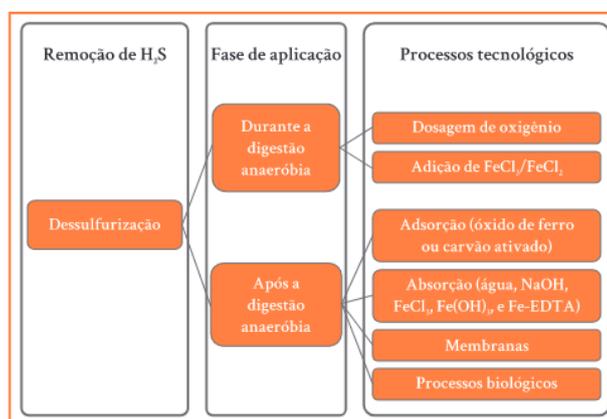
Fonte: Adaptado de Ryckebosch et al. (2011).

Fonte: Kuntz, 2022

3.16 Remoção de H₂S

Os métodos de dessulfurização pode ser dividido a depender do momento que é aplicado, ele é chamado de interno quando ocorre dentro do reator e externo quando ocorre fora do reator como mostrado abaixo com os métodos mais comuns.

Figura 9: Processos tecnológicos mais comumente observados para a dessulfurização do biogás



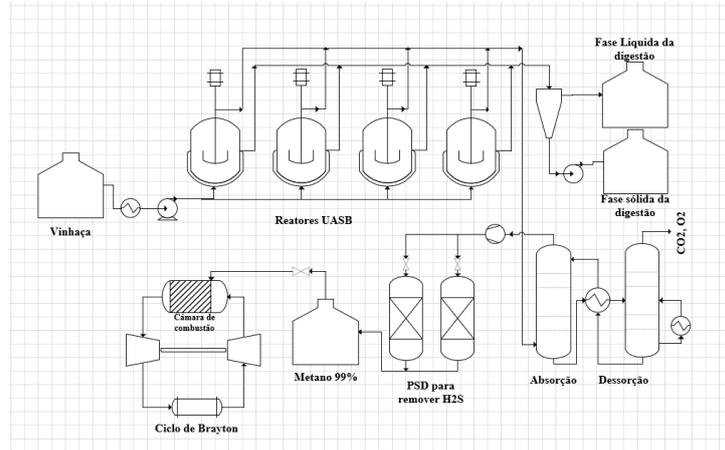
Fonte: Kuntz, 2022

Dentre as opções descrita acima foi selecionado a absorção com água pois apresenta maior simplicidade e menor custo operacional, além do que a lavagem com a água possibilita a remoção de demais contaminantes.

4 Resultados

Utilizando as informações que foram apresentadas até o momento foi elaborado o seguinte fluxograma de processos utilizando o Microsoft Office Vision

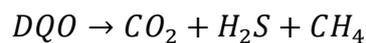
Figura 10: Fluxograma do Processo, Fonte elaboração Própria



Fonte: Autoria própria

Onde iniciamos o processo de digestão em reatores UASB paralelo a depender da produção de vinhaça, após a fermentação temos o separador trifásico onde iremos separar a fase solida e liquida do gás. Esse gás irá para as etapas de purificação onde passará por um processo de absorção para remoção do CO_2 e seguidamente por um processo PSD com carvão ativado para a remoção dos resíduos do H_2S .

Utilizando as Referências (Tunes,2017) ;(Bamberger,2000) e (Georgiadis,2021) com o auxílio do software Minitab, tornou-se possível utilizar de técnicas de regressão de dados experimentais para a criação de modelos para a modelagem do processo para um futuro scale-up. De forma geral, temos a seguinte reação no digestor anaeróbico:



Utilizando as referências geramos os seguintes modelos para modelar o reator UASB:

$$H_2S(\%) = \frac{0,0769128 * DQO(\%)}{DQO(\%) - 2,73856}$$

$$CH_4(\%) = \frac{67,4721 * DQO(\%)}{17,6708 + DQO(\%)}$$

$$CO_2 = \frac{44,2745 * DQO(\%)}{13,7733 + DQO(\%)}$$

E foi gerada as curvas de equilíbrio Gás-Líquido para a mistura CO_2 e H_2O que é válida para valores menores do que 1% de CO_2 para ser utilizada nas equações de projeto da coluna de absorção:

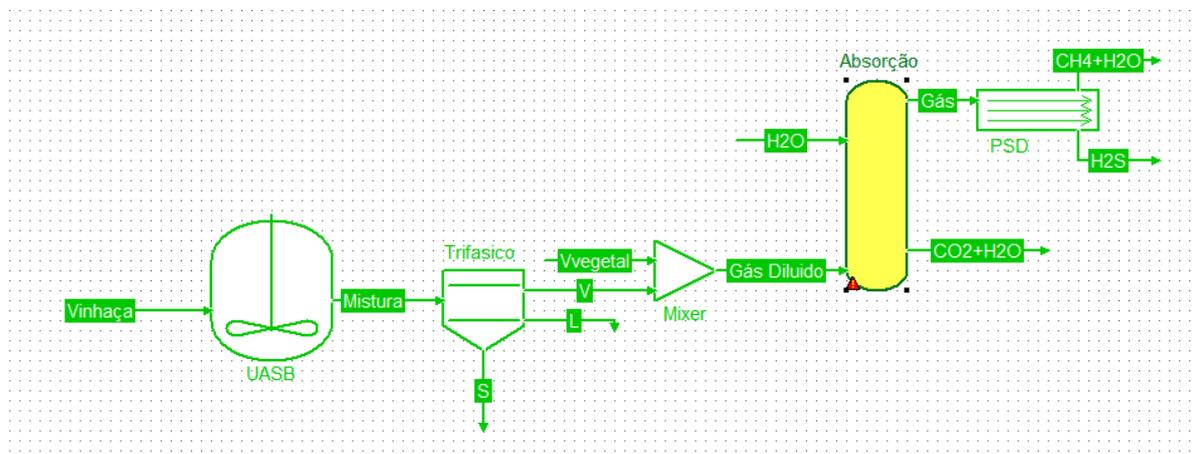
$$x_{CO_2\text{liquido}} = 0,9636 * x_{CO_2\text{gás}} - 0,01508$$

E para finalizar foi realizada a cinética de adsorção do H_2S em carvão ativado:

$$H_2S(\%)_{\text{adsorvido}} = \frac{0,217441 * H_2S(\%)_{\text{alimentação}}}{0,00109877 + H_2S(\%)_{\text{alimentação}}}$$

Com esses modelos em mãos foi possível realizar a simulação do processo no simulador COCO e obter os seguintes resultados:

Figura 11: Simulação do Processo



Fonte: Autoria própria

Tabela 11: Resultados da simulação, Fonte elaboração própria

Stream	Vinhaça	V	Gás Diluido	S	CH4+H2O	CO2+H2O	H2S	Unit
Flow rate	2.4e+06	1.08802e+06	2.50677e+07	103517	2.50677e+07	2.87756e+07	2541.89	mol / day
Mole frac Carbon dioxide	0	0.41095	0.0178366	0	0	0	0	
Mole frac Hydrogen sulfide	0	0.00233625	0.000101401	0	0	0	1	
Mole frac Methane	0	0.538103	0.0233555	0	0.0233555	0	0	
Mole frac Oxygen	0	0	0	0	0	0	0	
Mole frac Dry pine wood	0.1	0	0	1	0	0	0	
Mole frac Water	0.9	0.0486107	0.958706	0	0.976645	1	0	
Mole frac Monoethanolamine	0	0	0	0	0	0	0	

Fonte: Autoria própria

Mostrando que é possível obter um produto de 439 kg/h de metano alimentando o sistema de digestão anaeróbico com 1862,09 kg/h de vinhaça e além disso podendo gerar uma fonte de carbono mais livre de tóxicos para ser utilizada na fertirrigação. Utilizando a Tabela 08 com a informação de que a vinhaça se dissolve fácil, temos que:

$$V_{ascensional} = 1,5 \text{ m/h}$$

$$H = 8 \text{ m}$$

Adicionando a correção da altura de líquido e dos separadores temos que:

$$H_t = 1,5 * 8 = 12 \text{ m}$$

5 Variabilidade Econômica

Utilizando o fluxograma de processos desenvolvido foi optado pela montagem de quatro unidades em paralelo da digestão com dois reatores em série de 35 m^3 . Somando um total de oito reatores com duas unidades de absorção e duas unidades de adsorção. Foram utilizados as equações de estimativa do Tuorton (Tuorton,2008) para realizar a estimativa do custo de aquisição dos equipamentos com o auxílio software Microsoft Office Excel:

Tabela 12: lista de equipamentos e perifericos, Fonte elaboração própria

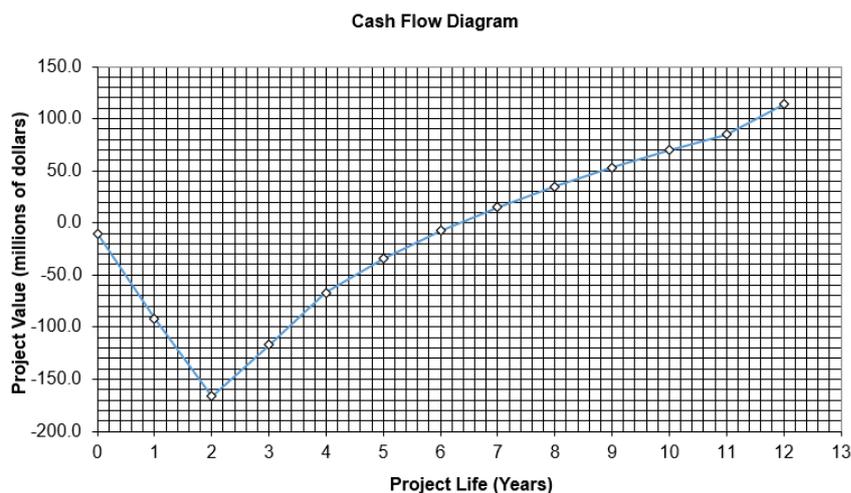
Reactors	Type	Volume (cubic meters)	Purchased Equipment Cost	Bare Module Cost	Base Equipment Cost	Base Bare Module Cost
R-101	Fermenter	35	\$ 115,000	\$ 460,000	\$ 115,000	\$ 460,000
R-102	Fermenter	35	\$ 115,000	\$ 460,000	\$ 115,000	\$ 460,000
R-103	Fermenter	35	\$ 115,000	\$ 460,000	\$ 115,000	\$ 460,000
R-104	Fermenter	35	\$ 115,000	\$ 460,000	\$ 115,000	\$ 460,000
R-105	Fermenter	35	\$ 115,000	\$ 460,000	\$ 115,000	\$ 460,000
R-106	Fermenter	35	\$ 115,000	\$ 460,000	\$ 115,000	\$ 460,000
R-107	Fermenter	35	\$ 115,000	\$ 460,000	\$ 115,000	\$ 460,000
R-108	Fermenter	35	\$ 115,000	\$ 460,000	\$ 115,000	\$ 460,000
R-109	Inoculum	1	\$ 8,530	\$ 34,100	\$ 8,530	\$ 34,100
R-110	Inoculum	1	\$ 8,530	\$ 34,100	\$ 8,530	\$ 34,100
R-111	Inoculum	1	\$ 8,530	\$ 34,100	\$ 8,530	\$ 34,100

Storage Tanks	Tank Type	Volume (cubic meters)	Purchased Equipment Cost	Bare Module Cost	Base Equipment Cost	Base Bare Module Cost
Tk-101	Fixed Roof	300	\$ 77,400	\$ 85,100	\$ 77,400	\$ 85,100

Towers	Tower Description	Height (meters)	Diameter (meters)	Tower MOC	Demister MOC	Pressure (barg)	Purchased Equipment Cost	Bare Module Cost	Base Equipment Cost	Base Bare Module Cost
T-101	8 Carbon Steel Valve Trays	6	2	Carbon Steel		6	\$ 131,000	\$ 217,000	\$ 73,600	\$ 147,000
T-102	4 meters of 304 Stainless	6	2	Carbon Steel		6.89	\$ 75,500	\$ 165,000	\$ 28,500	\$ 102,000
T-103	8 Carbon Steel Valve Trays	6	2	Carbon Steel		6.89	\$ 136,000	\$ 225,000	\$ 73,600	\$ 147,000
T-104	4 meters of 304 Stainless	6	2	Carbon Steel		6.89	\$ 75,500	\$ 165,000	\$ 28,500	\$ 102,000
Totals							\$ 3,648,790	\$ 10,514,400	\$ 3,434,990	\$ 10,240,400
Total Module Cost							\$ 12,410,000			
Total Grass Roots Cost							\$ 17,530,000			
Total Equipment Cost							\$ 3,648,790			
Lang Factor							4.74			
Lang Factor Cost							\$ 17,300,000			

Utilizando a simulação de Monte Carlos com as equações do Tuorton (Turton,2008) foi possível realizar a seguinte estimativa da dinâmica do custo de instalação da unidade de produção de biogás com uma expectativa de retorno financeiro.

Figura 12: Fluxo de caixa durante a execução do projeto.



Fonte: Autoria própria

Onde o gráfico acima nos mostra um fluxo de caixa negativo até a completa instalação da unidade após o início da mesma temos um crescimento da renda gerada pois a unidade estará em completa operação.

6 Conclusão

Com o seguinte estudo tornou-se claro que a digestão anaeróbica da vinhaça pode ser interessante de um ponto de vista econômico devido a geração do biogás e também ambiental uma vez que estou diminuindo a carga orgânica da vinhaça para a fertirrigação, deixando assim a prática menos agressiva para o meio ambiente de um ponto de vista químico. A variabilidade econômica nos mostra que temos um custo de instalação alto para a montagem da unidade de fabricação onde demoramos um período de 2,2 anos para entrar em atividade e começar a gerar receita porém, a unidade terá um lucro superior a despesas de instalação após um período de 5 anos, lembrando que esses estudos foram feitos mantendo um estado econômico inicial constante e prevendo os demais através de modelos de regressão portanto, o aspecto geral dessas curvas podem se modificar um pouco.

Estudos futuros sobre a digestão e a atividade do lodo após a digestão no cultivo da cana de açúcar torna-se necessário para demonstrar se essa diminuição da carga orgânica não irá afetar o cultivo da mesma

7 Referencias

[1]- ABATZOGLOU, N.; BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, v. 3, n. 1, p. 42-71, 2009

[2]- Bamberger, A., Sieder, G., & Maurer, G. (2000). High-pressure (vapor+ liquid) equilibrium in binary mixtures of (carbon dioxide+ water or acetic acid) at temperatures from 313 to 353 K. *The Journal of Supercritical Fluids*, 17(2), 97-110

[3]- Baez-Smith, C. (2006, September). Anaerobic digestion of vinasse for the production of methane in the sugar cane distillery. In SPRI Conference on Sugar Processing, Loxahatchee, Florida, USA (pp. 268-287).

[4]- BEIL, M.; BEYRICH, W. Biogas upgrading to biomethane. In: WELLINGER, A., MURPHY, J., BAXTER, D. (Ed.) The biogas handbook: science, production and applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. p. 342–377

[5]- CHERNICHARO, C. A. L. Anaerobic Reactors. IWA Publishing, 2007.

[6]- do Prado, E. A. F., Vitorino, A. C. T., Mauad, M., Ensinas, S. C., & Paim, L. R. (2017). Características tecnológicas da cana-de-açúcar sob aplicação de doses de vinhaça em Latossolo Vermelho distroférico. Revista de ciências agroveterinárias, 16(4), 386-395.

[7]- de Barros, R. P., Viégas, P. R. A., da Silva, T. L., de Souza, R. M., Barbosa, L., Viégas, R. A., ... & de Melo, A. S. (2010). Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. Pesquisa Agropecuária Tropical, 341-346.

[8]- Georgiadis, A. G., Charisiou, N. D., Gaber, S., Polychronopoulou, K., Yentekakis, I. V., & Goula, M. A. (2021). Adsorption of hydrogen sulfide at low temperatures using an industrial molecular sieve: an experimental and theoretical study. ACS omega, 6(23), 14774-14787.

[9]- https://www.minitab.com/en-us/products/minitab/?utm_campaign=BFO+-+US+-+EN&utm_medium=ppc&utm_term=minitab&utm_source=adwords&hsa_net=adwords&hsa_mt=e&hsa_ver=3&hsa_grp=76445194455&hsa_ad=435008899805&hsa_tgt=kwd-298703240867&hsa_cam=2063302284&hsa_acc=4841564033&hsa_src=g&hsa_kw=minitab&gclid=Cj0KCQjw_r6hBhDdARIsAMIDhV_K8Toe202FQk6HnjghnyyAb0NKrEpleB00FD0h6M2AMCVuNQn2oLLaAjDAEALw_wcB acessado 07/06/2021 as 16:00

[10] - <https://observatoriodacana.com.br/> acessado dia 09/10/2022 as 14:00

[11]- <https://www.cocosimulator.org/> acessado 07/06/2019 as 14:00

[12]- <https://www.minitab.com/pt-br/> acessado as 14:00 de 13/5/2022

[13]- <https://www.microsoft.com>

[14]- <https://www.cocosimulator.org/> acessado as 16:00 15/02/2022

[15]- https://pt.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:P%C3%A1gina_principal

[16]- JANSSEN, A. J. H.; MEIJER, S.; BONTSEMA, J.; LETTINGA, G. Application of the redox potential for controlling a sulfide oxidizing bioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 60, p. 147–155, 1998.

[17]- Kunz, A., Steinmetz, R. L. R., & do Amaral, A. C. (2022). Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.

[18]- McMurry, J. E. (2014). *Organic chemistry with biological applications*. Cengage Learning

[19]- MSDS. Material Safety Data Sheet for Hydrogen Sulfide. New Jersey, 1996

[20]- Sousa, J. T. D., Van Haandel, A. C., Cavalcanti, P. F. F., & Figueiredo, A. M. F. D. (2005). Tratamento de esgoto para uso na agricultura do semi-árido nordestino. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 10, 260-265.

[21]- Sydney, E. B., Larroche, C., Novak, A. C., Nouaille, R., Sarma, S. J., Brar, S. K., ... & Soccol, C. R. (2014). Economic process to produce biohydrogen and volatile fatty acids by a mixed culture using vinasse from sugarcane ethanol industry as nutrient source. *Bioresource Technology*, 159, 380-386.

[22]- SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, n. 33, p. 1101-1107, 2009

[23]- SALOMON, K. R. Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (Doutorado) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2007.

[24]- Tunes, C. R. (2017). Produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de efluentes orgânicos em reator UASB.

[25] - Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2008). Analysis, synthesis and design of chemical processes. Pearson Education.

[26] - Torquato, S. A., & de Jesus, K. R. E. (2015). Complementaridade da matriz energética brasileira: o potencial da cana-de-açúcar e seus co-produtos. In: CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 10., 2015, São Paulo. Anais... São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015. 10 p.

[27] - WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. (Ed.) The biogas handbook: science, production and applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.

[28] - Xavier, T. F. (2012). Vinhaça In Natura e Biodigerida Concentrada: Efeitos nas características químicas e bioquímicas do solo e no crescimento inicial da cana-de-açúcar.