

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**Alessandro Bestetti Alves**

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA E ANÁLISE TÉCNICA DA  
PRODUÇÃO DE BIOGÁS VIA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA  
VINHAÇA**

São Carlos - SP

2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA E ANÁLISE TÉCNICA DA  
PRODUÇÃO DE BIOGÁS VIA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA  
VINHAÇA**

**Alessandro Bestetti Alves**

Trabalho de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química da  
Universidade Federal de São Carlos

Orientador: **Prof. Dr. Edson Luiz Silva**

São Carlos - SP

2022

## **BANCA EXAMINADORA**

Trabalho de Graduação apresentado de forma virtual no dia 12 de abril de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Silva, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

Convidada: Profa. Dra. Janaína Fernandes Gomes, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Marcelo Perencin de Arruda Ribeiro, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à Deus pelo dom da vida e pela manifestação racional da minha fé. Aos meus pais Anselmo e Lucilena, por todo o amor, dedicação exclusiva, apoio incondicional, preocupações e por terem me ensinado o poder transformador da educação. Às minhas avós Cidinha e Toninha, pelo carinho e torcida constante e pelos inúmeros pães e bolos que tanto me alimentaram. Ao meu falecido avô Celso, por carregar tamanho orgulho do adulto que me tornei. À minha família como um todo por sempre me apoiarem e acompanharem com amor os meus passos.

À minha namorada Marília, por todo o amor e carinho, apoio nas horas difíceis e parceria em todo o tempo. Você me fez e faz um homem melhor a cada dia.

Aos meus amigos da graduação pelo companheirismo nos trabalhos e nos momentos de diversão. Ao meu amigo Bruno, pela parceria esportiva e de vida e pelos lindos 3 anos dividindo o mesmo teto. Aos meus queridos petianos e petianas do PET-EQ UFSCar, que me acolheram como família e contribuíram para a minha coleção de memórias e formação profissional.

A todos os professores e funcionários do DEQ-UFSCar pelo cuidado em serem ferramentas de transformação educacional e ao meu orientador Edson Luiz, pelas brincadeiras em sala de aula que permitiram a nossa proximidade e me fizeram ter a certeza de ser um ótimo suporte para este último momento da graduação.

## RESUMO

A questão energética sempre se fez presente na história e caminhou de maneira paralela ao nosso desenvolvimento tecnológico. Se em um primeiro momento a utilização de fontes não renováveis foi a mais explorada nas revoluções industriais, o contexto atual é de busca pelas fontes renováveis e alternativas. A diversificação da matriz energética e o melhor aproveitamento da cadeia produtiva, agregar valor a subprodutos e resíduos, são pontos focais para o desenvolvimento humano-tecnológico das próximas décadas. O objetivo deste trabalho é a análise técnica e a avaliação econômica de diferentes cenários para implementação de uma planta de produção de biogás utilizando a vinhaça, resíduo da cadeia de produção de açúcar e álcool. Para cada cenário adotou-se a construção de uma planta anexa à usina sucroenergética da qual seria obtida a vinhaça a uma vazão de 7692 m<sup>3</sup>/dia com demanda biológica de oxigênio (DBO) igual a 20000 mg/L e sem custos de aquisição. O biodigestor escolhido foi o UASB montado em sistemas de múltiplos reatores em paralelo. Utilizando os conceitos de planejamento 2<sup>k</sup> foi avaliado a influência da demanda química de oxigênio (DQO) inicial (35 e 65 kg/m<sup>3</sup>) e do tempo de retenção hidráulico (5 e 10 horas) na produção diária de biogás da planta. Em seguida, foi possível chegar a conclusões acerca dos custos de investimento inicial e os custos operacionais anuais; a receita estimada da produção e as técnicas de avaliação econômica do valor presente líquido (VPL) e tempo de retorno do investimento (payback).

**Palavras-chave:** Aproveitamento de resíduos. Reator UASB. Avaliação de cenários. Custos de investimento. Payback.

## ABSTRACT

The energy issue has always been present in history and has gone side by side to our technological development. If at first the use of non-renewable sources was the most exploited in industrial revolutions, the current context is to search for renewable and alternative sources. The diversification of the energy matrix and the best use of the production chain, adding value to by-products and waste, are focal points for human-technological development in the coming decades. The objective of this work is the technical analysis and economic evaluation of different scenarios for the implementation of a biogas production plant using vinasse, residue from the sugar and alcohol production chain. For each scenario, the construction of a plant attached to the sugar-energy plant from which vinasse would be obtained at a flow rate of 7692 m<sup>3</sup>/day with biological oxygen demand (BOD) equal to 20000 mg/L and without acquisition costs. The biodigester chosen was the UASB mounted on systems of multiple reactors in parallel. Using the 2<sup>k</sup> planning concepts, the influence of initial chemical oxygen demand (DQO) (35 and 65 kg/m<sup>3</sup>) and hydraulic retention time (5 and 10 hours) on the daily production of biogas of the plant were evaluated. It was then possible to reach conclusions about initial investment costs and annual operating costs; estimated production revenue and net present value (NPV) economic valuation techniques and payback time.

**Keywords:** Waste/By-products use. UASB reactor. Scenario assessment. Investment costs. Payback.

## **SUMÁRIO**

<b>AGRADECIMENTOS</b>	iv
<b>RESUMO</b>	v
<b>ABSTRACT</b>	vi
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b>	ix
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS</b>	x
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	11
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	13
2.1 O BIOGÁS E SEU HISTÓRICO	13
2.2 O SETOR SUCROENERGÉTICO	19
2.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA	23
<b>3. METODOLOGIA</b>	30
3.1 DIMENSIONAMENTO DO REATOR	31
3.2 SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	32
3.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA	34
<b>3.3.1 Cálculo do capital a ser investido</b>	<b>35</b>
<b>3.3.2 Cálculos de custos operacionais anuais</b>	<b>37</b>
<b>3.3.3 Capital investido e custos de utilidades, matérias primas e tratamento de resíduos</b>	<b>37</b>
<b>3.3.4 Custo anual operacional com funcionários</b>	<b>38</b>
<b>3.3.5 Receita anual</b>	<b>39</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>41</b>
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>46</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>48</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1 Composição percentual característica do biogás</b>	<b>13</b>
<b>Figura 2.2 Representação global dos países com projetos de produção de biogás</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2.3 Densidade de potencial de energia elétrica a partir do biogás por macrorregião brasileira</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2.4 Oferta interna de biogás entre 2010 e 2019</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2.5 Participação do biogás na oferta interna de energia entre 2010 e 2019</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2.6 Distribuição da produção de biogás no Brasil por setor</b>	<b>18</b>
<b>Figura 2.7 Potencial brasileiro de produção de biogás por setor</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2.8 Fluxograma simplificado dos processos envolvendo a digestão anaeróbia</b>	<b>24</b>
<b>Figura 2.9 Fluxograma da cadeia produtiva do biogás e suas aplicações</b>	<b>25</b>
<b>Figura 2.10 Esquema representativo do biodigestor de fluxo ascendente - UASB</b>	<b>26</b>
<b>Figura 2.11 Distribuição da produção de biogás no Brasil de acordo com suas aplicações em 2019</b>	<b>27</b>
<b>Figura 2.12 Esquema de tratamento do biogás a depender de sua aplicação final</b>	<b>28</b>
<b>Figura 3.1 Interface do Software em Excel para cálculo de volume exigido e vazão de biogás produzido diariamente</b>	<b>31</b>
<b>Figura 3.2 Interface do Software em Excel para avaliação econômica de projetos</b>	<b>31</b>
<b>Figura 4.1 Valores de fluxo de caixa acumulado ao longo do tempo trazidos a valor presente para os cenários</b>	<b>44</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1: Comparação entre o potencial energético do biogás e outros combustíveis tradicionais</b>	<b>17</b>
<b>Tabela 3.1: Planejamento de experimentos 2<sup>k</sup> para a produção de biogás</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 4.1: Volume exigido e produção diária de biogás para os diferentes cenários</b>	<b>41</b>
<b>Tabela 4.2: Principais equipamentos utilizados, suas quantidades e o custo de aquisição somado à instalação</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 4.3: Valores de custo total de equipamentos, capital investido inicial, custo de fabricação anual, receita e EBITDA para cada um dos cenários.</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 4.4: Avaliação econômica para os diferentes cenários via VPL e Payback</b>	<b>44</b>

## **LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS**

BBC	British broadcasting corporation
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
COMGÁS	Companhia de gás de São Paulo
DBO	Demanda biológica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
EBITDA	Lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização
EPE	Empresa de pesquisa energética
MDL	Mecanismo de desenvolvimento limpo
PROÁLCOOL	Programa nacional do álcool
PROBIOGÁS	Projeto Brasil-Alemanha de fomento ao aproveitamento energético de biogás no Brasil
REDBIOLAC	Rede de biodigestores para américa latina
SELIC	Taxa básica de juros da economia
TDH	Tempo de retenção hidráulico
UASB	Reator anaeróbio de fluxo ascendente
VPL	Valor presente líquido

## 1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, a raça humana tem atuado como agente de transformação no ambiente de forma a personalizar e adaptar os recursos em novos objetos e elementos de maior interesse. Como acelerador desses processos, os recursos energéticos assumiram um papel fundamental nas transformações.

Até o século XX, o ser humano foi acostumado a retirar da natureza seus recursos, sem se preocupar com maiores impactos, despontando as revoluções industriais, os desmatamentos e a urbanização. É bem verdade que as preocupações só ganharam peso, quando surgiram teorias de que o consumo desenfreado seria responsável pelo fim da existência dos seres humanos no planeta, e que a natureza estava enviando sinais para uma mudança imediata.

Claro que as mudanças não ocorreriam de um ano para o outro, mas evidenciavam catástrofes futuras e uma necessidade de pensar em estratégias para minimizar os impactos. O setor energético se consolidou como uma das principais pautas estabelecidas, principalmente pelos incentivos às energias renováveis bem como a busca por energias limpas e a redução de emissão de poluentes.

Mais do que o incentivo para novas fontes, há a busca pela estruturação de uma matriz diversa, participativa, inclusiva e que garanta a segurança e a disponibilidade energética do mundo. Um exemplo pontual e atual são os impactos econômicos relacionados às sanções provenientes da guerra envolvendo a Rússia e a Ucrânia em 2022.

Segundo Saz-Carranza em entrevista para a revista British Broadcasting Corporation (BBC, 2022): “o gás natural russo é o calcanhar de Aquiles da Europa nesta guerra, essa é a sua grande vulnerabilidade, é isso que permite à Rússia capitalizar e financiar essa aventura.” Em meio ao conflito os preços aumentaram conforme se instituíam novas sanções, uma vez que cerca de 40% de todo o gás natural da Europa é oriundo da Rússia. Fica evidente que a presença de uma matriz diversificada seria uma importante aliada para a minimizar os impactos da guerra.

Pensando em fonte renováveis, no Brasil é sabido que uma tecnologia bastante consolidada é a das usinas hidrelétricas que são protagonistas na matriz elétrica, uma vez que constitui cerca de 65 % da matriz elétrica brasileira (EPE, 2021). Contudo, nos últimos anos a falta de diversificação tem sido afetada pela escassez de chuva impactando diretamente no preço de venda ao consumidor final.

Tal cenário é extremamente animador para a exploração de fontes de biomassa, que atualmente apresentam pouca representatividade na matriz, mas um enorme potencial para crescimento. A produção de biogás destaca-se pela possibilidade de utilização de diferentes substratos como matéria-prima. Essa característica permite que a sua implementação se adapte aos recursos já existentes nas diferentes regiões do planeta, dispensando a inserção de uma fonte específica.

Uma outra tendência ambiental é a economia circular. Segundo Abadia et al (2016), a conexão entre o uso de recurso e de resíduos é o que transforma um sistema de linear para circular. O estudo da produção e otimização dos processos agroindustriais, para o aproveitamento integral das cadeias produtivas, tem proporcionado novas rotas produtivas que aumentam o valor agregado dos produtos e promove a criação de uma cadeia circular extremamente benéfica para a economia local.

O biogás obtido por meio da vinhaça, resíduo do setor sucroenergético, é um excelente exemplo de aproveitamento circular. Uma vez que a vinhaça gerada apresentava como principal aplicação o uso para fertirrigação, atividade de pouquíssimo valor agregado, e a partir da digestão anaeróbia é formado biogás com diversas aplicações como geração de calor, biocombustível e energia elétrica.

O impacto econômico deve se tornar cada vez mais um parâmetro indispensável para a avaliação de grandes projetos, ainda mais em um cenário pós-pandemia em que a inflação e as taxas de juros assustam não só países em desenvolvimento, mas também as grandes potências mundiais, como os Estados Unidos que atingiu níveis de inflação no maior patamar dos últimos 40 anos (RICONNECT, 2021).

A soma dos fatores descritos anteriormente teve peso importante na iniciativa deste trabalho. A solução trazida pelas rotas de produção do biogás apresenta-se como uma possibilidade interessante para conectar todos esses pontos e permitir a continuidade do processo natural humano em seu papel como agente de transformação, fomentando a economia circular e mitigando severos impactos ambientais.

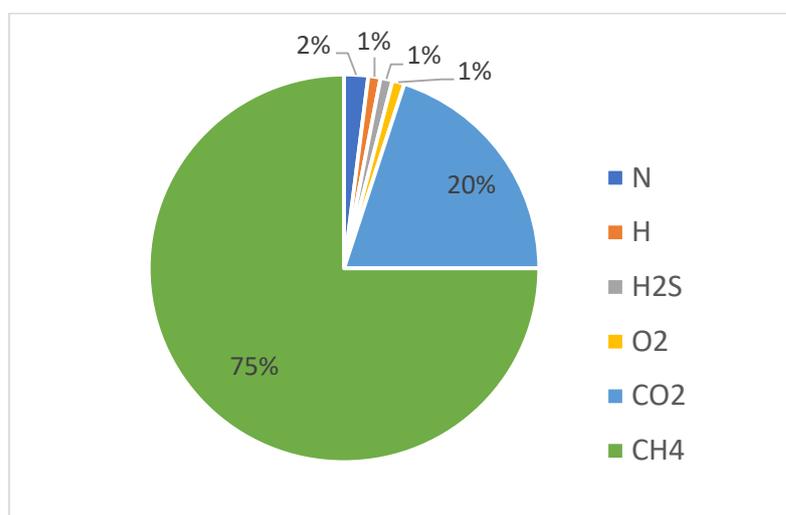
Dessa forma, este trabalho visa avaliar econômica e tecnicamente a produção de biogás de vinhaça, em reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB). Para isso será explorada a situação atual da produção de biogás no Brasil e sua potencial participação na matriz energética nacional além do estudo de sensibilidade de parâmetros operacionais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O biogás e seu histórico

O biogás, considerado por muitos como o “pré-sal caipira”, é um composto gasoso produzido pela decomposição biológica da matéria orgânica na ausência de oxigênio. Sua composição tem como protagonista o gás metano, mas pode apresentar pequenas concentrações de CO<sub>2</sub>; H<sub>2</sub>S; O<sub>2</sub>; N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. Pode-se entender que quanto maior a presença de metano na mistura mais energético é o biogás (LIMA et al, 2012) e por consequência maior o seu poder calorífico. A Figura 2.1 apresenta um gráfico percentual da composição característica do biogás.

**Figura 2.1. Composição percentual característica do biogás**



**Fonte:** Ecoenergia, 2020

Para a melhor compreensão desse biocombustível é importante que haja uma noção histórica da sua aplicação. A descoberta do biogás é datada de 1667 quando Thomas Shirley, em uma visita a um pântano no Reino Unido, percebeu que a decomposição da matéria orgânica gerava um gás. Contudo, apenas em 1776, foi descoberta a presença de metano em sua composição por Alessandro Volta. Os primeiros ensaios da aplicação para aquecimento e iluminação foram realizados por Pasteur e seus alunos.

Já no século XX, o pós-guerra foi marcado por uma enorme crise financeira e energética na Europa, um cenário ideal para o investimento em pesquisas relacionadas às fontes alternativas de energia. Desse cenário despontaram na Europa países como a Alemanha e a Itália, cujos investimentos na área de biocombustíveis foram intensificados, tornando-se referências técnicas na produção de biogás e biometano.

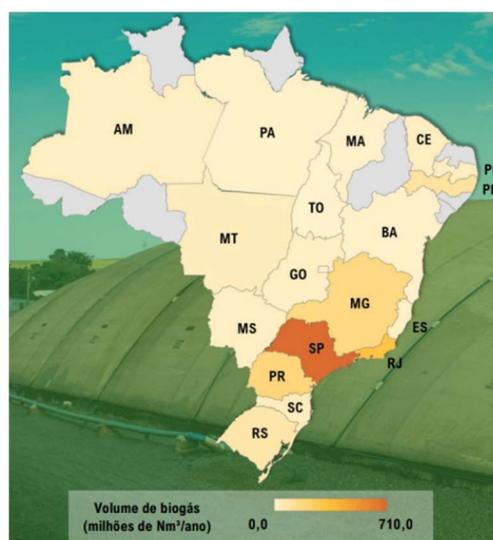


Nos países industrializados como Alemanha, Itália e Suécia, o principal objetivo das plantas de biogás tem sido a geração de energia elétrica e biocombustíveis. Por outro lado, em países subdesenvolvidos, os sistemas de cogeração e energia térmica tem sido prioridade, inclusive pelo sentido social, de possibilitar o alcance a locais que não possuem eletricidade, tornando os sistemas de bioenergia descentralizada uma solução de baixo custo.

O biogás na América Latina começou a ser produzido em meio a década de 1970, regulamentados pela rede de biodigestores para América Latina (Redbiolac), enquanto no Brasil, a produção desse combustível se deu de fato em 1979. Porém, foi nas décadas de 1990 e 2000 que as pautas ambientais, como a redução da emissão de gases do efeito estufa tomaram frente dos problemas a serem combatidos a partir do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e dos créditos de carbono, intensificando a pesquisa e implementação de projetos.

Como a cadeia do biogás permite a descentralização, e a utilização de diferentes recursos como matéria-prima, os projetos puderam se adaptar às demandas específicas de cada uma das regiões do Brasil. Contudo a distribuição do número de projetos e o volume produzido se concentram no eixo Sul - Sudeste, uma vez que são polos tecnológicos e receberam maiores investimentos financeiros. A Figura 2.3 ilustra o cenário atual brasileiro mostrando a distribuição do volume de biogás produzido para cada um dos estados brasileiros.

**Figura 2.3: Distribuição do volume de biogás produzido por estado brasileiro**



**Fonte:** Abiogás, 2022

Segundo a Cibiogás (2020), entre os anos de 2015 e 2019, houve um crescimento de mais de 20% ao ano no número de plantas de biogás instaladas no Brasil, demonstrando a retomada de iniciativas dessa tecnologia impulsionadas pelo sucesso europeu e pelos fomentos políticos como o Acordo de Paris (2015), o projeto Brasil-Alemanha de fomento ao aproveitamento energético de biogás no Brasil (Probiogás) e o RenovaBio, as quais serão detalhadas na sequência. Pode-se notar, portanto, que há uma tendência de que nos próximos anos o Brasil continue crescendo e se consolidando no panorama mundial do biogás.

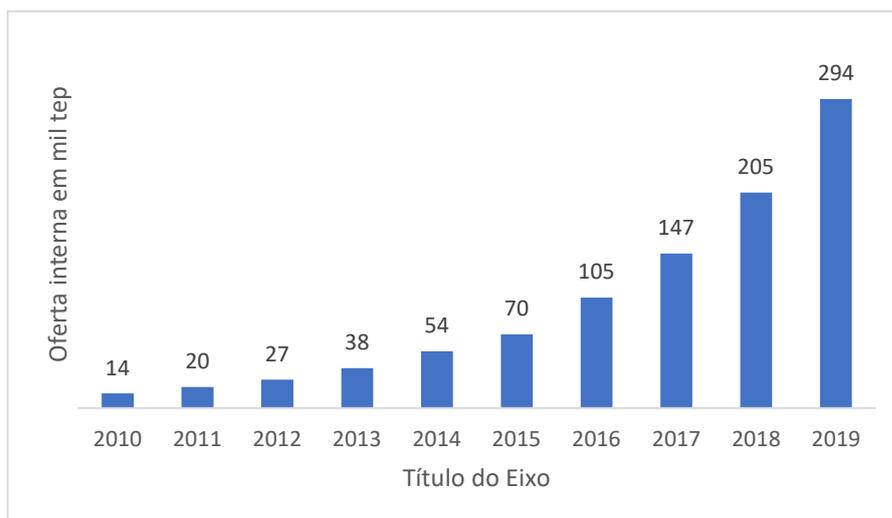
O Renovabio é um programa que visa cumprir 3 principais objetivos: auxiliar no cumprimento da participação brasileira no acordo de Paris; promover a expansão dos biocombustíveis na matriz energética nacional e assegurar a previsibilidade para o mercado energético, caminhando para uma menor dependência de recursos fósseis, um aumento na eficiência energética e a consequente descarbonização.

Já o Probiogás, é um projeto em parceria com a Alemanha para ampliação do uso energético eficiente do biogás em suas distintas fontes e inserção do biogás na matriz energética nacional. A sua atuação é baseada em um tripé: melhorar as condições regulatórias nacionais atuando junto aos órgãos governamentais; aproximar instituições de ensino e pesquisas na rede local às instituições alemãs que são referência na temática; conectar o know-how de empresas alemãs com indústrias nacionais.

Como dito anteriormente, houve um aumento significativo no número de plantas instaladas, porém essa não é a principal métrica para avaliação. A oferta interna de biogás e o percentual de participação na oferta total são indicadores importantes. Segundo EPE (2020), entre 2010 e 2020 a oferta cresceu cerca de 37% ao ano, elevando em mais de 280 mil toneladas equivalente de petróleo, a oferta interna e figurando com pouco mais de 0,11 % da matriz energética. As Figuras 2.4 e 2.5 apresentam a evolução da oferta no período citado.

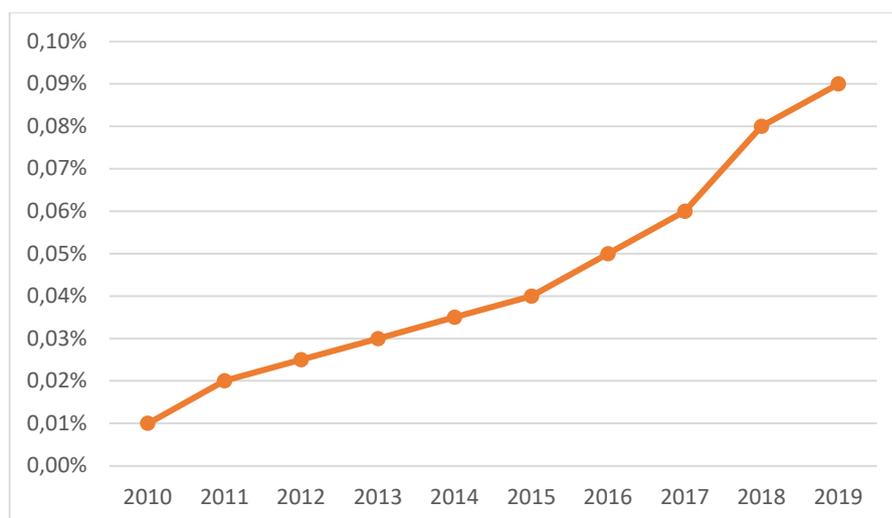
Se de um lado a oferta está aumentando é preciso que haja o consumo desse novo combustível para que o seu mercado seja atrativo. Para isso a eficiência energética é um ponto extremamente relevante na validação e utilização de biogás como fonte de energia pelo seu consumo final. A Tabela 2.1 apresenta a comparação feita por Barrera (2003) para um metro cúbico de biogás com outros combustíveis.

**Figura 2.4: Oferta interna de biogás entre 2010 e 2019**



Fonte: Adaptado de Coelho, 2020

**Figura 2.5: Participação do biogás na oferta interna de energia entre 2010 e 2019**



Fonte: Adaptado de Coelho, 2020

**Tabela 2.1: Comparação entre o potencial energético do biogás e outros combustíveis tradicionais**

Combustível	Equivalência de 1m <sup>3</sup> de Biogás
Gasolina	0,613 L
Querosene	0,579 L
Óleo Diesel	0,553 L

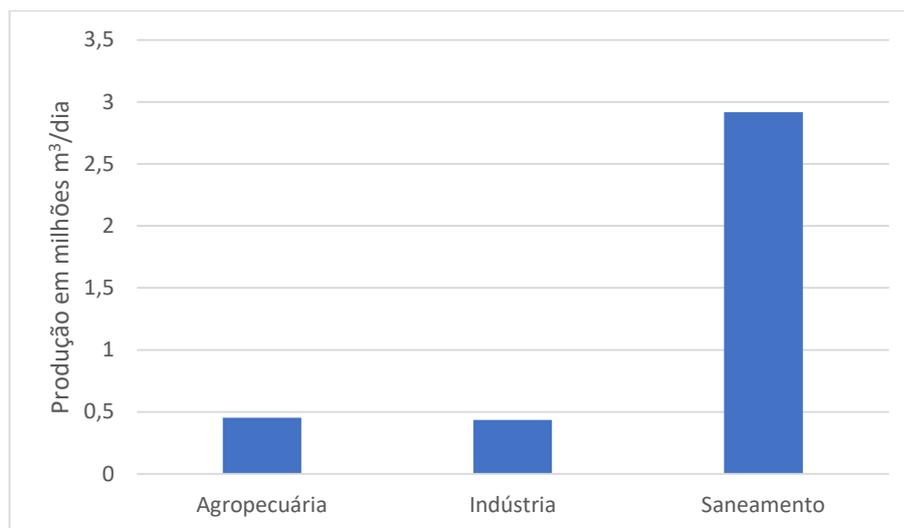
Gás de Cozinha (GLP)	0,454 L
Lenha	1,536 kg
Álcool hidratado	0,790 L
Eletricidade	1,428 kW

**Fonte:** Barrera, 1993

Como todo processo depende de matérias-primas, a produção de biogás possui a peculiaridade de utilizar biomassas de diversas origens, destacam-se as oriundas dos resíduos urbanos (lixo e esgoto); os resíduos agropecuários (excrementos animais, palhas e restos de cultura) e os resíduos industriais (vinhaça, bagaços e torta de filtro).

A Figura 2.6 apresenta a distribuição dessas fontes no ano de 2019 no Brasil. Pelo recorte mostrado os resíduos urbanos correspondem a grande maioria, enquanto os agrícolas e industriais estão mais moderados. Isso se deve ao baixo conhecimento da tecnologia por parte dos agricultores e das indústrias, que ainda possuem muitos receios do ponto de vista do negócio em investir na produção de biogás utilizando seus resíduos, que muitas vezes já apresentam um caminho de descarte e simplesmente preferem não interferir no que está trazendo resultados.

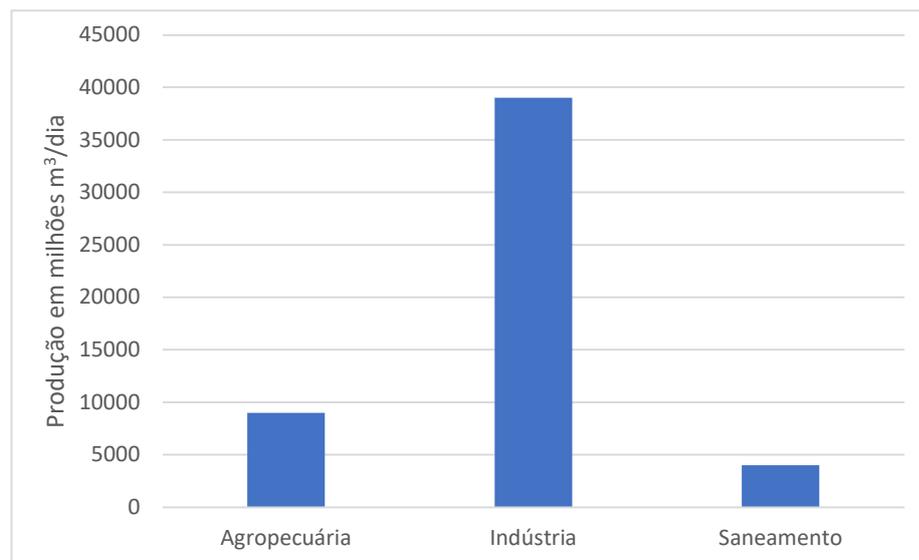
**Figura 2.6: Distribuição da produção de biogás no Brasil por setor**



**Fonte:** Adaptado de Coelho, 2020

Em comparação com a produção atual, algumas estimativas foram feitas para o potencial brasileiro. A Figura 2.7 evidencia o potencial de biogás para cada uma das três principais fontes de substratos. Reforçando ainda mais a capacidade produtiva, e demonstrando um enorme espaço para crescimento, uma vez que a produção atual por origem sucroenergética representa cerca de 11% enquanto em termos de potencial essa mesma origem é de cerca de 75%.

**Figura 2.7: Potencial brasileiro de produção de biogás por setor**



**Fonte:** Abiogás, 2017

Essa diferença entre o potencial e a produção atual é reforçada pelo baixo número de projetos consolidados, principalmente pela falta de know-how técnico que demanda a importação de tecnologias e encarecem os custos operacionais e de instalação dos projetos. Uma alternativa para baratear os custos é o desenvolvimento de tecnologia nacional, trabalho majoritariamente desenvolvido pelas universidades e centros de inovação, que nos últimos anos sofreram inúmeros cortes de investimento, limitando o avanço e desenvolvimento de muitos setores entre eles o do biogás.

## **2.2 O setor sucroenergético**

O setor sucroenergético está intimamente ligado ao desenvolvimento econômico e histórico do Brasil. Sua chegada é datada de 1532 trazida por Martin Affonso de Souza na capitania de São Vicente. Ao longo do período colonial a expansão se deu com maior sucesso no Nordeste, com destaque para a região de Pernambuco. Após cerca de 50 anos de cultivo

o Brasil já havia se consolidado como expoente na produção mundial de açúcar lançando-o ao mercado externo.

Durante todo o período colonial, o setor se manteve como importante fonte exportadora, até que ao final da 1ª Guerra Mundial, o mercado industrial de açúcar europeu foi devastado incentivando a construção de novas plantas no Brasil. Justamente nesse momento que o estado de São Paulo passou a investir em tal plantio como alternativa para diversificação de suas fazendas de café.

Vale destacar que por cerca de 400 anos, extraía-se majoritariamente açúcar da cana e apenas nos últimos 100 anos o etanol passou a ser explorado. A produção de etanol foi impulsionada pela indústria automotiva que apresentava entre seus principais expoentes, como Henry Ford, a realização de testes com motores movidos a álcool como alternativa para se tornar o combustível do futuro, uma vez que a dependência do petróleo começava a demonstrar seus impactos na economia por ser um recurso fóssil.

A partir da segunda metade do século XX, o preço do açúcar caiu rapidamente no mercado internacional, ao mesmo passo que o governo brasileiro apresentava interesses em diminuir suas importações de petróleo. A soma desses fatores impactou no estímulo à produção de álcool (BARBOSA, 2011), cujo estopim se deu no primeiro choque do petróleo em 1973.

Dois anos depois, em 1975, foi instituído o programa nacional do álcool (Próálcool), considerado por muitos uma das maiores realizações genuinamente brasileiras baseadas em ciência e tecnologia (FAPESP, 2016). O programa tinha por objetivo impulsionar a produção de bioenergia de forma a suprir o país com uma alternativa que impactasse tanto o lado econômico quanto o lado ambiental.

No início da década de 90, o mercado internacional apontou fortes alterações no preço do petróleo reduzindo seu preço, o que impactou diretamente na vantagem competitiva do álcool. Em paralelo ao mercado internacional, houve uma problemática envolvendo as fabricantes de automóveis que em um primeiro momento se apresentaram resistentes em produzir veículos movidos a etanol e posteriormente apresentaram deficiências mecânicas em seus carros adaptados, impactando ainda mais na perspectiva do consumidor final sobre a utilização do etanol. O Próálcool foi desativado em 1995.

Nos últimos 20 anos a evolução tecnológica permitiu um menor distanciamento de performance mecânica entre os carros a gasolina e carros a etanol, inclusive com a perpetuação da modalidade flex. Atualmente o setor voltou a ganhar destaque pela retomada da pauta ambiental e pelas novas oscilações envolvidas à dependência do petróleo. A safra

de 2021-2022 produziu cerca de 28,5 milhões de metros cúbicos de etanol; 34 milhões de toneladas de açúcar e 564 milhões de toneladas de cana de açúcar (MAPA,2022).

Analisando, de maneira simplificada, o processo produtivo do etanol tendo cana de açúcar como matéria prima, tem-se como primeira etapa a colheita onde há a remoção da palha. Na sequência a cana é levada para lavagem na usina e em seguida passa pelo processo de moagem, separando o bagaço do caldo que será utilizado ao longo da cadeia de produção do etanol.

Visando a eliminação de impurezas é realizado processos como a decantação, a extração, a esterilização e a peneiração. Removidas as impurezas, inicia-se a etapa principal: a fermentação pela levedura gerando o vinho e o açúcar não-fermentado, e dois coprodutos (CO<sub>2</sub> e Leveduras). Então, submete-se o vinho aos processos de destilação e condensação formando o álcool hidratado e vinhaça, nosso último resíduo do processo. Para finalizar o etanol é desidratado para gerar etanol anidro e por fim armazenado.

A vinhaça obtida desse processo foi a biomassa escolhida para a produção de biogás neste trabalho. Ela é um resíduo escuro e pastoso proveniente da produção de álcool por via fermentativa sendo obtida na etapa de destilação do vinho. Além disso segundo Andrade (2009) a vinhaça apresenta alta temperatura, baixo pH, corrosividade e alto teor de potássio, gerada em uma proporção de 10,3 a 11,9 litros de vinhaça por litro de etanol.

Em geral a vinhaça é composta majoritariamente de água (97%) e a fração sólida contém matéria orgânica sendo o potássio o mais presente (20%) (MARQUES et al., 2006). A relação C/N da vinhaça chega a 21, o que o caracteriza como um material rico em proteínas. Sua principal utilização é na fertirrigação das plantações de cana, contudo há muitos problemas principalmente pelo seu baixo pH e pelos altos índices de DBO e DQO.

A DBO consiste na quantidade necessária de oxigênio para degradar a matéria orgânica no meio aquático, logo, no caso de contaminação de um rio ou lago por vinhaça aquela que apresenta maior DBO será mais prejudicial para fauna e flora local. Já a DQO corresponde a demanda química de oxigênio, sendo um parâmetro que avalia a quantidade de oxigênio necessária para os processos químicos degradarem os materiais. Seu valor é geralmente mais elevado que a DBO, pois se aplica a qualquer material passível de oxidação enquanto a DBO se aplica apenas a materiais biodegradáveis.

Até 1967 a vinhaça era disposta em corpos de água sem nenhum controle, mesmo que o volume produzido fosse muito menor que o atual, a vinhaça gerava preocupação devido aos seus impactos na alta e contínua mortalidade dos peixes. Como resposta houve o Decreto-Lei nº 303. Após proibição do descarte em rios, a vinhaça passou a ser disposta em

áreas de sacrifício. Estas eram porções de terra próximas às destilarias nas quais a vinhaça era armazenada sem nenhum tipo de cuidado ou preparo, causando salinização da terra, prejudicando os talhões e a plantação ao redor da área de sacrifício e tendo um alto risco de contaminar aquíferos e lençóis freáticos.

Em 1975 foram determinadas bases racionais de aplicação da vinhaça como um substituto ao adubo mineral dada a composição rica em potássio. Já em 2005 a CETESB criou uma normativa técnica (P.4231) limitando a aplicação de vinhaça a um certo volume por área de irrigação, além de proibir a aplicação da vinhaça perto de núcleos populacionais ou perímetros urbanos e áreas preservadas. Assim para a utilização com a finalidade de fertirrigação é preciso um tratamento prévio para o cumprimento dos parâmetros técnicos delimitados.

A utilização da vinhaça nas plantas de biogás se apresenta como uma excelente alternativa, justamente por apresentar um produto com maior valor agregado do que a utilização para fertirrigação. Além disso essa rota gera como resíduo o digestato que possui características de fertirrigação mais favoráveis do que a vinhaça tratada, garantindo que as plantações possuam fertirrigação mesmo com a utilização direta da vinhaça para obtenção do biogás.

Como citado anteriormente, o setor sucroenergético é o com maior potencial para produção de biogás no país. Segundo Esteves (2020), a projeção do aumento no processamento de cana no país é de 1,5% ao ano, podendo chegar a 802 milhões de toneladas de cana processadas em 2030. Esse aumento no processamento de cana resulta em uma projeção do aumento de produção de vinhaça em 2,5% ao ano, podendo chegar a cerca de 392-471 bilhões de litros de vinhaça em 2030.

Levando em conta o estudo de Esteves (2020), percebe-se que o potencial atual para produção de biogás a partir da vinhaça é de 34 milhões de metros cúbicos de biogás por dia. A projeção para o ano de 2030 é de um potencial de 43 milhões de metros cúbicos, o que corresponde a quase 1-2 vezes o volume de gás natural importado da Bolívia em 2019.

Assim percebe-se que o biogás sucroenergético possui o potencial de substituir o gás natural Boliviano e tornar o país autossuficiente em metano, para a concretização é necessário a competitividade econômica, uma vez que o custo do gás natural importado é mais baixo atualmente.

## 2.3 Digestão Anaeróbia

A produção de biogás toma como base os conceitos da digestão anaeróbia, em que um consórcio de micro-organismos age na conversão da matéria orgânica, assegurando energia e nutrientes necessários para a proliferação de células bacterianas. O processo apresenta um alto nível de complexidade, tanto pela presença de um número elevado de reações bioquímicas, quanto pela necessidade de um meio de cultura adequado. Seu processo pode ser dividido em 4 principais etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese, e metanogênese.

Após a escolha da biomassa a primeira etapa é a hidrólise, que corresponde ao momento de quebra das moléculas de matéria orgânica em moléculas menores, de forma a facilitar o processo para que as bactérias possam realizar a digestão, formam-se nessa etapa alguns subprodutos como açúcares, álcoois e ácidos graxos. Na sequência inicia-se a etapa de acidogênese, que depende do material orgânico digerido e das bactérias disponíveis no biorreator, continuando o processo de quebra em moléculas menores e formando subprodutos como amônia, ácidos gordos, hidrogênio e CO<sub>2</sub>.

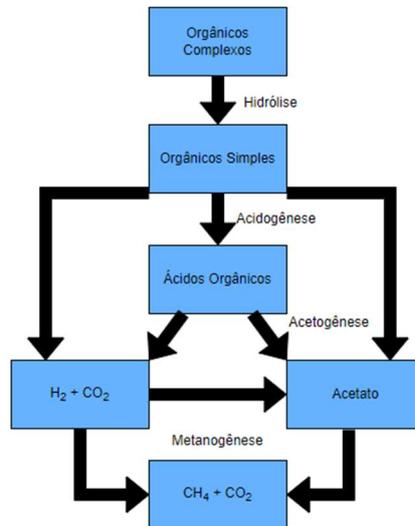
A etapa seguinte é a acetogênese, na qual há conversão do material degradado em ácido etanoico, hidrogênio e gás carbônico. Essa etapa demanda um controle da quantidade de hidrogênio já que seu excesso tende a desequilibrar o pH comprometendo todo o processo. Para isso utiliza-se de bactérias metanogênicas que consumam parte desse hidrogênio, formando como subprodutos ácido acético, hidrogênio e CO<sub>2</sub>.

A fase final corresponde a metanogênese, e como o próprio nome indica, é nela que há formação de metano, a substância de maior interesse do processo de produção de biogás. A Figura 2.8 apresenta o fluxo simplificado da digestão anaeróbia.

O sucesso desse processo está diretamente relacionado à existência de um ambiente adequado, em que parâmetros como temperatura, pH, e presença de O<sub>2</sub> estejam em um intervalo propício. Para garantir esse ambiente adequado, o estudo do processo e a otimização desse controle são fundamentais.

As condições ótimas envolvem: a ausência de O<sub>2</sub>, uma vez que o contato com o oxigênio é responsável pela morte das bactérias, formando um biogás rico em CO<sub>2</sub> e não em metano. A ausência deve ser garantida pela vedação do biodigestor frente a entrada de ar. A faixa de temperatura recomendada é a mesofílica, entre 30 e 40° C e o pH mais neutro, entre 6 e 8. Além disso é recomendada a presença de nutrientes que estimulem o desenvolvimento dos micro-organismos, protagonistas do processo.

**Figura 2.8: Fluxograma simplificado dos processos envolvendo a digestão anaeróbia**



**Fonte:** Adaptado de Serufo, 2019

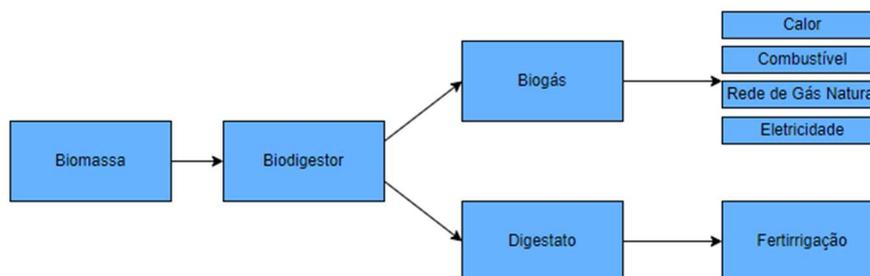
Do ponto de vista do processo em escala industrial, a Figura 2.9 apresenta um fluxograma que contempla todos os processos da cadeia de produção do biogás. De maneira simplificada o aproveitamento energético do biogás envolve as seguintes etapas: pré-tratamento da biomassa; digestão anaeróbia; armazenagem; tratamento e valorização do digestato; tratamento, armazenamento e transporte do biogás; e aplicações do biogás. Na sequência será abordado de maneira mais específica cada uma das etapas.

O processo se inicia a partir da obtenção e pré-tratamento das opções de biomassas que serão utilizados como matéria-prima. Justamente pela possibilidade de utilização de variados substratos, em alguns casos se faz necessário o acúmulo em tanques ou vasos e a posterior lavagem bem como outros pré-tratamentos. O intuito dessas primeiras fases é retirar partículas grandes ou inertes, podendo triturar, aquecer, ou até misturar as biomassas recém-chegadas. Na sequência a biomassa passa por alguns filtros responsáveis pela sanitização e redução de possíveis odores.

Após esses primeiros momentos de tratamento da biomassa, ela é encaminhada ao biodigestor. Dentro dele há o espaço para armazenamento do biogás sendo produzido e a saída de segurança do biogás. O biogás gerado irá sair do biodigestor e distribuído para suas diversas aplicações. Como subproduto do processo há a formação do digestato, que é

acumulado em um tanque de estocagem ou tratado para sua utilização como biofertilizante de excelente qualidade.

**Figura 2.9: Fluxograma da cadeia produtiva do Biogás e suas aplicações**



**Fonte:** Adaptado de Strippel et al, 2016

Em termos de processos, a cadeia de produção do biogás reforça a necessidade de profissionais capacitados, que possuam um conhecimento multidisciplinar, uma vez que a complexidade do processo, bem como o seu controle, é importante para o sucesso dos projetos. A multidisciplinaridade envolve um bom know-how da tecnologia energética, bem como o cumprimento das legislações de comercialização dos produtos, e a escolha adequada de equipamentos e da biomassa a ser empregada.

Adentrando um pouco na tecnologia dos biodigestores, diversos modelos são utilizados cada um com suas peculiaridades. Os três mais utilizados são nos 3 principais: Lagoa coberta; UASB; e CSTR. O biodigestor lagoa coberta consiste na entrada contínua de substrato em uma das extremidades, passando através do biodigestor e sendo descarregado na outra extremidade. É o modelo mais utilizado no Brasil, devido a sua fácil construção, contudo apresenta baixas concentrações que influenciam na sua efetividade.

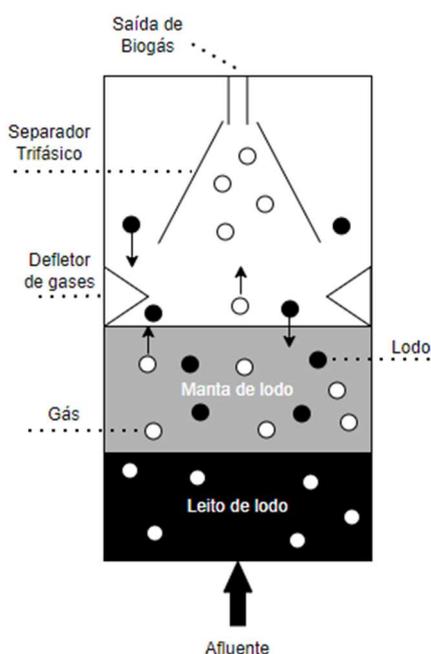
Já o CSTR, ou reator de mistura contínua apresenta um alto nível tecnológico para geração de biogás, principalmente, devido ao seu controle ao longo do processo ser muito confiável (agitação, temperatura, entre outros) e a facilidade em realizar manutenções de forma simples e minimizando paradas de produção. Se comparado com as demais tecnologias seus custos de operação e manutenção bem como a especialização de mão de obra, são mais elevados e, portanto, tendem a ser utilizados em regiões mais bem consolidadas, como a Europa.

Para este trabalho o reator escolhido foi o UASB, que corresponde a um reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo. Ele apresenta como principais vantagens a presença de uma maior taxa de conversão de matéria orgânica em biogás e a aplicação em substratos líquidos como a vinhaça. Além disso, por ser compacto apresenta baixa demanda

por área e custos de implementação menores. É caracterizado por apresentar um fluxo ascendente dos afluentes. A Figura 2.10 traz um esquema do funcionamento desse modelo.

Sua peculiaridade está no fluxo ascendente contínuo, uma vez que a biomassa é disposta na parte inferior da câmara, sua configuração interna permite o desenvolvimento de uma grande quantidade de biomassa ativa, conferindo um elevado tempo de retenção celular (TUNES, 2017), o que impacta em um tempo de detenção hidráulica mais curto. Sua principal limitação está na não tolerância a altas concentrações de sólidos totais, geralmente tendo de ser menor que 300 mg/L. Por ser compacto, há uma maior taxa de conversão da matéria orgânica para biogás, e exige uma operação muito mais sensível e um controle ainda mais rigoroso.

**Figura 2.10: Esquema representativo do biodigestor de fluxo ascendente - UASB**



**Fonte:** Adaptado de Chernicharo, 2016

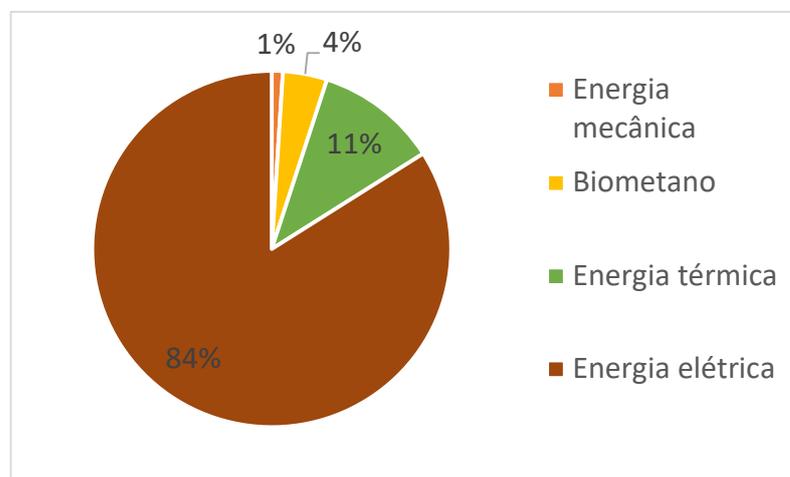
A entrada do afluente se dá pela base do reator e logo no fundo encontra-se a região de leito de lodo e manta de lodo, onde há maior concentração das bactérias. O fluxo ser ascendente garante um ótimo contato entre o afluente e as bactérias, gerando o escoamento e mistura adequados e o bom funcionamento do reator. Conforme as bactérias vão degradando e formando biogás que tende a ir para a superfície, arrastando o lodo localizado, o que poderia eliminar a existência do leito e da manta de lodo.

Para garantir que o arraste do lodo não aconteça é instalado o separador trifásico, que separa a fase gasosa desejada, do lodo com partículas. Sua atuação em conjunto com o compartimento de decantação impede que materiais particulados saiam juntamente com o biogás formado cujo armazenamento é feito no gasômetro.

Como todo processo produtivo, a intenção de promover tais transformações está sempre relacionada com o produto a ser obtido. No caso da cadeia do biogás podemos identificar que as principais aplicações são: sua limpeza para utilização como fonte de energia térmica (aquecimento e cocção); na queima de cogeração cuja finalidade é a participação na matriz elétrica; sua purificação para ser utilizado como combustível ou para obtenção de hidrogênio verde.

A Figura 2.11 apresenta um recorte da produção de biogás em 2019 por destino de aplicação. A utilização para energia elétrica representa o principal destino, seguida pela energia térmica e pela geração de biometano, empregado como combustível. Para este trabalho a aplicação escolhida é a injeção na rede de gás natural para fins de cocção e aquecimento.

**Figura 2.11: Distribuição da produção de biogás no Brasil de acordo com suas aplicações em 2019**

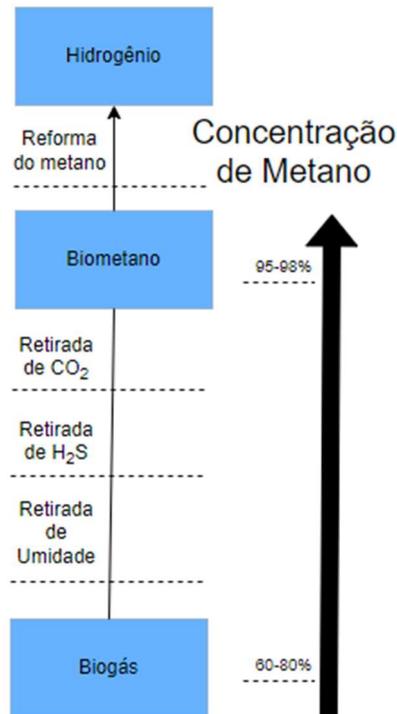


**Fonte:** Coelho, 2020

O biogás que sai do biodigestor apresenta impurezas que podem ser prejudiciais aos equipamentos, e reduzir a sua eficiência energética. Surge então a necessidade de realizar tratamentos específicos para cada aplicação planejada, assim quanto mais avançada for a tecnologia final da aplicação do biogás maior será a exigência do tratamento.

Na Figura 2.12 há um esquema das etapas de tratamento avançando do biogás até combustíveis de tecnologia mais avançada como o biometano e o biohidrogênio. Os principais processos de tratamento apresentados pela figura são: retirada de umidade, retirada de ácido sulfúrico e siloxanos, separação do gás carbônico.

**Figura 2.12: Esquema de tratamento do biogás a depender de sua aplicação final**



Fonte: Adaptado de Portal do Biogás, 2016

O primeiro tratamento é a desumidificação, uma vez que o biogás gerado pode apresentar umidade relativa a 100%. O procedimento de secagem é fundamental para evitar o desgaste e corrosão dos demais equipamentos do projeto, preservando sua vida útil, minimizando riscos e contaminações e garantindo o maior aproveitamento energético possível. Variadas técnicas de secagem são utilizadas, entre elas a de condensação, absorção e adsorção.

O segundo tratamento é a remoção de gás sulfídrico, que é um gás corrosivo capaz de danificar tubulações e peças metálicas. Esse processo é chamado de dessulfurização e pode ser classificado como: biológico, químico ou físico. A retirada de siloxanos, elementos não degradados na digestão/combustão, é fundamental para o bom funcionamento dos equipamentos de geração de energia, uma vez que esses compostos formam micro cristais

abrasivos, geralmente dióxido de silício, que se depositam nesses equipamentos e podem comprometer o funcionamento.

O próximo tratamento é a retirada de CO<sub>2</sub>, cujo objetivo é aumentar as concentrações de metano aumentando o poder calorífico do biogás e atendendo as legislações que especificam a sua utilização como gás natural e biometano. Para desempenhar esse tratamento as principais técnicas são a adsorção com modulação de pressão, lavagem por água, separação criogênica, e a utilização de membranas.

### 3. METODOLOGIA

De forma a conduzir o estudo de produção de biogás de vinhaça optou-se pela análise de sensibilidade técnica e principalmente econômica para quatro cenários de produção. Valério (2020) apresentou um estudo da safra de 2017 para uma usina sucroenergética e registrou uma vazão de vinhaça diária de 7692 metros cúbicos/dia. Para a definição dos diferentes cenários fixou-se a vazão de vinhaça apresentada por Valério (2020) e a atuação em uma faixa mesofílica de temperatura. Para avaliar a influência da DQO utilizada e do tempo de retenção, utilizou-se o conceito estatístico de planejamento  $2^k$ . A Tabela 3.1 apresenta os experimentos para a simulação.

**Tabela 3.1: Planejamento de experimentos  $2^k$  para a produção de biogás**

Experimento	TDH (h)	DQO (mg/L)
1	5	35000
2	10	35000
3	5	65000
4	10	65000

**Fonte:** Acervo Pessoal

Para simplificar a usabilidade e ganhar escala nos cálculos dos cenários definidos, foi construída uma planilha via Microsoft Excel, as Figuras 3.1 e 3.2 apresentam a interface da planilha, cujo cálculo iterativo passa a depender apenas da entrada de 5 parâmetros:

- Vazão média do afluente em  $m^3/dia$
- DQO do afluente em mg/L
- DBO do afluente em mg/L
- TDH em horas
- Temperatura operacional do reator ( $^{\circ}C$ )

**Figura 3.1: Interface do Software em Excel para cálculo de volume exigido e vazão de biogás produzido diariamente**

Informações Iniciais			Produção de Biogás		
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
Q <sub>med</sub>	7692	m <sup>3</sup> /dia	DQO metano	124610,8415	Kg/dia
Q <sub>max</sub>	13845,6	m <sup>3</sup> /dia			
DQO <sub>inicial</sub>	35000	mg/L	K(t)	2,530965873	KgDQO/L
DBO <sub>inicial</sub>	20000	mg/L	P atmosférica	1	atm
T entrada do efluente	80	°C	Beta	0,064	kgDQO/mol
Y <sub>abs</sub>	0,15		R	0,08206	atm*L/mol*K
TDH	5	horas	Temperatura operacional do reator	35	°C
Funcionamento: 245 dias em 3 turnos de 8 horas				308,15	K

Característica do reator		
Parâmetro	Valor	Unidade
V	2884,5	m <sup>3</sup>
DQO média	269220	kg

Eficiência de remoção de DQO e DBO		
Parâmetro	Valor	Unidade
EDQO	61,28587828	%
EDBO	68,69504832	%
Concentração DQO no efluente	13549,9426	mg/L
Concentração DBO no efluente	6260,990337	mg/L

Q metano	49234,50	m <sup>3</sup> /dia
% de metano no biogás	0,75	%
Q biogás	65646,00	m <sup>3</sup> /dia
	16083270,29	m <sup>3</sup> /ano

Fonte: Acervo Pessoal

**Figura 3.2: Interface do Software em Excel para avaliação econômica de projetos**

Equipamentos	Quantidade	Custo com Instalação
Tanque Pulmão V=8000 m <sup>3</sup>	1	R\$ 4.508.100,00
Reatores UASB	5	R\$ 4.825.000,00
Total	6	R\$ 9.333.100,00

Custo Anual Trabalho Operacional	
NOL	2,769476485
Nnp	6
Operadores turno	4,2
Custo por operador	R\$ 57.600,00
Número de Operadores	13
COL	R\$ 748.800,00
Salários supervisores	R\$ 748.800,00
COL efetivo	R\$ 1.497.600,00

Custo Anual Matérias-Primas/Resíduos/Utilidades	
Vinhaça	Fonte Interna
CUT	limite de bateria
CWT	limite de bateria

Custo Anual por operador	
Salário	R\$ 36.000,00
Total	R\$ 57.600,00

Considerando 3 supervisores temos os seguintes salários anuais		
Especialista	Gerente	Especialista
R\$ 124.800,00	R\$ 249.600,00	R\$ 124.800,00

Fluxo de Caixa Anual	
FCI	R\$ 13.439.664,00
COM	R\$ 7.851.553,92
RECEITA	R\$ 14.474.943,26
Fluxo de Caixa	R\$ 6.623.389,34

Custos de Fabricação Anual (COM)		
RS 7.851.553,92		

Receita		
9649962,172	m <sup>3</sup> /ano	
R\$ 1,50	\$/m <sup>3</sup>	
RS 14.474.943,26		

Fonte: Acervo Pessoal

Para facilitar o entendimento das avaliações fez-se necessária a utilização de uma metodologia separada em três tópicos: dimensionamento do reator UASB; simulação da produção de biogás; avaliação econômica da produção.

### 3.1 Dimensionamento do Reator

O reator selecionado para o presente trabalho foi o UASB, muito utilizado na literatura de produção de biogás para diversas fontes de biomassa. Contudo, não há estabelecido um dimensionamento peculiar para a utilização da vinhaça como fonte. Assim, o cálculo de

dimensionamento tomou como referência o equacionamento presente em Chernicharo (2016).

O volume do reator pode ser obtido pela equação 3.1 abaixo:

$$V_{reator} = Q_{max} * TDH \quad (3.1)$$

onde  $V_{reator}$  é o volume total do reator em  $m^3$ ,  $Q_{max}$  é a vazão máxima de entrada em  $m^3/dia$  e  $TDH$  é o tempo de retenção hidráulico, que corresponde ao tempo que o afluente permanece dentro do reator, em dias.

O valor de  $TDH$  é um parâmetro de entrada, já a vazão máxima necessita ser calculada pela equação 3.2 abaixo.

$$Q_{max} = \alpha * Q_{média} \quad (3.2)$$

onde  $Q_{max}$  é a vazão máxima de entrada em  $m^3/dia$ ,  $\alpha$  é a constante de projeto igual a 1,8 e  $Q_{média}$  é a vazão de entrada do afluente em  $m^3/dia$ .

### 3.2 Simulação da Produção de Biogás

Uma vez dimensionado o reator a ser utilizado é necessário partir para os cálculos de vazão de biogás gerada na produção. Seguindo o equacionamento de Chernicharo (2016) deve-se calcular as eficiências de remoção de DQO e DBO. Vale ressaltar que as eficiências em questão, além de influenciarem a vazão produzida de biogás, representam a concentração final de DQO e DBO nos efluentes, os quais podem ser encaminhados para a fertirrigação, e que constituem um limite de bateria do estudo. As equações 3.3 e 3.4 apresentam a eficiência de remoção da DQO e DBO respectivamente.

$$E_{DQO} = 100 * (1 - 0,68 * TDH^{-0,35}) \quad (3.3)$$

onde  $E_{DQO}$  é a eficiência do reator UASB em termos de remoção de DQO,  $TDH$  é o tempo de retenção hidráulica em horas.

$$E_{DBO} = 100 * (1 - 0,68 * TDH^{-0,35}) \quad (3.4)$$

onde  $E_{DBO}$  é a eficiência do reator UASB em termos de remoção de DBO e TDH é o tempo de retenção hidráulico em horas.

A partir das eficiências é possível determinar a concentração de DBO e DQO no efluente, vide equações 3.5 e 3.6 abaixo.

$$DQOfinal = DQOinicial - \frac{E_{DQO} * DQOinicial}{100} \quad (3.5)$$

onde  $DQOfinal$  é a DQO do efluente em  $kg/m^3$ ,  $DQOinicial$  é a DQO do afluente em  $kg/m^3$  e  $E_{DQO}$  = Eficiência do reator UASB em termos de remoção de DQO.

$$DBOfinal = DBOinicial - \frac{E_{DBO} * DBOinicial}{100} \quad (3.6)$$

onde:  $DBOfinal$  é a DBO do efluente em  $kg/m^3$ ,  $DBOinicial$  é a DBO do afluente em  $kg/m^3$  e  $E_{DBO}$  é a eficiência do reator UASB em termos de remoção de DQO (%).

A produção de biogás é calculada pela produção de metano e a sua fração presente no biogás. A produção de metano em massa pode ser estimada a partir da DQO no efluente alimentado no reator e pelo coeficiente de produção de sólidos, o qual a literatura apresenta valores entre 0,11 e 0,23 pela equação 3.7 e posteriormente convertida em produção volumétrica pelas equações 3.8 e 3.9.

$$DQO_{CH_4} = Q_{média} * (DQOinicial - DQOfinal) - Y * Q_{média} * DQOinicial \quad (3.7)$$

onde  $DQO_{CH_4}$  é a massa de metano produzida em  $kg/dia$ ,  $DQOfinal$  é a DQO do efluente em  $kg/m^3$ ,  $DQOinicial$  é a DQO do afluente em  $kg/m^3$ ,  $Q_{média}$  é a vazão de entrada do afluente em  $m^3/dia$  e  $Y$  é o coeficiente de produção de sólidos no sistema.

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (3.8)$$

onde  $DQO_{CH_4}$  é a massa de metano produzida em  $kg/dia$ ,  $Q_{CH_4}$  é a produção volumétrica de metano em  $m^3/dia$  e  $K(t)$  é o fator de correção para a temperatura operacional do reator.

$$K(t) = \frac{P * \beta}{R * (273 + t)} \quad (3.9)$$

onde  $K(t)$  é o fator de correção para a temperatura operacional do reator,  $P$  é a pressão atmosférica igual a 1 atm,  $\beta$  é o DQO correspondente a um mol de  $\text{CH}_4$  e igual a 0,064 kgDQO/mol e  $R$  é a constante universal dos gases igual a 0,08206 atm.L/mol.K e  $T$  é a temperatura operacional do reator em °C.

Segundo Chernicharo (2016), a fração de metano presente no biogás está em uma faixa de 60 a 80%. Para o trabalho foi adotado uma fração igual a 75%. Assim a produção volumétrica de biogás é dada pela equação 3.10 abaixo.

$$Q_{\text{Biogás}} = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{\theta} \quad (3.10)$$

onde  $Q_{\text{CH}_4}$  é a produção volumétrica de metano em  $\text{m}^3/\text{dia}$ ,  $Q_{\text{Biogás}}$  é a produção volumétrica de biogás em  $\text{m}^3/\text{dia}$  e  $\theta$  é a fração de metano no biogás.

### 3.3 Avaliação Econômica

Visando avaliar a viabilidade econômica do projeto em questão, optou-se por utilizar duas técnicas da engenharia econômica. A primeira delas corresponde ao valor presente líquido (VPL), na qual utiliza-se o conceito de que o dinheiro apresenta valor ao longo do tempo. Dessa forma utilizou-se as equações 3.11 e 3.12 e um valor da taxa mínima atrativa de retorno como sendo igual a taxa básica de juros da economia (Selic), cujo valor em abril de 2022 é de 11,75% ao ano, para calcular o valor presente de cada um dos fluxos de caixas anuais obtidos.

O valor presente líquido, por definição, corresponde ao valor no presente de um certo fluxo de caixa previsto para o futuro. Sua ideia é justamente validar o conceito de oportunidade financeira, uma vez que todo o montante presente pode ser investindo à uma taxa mínima de retorno como forma de aumentar o seu valor.

$$VP = \frac{FC}{(1 + i)^t} \quad (3.11)$$

onde VP é o valor presente líquido, FC é o fluxo de caixa,  $i$  é a taxa mínima atrativa de retorno e  $t$  é o tempo em anos do fluxo de caixa até a data presente.

$$VPL = \sum VP' \quad (3.12)$$

Onde VPL é o valor presente líquido e o VP' são os valores presentes que compõe o fluxo de caixa.

Outra técnica de avaliação utilizada foi o tempo de retorno sobre o investimento, mais conhecida como *payback*. Ela representa o cálculo de fluxo de caixa acumulado após a utilização do valor presente líquido, e mais do que isso indica a quantidade de tempo necessária para que esse acúmulo de fluxo de caixa seja suficiente para cobrir o capital investido.

O fluxo de caixa utilizado corresponde ao balanço financeiro anual, mais conhecido como lucro antes de juros, impostos, depreciação e amortização (EBITDA), ou seja, será calculado o valor de receita obtido subtraído dos custos operacionais anuais. Como metodologia para a realização dessas duas técnicas foi preciso calcular três principais insumos: o capital a ser investido pré-operação; os custos operacionais anuais e a receita anual.

### **3.3.1 Cálculo do Capital a ser investido**

Dentro de um processo industrial, como o da digestão anaeróbia de vinhaça para produção de biogás, são necessários diversos investimentos iniciais a serem feitos antes mesmo da produção estar acontecendo, entre eles se destacam os gastos com o local da planta química (construção/compra), os equipamentos a serem utilizados, e outros gastos que envolvem o processo produtivo tanto de maneira direta quanto indireta.

É unanimidade entre os engenheiros, que os custos com equipamentos e elementos do processo são, de longe, o maior percentual entre os gastos com qualquer projeto a ser implementado, e justamente por esse motivo foram o ponto de partida para os cálculos a serem apresentados neste trabalho.

Para o projeto em questão definiu-se a planta industrial tendo como equipamentos principais o conjunto de reatores UASB e o tanque pulmão que armazena toda a vinhaça obtida da usina sucroenergética associada.

O tanque pulmão teve seu custo de aquisição e instalação estimado pela sua dimensão de volume de forma a comportar toda a vazão média diária de vinhaça e ainda apresentar uma margem de segurança. Uma vez dimensionado foi utilizada a biblioteca de preços online da Matche (2014).

Para o conjunto de reatores UASB optou-se pela utilização de arranjos envolvendo reatores de volume igual a 650 m<sup>3</sup>. Segundo Nursanto (2017) o custo de aquisição de um reator UASB incluído custos de instalação é cerca de R\$ 965000,00. Assim para cada cenário foi considerado esse custo multiplicado pelo número de reatores presentes no arranjo.

Com os valores de custo dos equipamentos, foi notado que outros custos referentes ao processo não estavam contemplados no valor obtido. Optou-se por levar em consideração gastos com a parte de controladores, válvulas, misturadores, tanques e tubulações. Tais gastos foram estimados como sendo 20% do valor total dos equipamentos e nomeados como outros custos processo.

Visando a adequação para o funcionamento regular da planta, foi designado um valor a ser investido na construção de novas áreas e na reforma de áreas comuns como salas de controle, escritórios, galpões de armazenagem e logística, refeitório, ambulatório, estacionamento e acesso rodoviário; de forma a garantir excelentes condições de trabalho aos funcionários e permitir o perfeito fluxo não só para a área de manufatura, mas para as demais áreas da empresa que agregam valor ao negócio. Como base de cálculo foi adotado um valor de 20% dos gastos com o processo.

Uma vez contemplados os gastos prévios à operação, foi possível calcular o valor de capital a ser investido para tornar toda essa estrutura viável. O capital investido é dado pelas equações de 3.13 a 3.16 abaixo.

$$FCI = CP + CDA \quad (3.13)$$

onde FCI é o capital investido inicialmente, CP é o custo do processo e CDA é o custo das demais áreas.

$$CP = CE + OCP \quad (3.14)$$

onde CP é o custo do processo, CE é o custo dos principais equipamentos e OCP são os outros custos do processo.

$$OCP = CE \times 0,20 \quad (3.15)$$

onde CE é o custo dos principais equipamentos e OCP são os outros custos do processo.

$$CDA = 0,20 * CP \quad (3.16)$$

onde CP é o custo do processo e CDA é o custo das demais áreas.

### **3.3.2 Cálculos de Custos Operacionais Anuais**

Após os cálculos do valor a ser investido para que a planta entre em funcionamento, foi preciso estimar os custos operacionais anuais, que serão parte integrante do fluxo de caixa anual, elemento fundamental para as análises de viabilidade do projeto. A literatura apresenta uma vasta quantidade de parâmetros a serem considerados como composição dos custos operacionais.

Segundo Turton (2018), o valor gasto anualmente com a operação pode ser simplificado para uma equação em função de cinco parâmetros vide equação 3.17: o capital investido inicialmente; custos operacionais com funcionários; custos com utilidades; custos com tratamento de resíduos; e custos das matérias-primas. Os tópicos seguintes abordam cada um dos parâmetros.

$$COM = 0,28 * FCI + 2,73 * COF + 1,23 * (CUT + CTR + CMP) \quad (3.17)$$

onde FCI é o capital investido inicialmente, COF é o custo anual operacional com funcionários, CUT é o custo anual com utilidades, CTR é o custo tratamento de resíduos e CMP é o custo com matérias-primas.

### **3.3.3 Capital Investido e custos de utilidades, matérias primas e tratamento de resíduos**

Os quatro primeiros parâmetros a serem abordados serão o capital investido, o custo de utilidades, o custo de matérias primas e o custo de tratamento de resíduos, uma vez que suas metodologias de cálculos são simplificadas. Para o capital investido sua estimativa já foi apresentada em tópicos anteriores; enquanto o custo de tratamento de resíduos foi considerado como fora do limite de bateria do processo apresentado, uma vez que para as

demais análises, técnica e ambiental, não houve estudo dos resíduos.

Em termos de utilidades e matérias primas, foi adotada uma simplificação de seus impactos na avaliação econômica, uma vez que o complexo da usina sucroenergética já forneceria toda a vinhaça demandada sem nenhum tipo de custo de aquisição, necessitando apenas a adaptação para integração das duas plantas, o que já está embutido nos custos de investimento inicial. Para as utilidades o próprio complexo inserido apresenta soluções de cogeração pela queima do bagaço de cana, mas para tornar nosso sistema autossuficiente foi realizada a consideração de que 40% do biogás produzido seria queimado em sistema de cogeração energética.

### **3.3.4 Custo anual operacional com funcionários**

Além dos equipamentos, o coração de um processo produtivo está na mão de obra que o executa. Essa ideia remete desde as primeiras civilizações onde as transformações realizadas dependiam exclusivamente do trabalho humano, e ao longo dos séculos com o advento das ferramentas e posteriormente das máquinas, a dependência reduziu, mas uma coisa é certa, nunca se tornará nula.

É evidente que os equipamentos realizam todo o trabalho bruto e garantem a escalabilidade dos processos, mas os operadores e supervisores são peça fundamental para o sucesso da organização. Estimar quantos funcionários são necessários é uma tarefa significativa e por estarmos propondo apenas a inserção de uma planta dentro de um complexo, assumiu-se apenas os custos com pessoas. Para Turton (2018), o cálculo envolve dois fatores auxiliares: número de operadores pelos principais equipamentos; número de operadores por turno.

O número de operadores por turno é estimado pelo número de turnos por dia de produção e pelo número de dias trabalhados no ano. A planta optou pela decisão de concentrar sua produção no período de safra sucroenergética. Segundo a Embrapa, a safra na região centro-sul ocorre entre abril e novembro, o que corresponde a 245 dias de operação. Definiu-se também, que a operação da planta seria contínua alocando 3 turnos de 8 horas diárias.

Turton (2018) sugere que cada operador realize 5 turnos semanais. Como a planta atua em 245 dias, correspondente a 35 semanas, é possível calcular o número de operadores por turno, uma vez que ao longo do ano seriam 735 turnos e cada operador realiza 175 turnos.

Totalizando dessa forma um total de 4,2 operadores-turno. Já o número de operadores por equipamento é calculado pelas equações 3.18 e 3.19.

$$NOL = (6,29 + 0,23 NP)^{0,5} \quad (3.18)$$

onde NOL é o número de operadores dos principais equipamentos e NP é o número de equipamentos principais.

$$NOP = NOL * NOT \quad (3.19)$$

onde NOP é o número de operários, NOL é o número de operadores dos principais equipamentos e NOT é o número de operadores-turno.

Além dos operadores, é preciso estimar a quantidade de supervisores. Decidiu-se estimar um total de 3 funcionários para cargos de supervisão. Sendo um deles um cargo de gerência e outros dois especialistas técnicos. Assim, para obter o custo anual com funcionários foi necessário utilizar a sequência de equações 3.20. Em termos de salários, cada operário e supervisor recebe um salário líquido anual no qual foi levado em conta um múltiplo equivalente aos benefícios, 13º salário e encargos pagos pela organização e que compõem os custos anuais operacionais com funcionários.

Assim o valor de CPO utilizado foi de R\$ 57.600,00 por ano, uma vez que o salário considerado foi de R\$ 3.000,00 por mês e o múltiplo de encargos e benefícios aplicado foi 1,6. Já para o CPS o valor adotado foi de R\$ 249.600,00 por ano, em que o salário mensal foi de R\$ 13.866,67 e o múltiplo de encargos e benefícios aplicado foi 1,5.

$$COF = NOP * CPO + NS * CPS \quad (3.20)$$

onde COF é o custo anual operacional com funcionários, NOP é o número de operários, CPO é o custo por operário, NS é o número de supervisores e CPS é o custo por supervisor.

### 3.3.5 Receita Anual

O cálculo da receita anual leva em conta dois fatores: a quantidade a ser comercializada de biogás e o preço de venda. Para cada um dos cenários avaliados foi obtido uma produção volumétrica de biogás. Vale lembrar que apenas 60% do total produzido foi destinado à

comercialização. Por se tratar de uma fonte de energia renovável, há ainda muito a se desbravar no mercado até a sua consolidação dentro da matriz energética brasileira.

O biogás produzido apresenta como parâmetro definido uma fração de metano igual a 0,75 o que se assemelha a fração regulamentada pela ANP para o gás natural. Como a produção não foi definida para comportar a entrega direta ao consumidor final, então o público-alvo de venda é B2B e pretende atingir os grandes players de gás natural e fins de aquecimento.

Dessa forma, uma estratégia agressiva para inserção no mercado é a comercialização a um preço menor do que os concorrentes. Segundo a companhia de gás de São Paulo (Comgás, 2022) o preço de comercialização direto ao fornecedor do metro cúbico do gás natural é de 4 a 5 reais. Tomando a Comgás como um potencial cliente é possível definir o preço de venda em torno de R\$1,50 por metro cúbico.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tomando por base a metodologia descrita no capítulo anterior, foi possível avaliar do ponto de vista técnico e principalmente econômico os diferentes cenários para o sistema UASB com geração de biogás a partir de vinhaça. Vale ressaltar que a vazão de vinhaça diária e a temperatura operacional do reator foram pré-estabelecidas com base na literatura e seus valores são respectivamente 7692 m<sup>3</sup>/dia (VALÉRIO, 2020) e 35°C (CHERNICHARO, 2016).

Outra importante definição é com relação ao local para a construção da planta. Partindo do princípio de economia circular e do estudo sobre o setor sucroenergético, foi identificada uma alta oferta de vinhaça, gerada como subproduto do processo fermentativo da cana de açúcar. Assim, este trabalho partiu da premissa de implementação da nova planta nas dependências de uma usina sucroalcooleira.

Do ponto de vista técnico, a construção do modelo em Excel permitiu o olhar para a influência que a carga de DQO presente no afluente (vinhaça) possui sobre a produtividade da planta, mensurada via vazão de biogás por dia. Outro parâmetro avaliado foi o tempo de retenção hidráulico e sua influência tanto na produtividade quanto no volume demandado para o sistema. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos para os quatro cenários propostos.

**Tabela 4.1: Volume exigido e produção diária de biogás para os diferentes cenários**

Cenário	DQO <sub>inicial</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	TDH (h)	Volume (m <sup>3</sup> )	Q <sub>biogás</sub> (m <sup>3</sup> /dia)
1	35	5	2884,5	65646
2	35	10	5769	77474
3	65	5	2884,5	121914
4	65	10	5769	143880

**Fonte:** Acervo Pessoal

Sobre o efeito da DQO é perceptível que a relação com a produtividade é direta, ou seja, quanto maior o nível de DQO inicial maior é a vazão de biogás obtida. Ao longo do processo sucroenergético há três principais matérias-primas para obtenção do álcool como o melão, o caldo e mista. Segundo Marques (2006), se a fonte utilizada for o melão a DQO

obtida é próxima a 65000 mg/L. Já para o caldo têm-se valores consideravelmente menores entre 15000 e 35000 mg/L. Para a fonte mista os valores chegam a cerca de 45000 mg/L.

Assim é possível evidenciar que vinhaça cuja fonte é o melaço apresentou uma maior produtividade de biogás diária. Outro ponto é que não se faz necessário o tratamento prévio para diminuição de DQO do afluente. Diferentemente da utilização da vinhaça para fertirrigação, em que se deve realizar tais tratamentos para cumprimento das regulamentações, o que simplifica o processo e reduz custos.

Para o tempo de retenção hidráulico é possível identificar também uma relação direta tanto com a produtividade quanto com o volume do sistema, ou seja, quanto maior o tempo de retenção maior o volume exigido e maior a produtividade. Contudo, é nítido que o impacto na produtividade é muito menor se comparado ao impacto no volume. Isso se dá pois para o modelo de Chernicaró, o TDH é o principal parâmetro que influencia no volume demandado, enquanto seu impacto na produtividade está relacionado com a eficiência de remoção da DQO.

Apesar do aumento do TDH ter impactado no aumento da produtividade, é necessário um ponto de atenção para a análise financeira, uma vez que o impacto no volume exigido foi mais significativo, o que pode representar um aumento nos custos operacionais e de equipamentos podendo afetar a viabilidade econômica.

Como explanado na metodologia, definiu-se como principais equipamentos o tanque pulmão com volume maior do que a vazão de afluente e o conjunto de reatores UASB, cuja configuração depende do volume exigido para cada um dos cenários. A Tabela 4.2 apresenta os principais equipamentos, as respectivas quantidades e o custo já contando a instalação.

**Tabela 4.2: Principais equipamentos utilizados, suas quantidades e o custo de aquisição somado à instalação**

Cenário	Equipamentos	Quantidade	Custo + Instalação
1	Tanque Pulmão	1	R\$ 4.508.100,00
	Reator UASB	5	R\$ 4.825.000,00
2	Tanque Pulmão	1	R\$ 4.508.100,00
	Reator UASB	9	R\$ 8.685.000,00
3	Tanque Pulmão	1	R\$ 4.508.100,00
	Reator UASB	5	R\$ 4.825.000,00

4	Tanque Pulmão	1	R\$ 4.508.100,00
	Reator UASB	9	R\$ 8.685.000,00

**Fonte:** Acervo Pessoal

O custo de capital a ser investido tem como grande parcela os custos de equipamentos, principalmente pela premissa adotada de instalar a planta nas dependências da usina sucroalcooleira, o que reduz os custos com áreas comuns e terrenos, permitindo a simplificação de termos presentes na análise.

Além dos custos de investimentos, foi calculado o custo de fabricação anual que envolve gastos com funcionários, matérias-primas e todo o lado operacional da planta. A viabilidade econômica dos quatro cenários foi baseada nas técnicas de VPL e payback, ambas dependentes do EBITDA, que envolve as receitas obtidas e as despesas operacionais anuais. A Tabela 4.3 apresenta os valores de capital investido inicialmente, custos de fabricação anual, receita e EBITDA.

**Tabela 4.3: Valores de custo total de equipamentos, capital investido inicialmente, custo de fabricação anual, receita e EBITDA para cada um dos cenários.**

Cenário	Custos de Equipamentos (R\$)	Capital Investido Inicialmente (R\$)	Custo de Fabricação Anual (R\$)	Receita (R\$)	EBITDA (R\$)
1	9.333.100	13.439.664	7.851.554	14.474.943	6.623.389
2	13.193.100	18.998.064	9.407.906	17.082.991	7.675.085
3	9.333.100	13.439.664	7.851.554	26.882.037	19.030.484
4	13.193.100	18.998.064	9.407.906	31.725.555	22.317.648

**Fonte:** Acervo Pessoal

Por definição os cenários com maior produtividade são aqueles em que os valores de receita também são maiores. Com relação ao impacto econômico dos cenários em que o TDH era maior, comprova-se que os cenários 2 e 4 apresentam um maior Ebitda, ou seja, ainda que os custos operacionais tenham aumentado, o aumento na receita foi maior ainda.

Os valores de EBITDA apresentados levam em conta a plena operação dos sistemas, o que dificilmente acontece ao longo dos primeiros anos do projeto. Dessa forma para os

cálculos de viabilidade econômica envolvendo o VPL e o payback foi considerado o conceito de rollout.

O rollout é considerada uma técnica de implantação de projetos que envolve o processo de expansão empresarial de forma gradativa, ou seja, o avanço escalado de um projeto até a sua capacidade máxima. Para a planta de biogás foi utilizado um rollout em três fases. O primeiro ano utilizaria 40% do potencial de receita, o segundo ano subiria para 70% e a partir do terceiro ano seria atingida a plena capacidade.

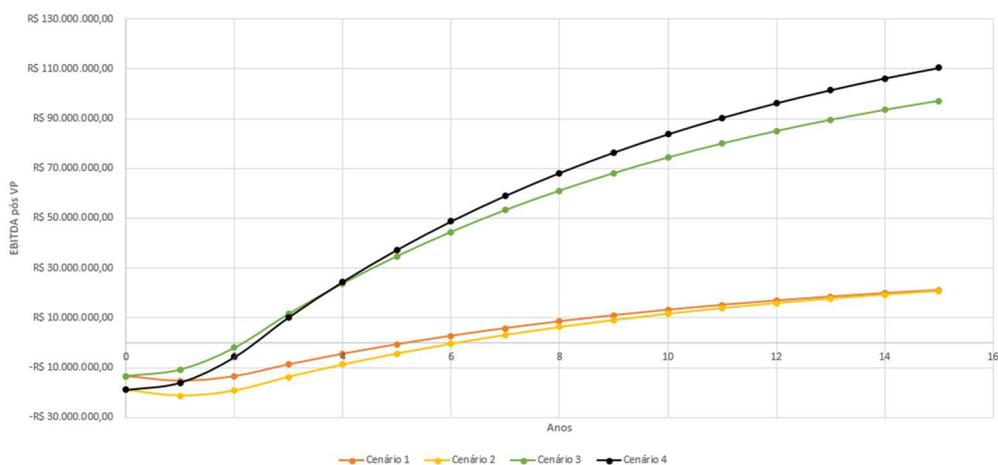
Aplicando o rollout juntamente com as técnicas de VPL e payback há uma aproximação maior do cenário real em que a produção industrial nunca se inicia com sua capacidade total. A Tabela 4.4 apresenta o VPL e o payback obtidos para cada um dos cenários, enquanto a Figura 4.1 apresenta o fluxo de caixa acumulado pós aplicação do VPL.

**Tabela 4.4: Avaliação econômica para os diferentes cenários via VPL e Payback**

Cenário	VPL	Payback
1	R\$ 21.031.013	6 anos
2	R\$ 20.705.408	7 anos
3	R\$ 97.032.315	3 anos
4	R\$ 110.400.375	3 anos

**Fonte:** Acervo Pessoal

**Figura 4.1: Valores de Fluxo de Caixa acumulado ao longo do tempo trazidos a valor presente para os cenários**



**Fonte:** Acervo Pessoal

Pela definição de VPL, um projeto é economicamente viável se o seu valor é positivo, assim os quatro cenários apresentam-se economicamente viáveis. De semelhante modo o payback aponta para a viabilidade de todos os cenários em um período inferior a 10 anos.

Realizando a comparação entre os cenários é possível escolher uma melhor alternativa. Em um primeiro momento, a escolha do cenário número 4 como o melhor é evidente, uma vez que para um mesmo período é o que apresentou o menor payback e o maior VPL. Porém, esse cenário é o que apresenta o maior investimento inicial, o que pode impactar na tomada de decisão já que não foram considerados nesse ensaio os custos de financiamentos para obtenção do investimento, o que poderia afetar o tempo de payback, favorecendo a escolha de outros cenários como o primeiro por justamente apresentar o menor custo de investimentos iniciais e uma excelente rentabilidade.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O biogás possui um grande potencial para participação da matriz energética do Brasil, mas o aproveitamento atual é baixo, principalmente pelo baixo número de projetos consolidados/falta de um know-how técnico; o elevado custo de importação de tecnologias e a ausência de políticas e incentivos específicos ao biogás.

Em termos técnicos a produtividade apresentada bem como o volume exigido se encaixa dentro das especificidades de muitas usinas sucroalcooleiras do país, ou seja, pensar em uma solução de aproveitamento da vinhaça é viável e adaptável. Outro fator de destaque é o de que a produção se dá envolvendo pouquíssimos equipamentos o que viabiliza a facilidade em sua implementação.

O cenário que apresentou a melhor produtividade de biogás foi o quarto, onde a DQO inicial era máxima e o TDH também era máximo. Assim aponta-se para uma relação direta entre as duas variáveis e a produção diária de biogás, justificando inclusive a não necessidade de pré-tratamento para redução dos níveis de DQO do afluente.

É fato que este trabalho utilizou de um software simplificado para realizar a simulação dos cenários e até por isso sugere-se para futuros trabalhos o estudo avançado de uma planta de biogás e a implementação de uma simulação em um simulador de processos químicos como o Aspen ou o DWSIM. A utilização dessas outras ferramentas permitiria uma visão mais sensível dos equipamentos utilizados, visão energética do processo e demais análises de sensibilidade importantíssimas para a tomada de decisão pré-implantação da planta.

Apesar das simplificações em sua execução o presente trabalho cumpriu o seu papel em realizar uma análise primária sobre a viabilidade técnica fomentando as discussões em níveis mais profundos e estimulando o desenvolvimento de novos projetos para o setor, buscando sempre a diversidade da matriz energética e o aproveitamento dos resíduos agroindustriais.

Do ponto de vista econômico, todos os cenários apontaram para a viabilidade positiva tanto na análise por valor presente líquido, quanto na avaliação por payback. As premissas assumidas apresentam um grande impacto na avaliação realizada pois reduzem consideravelmente os custos de investimento inicial com a estrutura da planta e do negócio; e reduzem os custos de matérias-primas e utilidades. O cenário selecionado como ideal foi o primeiro, por apresentar um menor custo de investimento inicial.

Semelhante ao exposto para as questões técnicas recomenda-se para futuros trabalhos a realização de uma simulação mais profunda envolvendo os custos de transporte da vinhaça

até a planta e principalmente os tratamentos envolvidos para a aplicação final, uma vez que os custos de equipamentos serão aumentados e a viabilidade possa sofrer seus impactos.

Um outro ponto é a avaliação do mercado da aplicação final e a estipulação de um preço de venda do biogás. Essa análise é fundamental para o posicionamento estratégico da companhia e principalmente para validar a escolha da aplicação mais rentável, ou cujo impacto no mercado será o mais expressivo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGÁS. **Guia do produtor**. Disponível em < <https://abiogas.org.br/guia-do-produtor/> >. Acesso: 26 de fev. de 2022.

ABIOGÁS. **Políticas públicas no mundo**. Disponível em < <https://abiogas.org.br/politicas-publicas-no-mundo/> > Acesso: 18 de mar. de 2022

ABIOGÁS. **Potencial de biogás no Brasil**. Disponível em < <https://www.iea.org/policies/4638-white-paper-on-renewable-sources-of-energy> > Acesso: 16 de mar. de 2022

ABIOGÁS. **Setor no Brasil**. Disponível em < <https://abiogas.org.br/setor-no-brasil> > Acesso: 18 de mar. de 2022

ANDRADE, J. **Construção de um Índice de Sustentabilidade Ambiental para a Agroindústria Paulista de Cana-de-Açúcar [ISAAC]**. 2009, 259 p. Dissertação (Mestrado Profissional). Escola de Economia de São Paulo, Faculdade Getúlio Vargas, São Paulo, 2009.

BARBOSA, Ronaldo. **Histórico do setor sucroalcooleiro no Brasil: Implantação de uma usina alcooleira em Bambuí-MG**. In: Semana de Ciência e Tecnologia, IV., 2011. Instituto Federal de Minas Gerais, Bambuí.

BARRERA, Paulo. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. São Paulo: Ícone, 1993, p. 11.

BBC. **Guerra na Ucrânia: como dependência da Europa de gás russo financia invasão**. Disponível em < <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-60623903> > Acesso: 19 de mar. de 2022.

BNAMERICAS. **Brazil sugarcane biogas potential could surpass Bolivia natgas imports.**, 5 de nov. de 2020. Disponível em: < <https://www.bnamericas.com/en/features/brazils-sugarcane-biogas-potential-seen-surpassing-gas-imports-from-bolivia> >. Acesso em: 05 de fev. de 2022.

BNDES. **Panoramas Setoriais 2030 Sucroenergético**. Disponível em < [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14245/2/Panoramas%20Setoriais%202030%20-%20Sucroeneger%C3%A9tico\\_P\\_BD.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14245/2/Panoramas%20Setoriais%202030%20-%20Sucroeneger%C3%A9tico_P_BD.pdf) >. Acesso: 20 de mar. de 2022.

BUARQUE, C. **Avaliação Econômica de projetos**. 1ª ed. GEN Atlas, 1984.

CETESB. **P4231/2006: Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. São Paulo, 2006. 2p

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores anaeróbicos**. 2ª ed. ampliada e atualizada. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

CIBIOGÁS. **Biogás e gás natural: como se encaixam no novo mercado de gás.** Disponível em <<https://cibiogas.org/blog-post/biogas-e-gas-natural-no-novo-mercado-de-gas/>>. Acesso: 22 de mar. de 2022.

CIBIOGÁS. **Biogás no Brasil: História e Perspectiva de Futuro.** 2020. Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog-post/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro/>>. Acesso em: 19 de jan. de 2022.

CIBIOGÁS. **Biogásmap.** Disponível em <<https://mapbiogas.cibiogas.org/>>. Acesso: 17 de mar. de 2022.

CIBIOGÁS. Nota Técnica: Nº 001/2021 – **Panorama do Biogás no Brasil 2020.** Foz do Iguaçu, março de 2021. Disponível em <[https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1\\_1.pdf](https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1_1.pdf)> Acesso: 18 de mar. de 2022

CIBIOGÁS. **O Biogás e a solução para crises de abastecimento elétrico como a do Amapá.** 2020. Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog-post/o-biogas-e-a-solucao-para-crisis-de-abastecimento-eletrico-como-a-do-amapa/>>. Acesso em: 20 de jan de 2022.

CIBIOGÁS. **O Biogás e a solução para crises de abastecimento elétrico como a do Amapá.** 2020. Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog-post/o-biogas-e-a-solucao-para-crisis-de-abastecimento-eletrico-como-a-do-amapa/>>. Acesso em: 20 de jan de 2022.

COELHO, J.M., **Biogás no Brasil: Visão Atual.** In: FÓRUM DO BIOGÁS. VII., 2020, São Paulo.

DATASEBRAE. **Biogás.** Disponível em <<https://datasebrae.com.br/biogas/>>. Acesso: 07 de mar. de 2022.

ECO ENERGIA BRASIL. **Biogás e biometano.** Disponível em <<https://www.eco-energia-brasil.com/topico/biogas-biometano.html>>. Acesso: 09 de fev. de 2022.

EDUCA MAIS BRASIL. **Protocolo de Kyoto.** Disponível em <<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/geografia/protocolo-de-kyoto>> Acesso: 18 de mar. de 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balço Energético Nacional 2020: Ano base 2019.** Rio de Janeiro: 2020.

EPE. **Matriz energética e elétrica.** Disponível em <[www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica](http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica)> Acesso: 26 de mar. de 2022.

ESTEVES, H.B.B., **Biogás no Brasil: Visão atual e futura.** In: FÓRUM DO BIOGÁS. VII., 2020, São Paulo.

FAPESP. **Proálcool: uma das maiores realizações do Brasil baseadas em ciência e tecnologia.** Disponível em <<https://agencia.fapesp.br/proalcool-uma-das-maiiores-realizacoes-do-brasil-baseadas-em-ciencia-e-tecnologia/24432/>> Acesso: 18 de mar. de 2022

GAMBOA, L.; GALVÃO, G.D.A.; CARVALHO, M.M., **Economia Circular: um estudo bibliométrico**. In: Encontro nacional de engenharia de produção. XXXVI., 2016, João Pessoa.

GREENFACT. **EBA releases 2020 statistics report**. Disponível em <<https://www.greenfact.com/News/1374/EBA-releases-2020-statistics-report>> Acesso: 16 de mar. de 2022

IEA. **White Paper on renewable sources of energy**. Disponível em <<https://www.iea.org/policies/4638-white-paper-on-renewable-sources-of-energy>> Acesso: 27 de mar. de 2022

IEA. **White Paper on renewable sources of energy**. Disponível em <<https://abiogas.org.br/potencial-de-biogas-no-brasil/>> Acesso: 27 de mar. de 2022

ILÁRIO, Carla. **Aproveitamento de resíduos da cadeia sucroalcooleira para geração de energia**. 2020. 60f. Dissertação (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

INFOESCOLA.**BIOGÁS**. Disponível em <<https://www.infoescola.com/combustiveis/biogas/>>. Acesso: 10 de mar. de 2022.

MAPA. **Produção Brasileira de cana-de-açúcar, açúcar e etanol**. Disponível em <[https://www.udop.com.br/producao-brasileira-arquivos/15/11jan22\\_producao\\_brasileira\\_cana\\_acucar\\_etanol.pdf](https://www.udop.com.br/producao-brasileira-arquivos/15/11jan22_producao_brasileira_cana_acucar_etanol.pdf)> Acesso: 18 de mar. de 2022

MARQUES, M. O. **Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça**. In: SEGATO, S. V. et al. (Org.). Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 369-375.

MATCHE. **Tank cost estimate**. Disponível em <<https://www.matche.com/equipcost/Tank.html>> Acesso: 18 de mar. de 2022

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES; UNIDO; CIBIOGÁS. **Curso de Fundamentos do Biogás: Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira** GEF Biogás Brasil, MCTI. Brasília-DF, 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Governo Federal inaugura uma das maiores Plantas de Biogás no mundo para geração de energia elétrica sustentável**. 16 de out. de 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2020/outubro/governo-federal-inaugura-uma-das-maiores-plantas-de-biogas-no-mundo-para-geracao-de-energia-eletrica-sustentavel>> Acesso em: 14 de mar. de 2022.

NOGUEIRA, E. **Introdução à Engenharia Econômica**. UAB UFSCar, São Carlos, 2017.

NURSANTO, Andri. **Design and cost evaluation of anaerobic bioreactor for industrial waste**. 2017. 61f. Dissertação (Mestrado em Environmental Technology) – University of Stavanger, Stavanger, 2017.

PEIXE, Vany. **Análise da Viabilidade Técnica e Econômica da Queima do Biogás em uma Usina Sucroenergética**. 2018. 86f. Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2018.

PORTAL DO BIOGÁS. **Forma de uso do biogás**. Disponível em < <https://www.portaldobiogas.com/formas-de-uso-do-biogas/>> Acesso: 18 de mar. de 2022

PROBIOGÁS. **Viabilidade Técnico-Econômica de produção de energia elétrica em ETEs a partir do Biogás: Série Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto**. Brasília, 2016.

RICONNECT. **Inflação nos EUA mais alta em 40 anos: entenda os impactos**. Disponível em < [SANTOS, V. L. \*\*Estudo econômico das diferentes formas de transporte de vinhaça em fertirrigação na cana de açúcar\*\*. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2009.](https://riconnect.rico.com/vc/insight/inflacao-nos-eua-como-te-impacta?campaignid=316171546&adgroupid=55392294370&feeditemid=&targetid=dsa-19959388920&loc_interest_ms=&loc_physical_ms=1001773&matchtype=&network=g&device=c&devicemodel=&ifmobile=&ifmobile=0&ifsearch=1&ifsearch=&ifcontent=0&ifcontent=&creative=340508776298&keyword=&placement=&target=&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_term=&utm_campaign=GGLE_PESQ_DSA&hsa_tgt=dsa-19959388920&hsa_net=adwords&hsa_kw=&hsa_grp=55392294370&hsa_acc=7134496929&hsa_ver=3&hsa_ad=340508776298&hsa_cam=316171546&hsa_mt=&hsa_src=g&gclid> Acesso: 19 de mar. de 2022.</p></div><div data-bbox=)

SEBIGASCOTICA. **Biodigestor CSTR – reator de fluxo e agitação contínuos**. Disponível em < <http://sebigascotica.com.br/tecnologia/cstr-biodigestor> >. Acesso: 14 de mar. de 2022.

SEBIGASCÓTICA. **Biogás de vinhaça: uma realidade**. 27 de out. de 2020. Disponível em: < <http://sebigascotica.com.br/artigo/biogas-de-vinhaca-uma-realidade.html>> Acesso em: 14 de mar. de 2022.

SERUFO, Carla. **Potencial de produção de biogás a partir de resíduos lignocelulósicos** 2019. 91f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SOUSA, Eduardo. **Simulador do reator UASB para conversão de vinhaça em biogás**. 2014. 47f. Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2014.

SOUZA, L. P. **Modelagem e simulação da produção de biogás a partir da vinhaça em uma usina sucroenergética.** Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2019.

STRIPPEL. F; FINDEISEN. C; HOFMANN. F., **Biowaste to Biogas.** Fachverband biogas e.V., Germany, 2016.

**Synthesis, and Design of Chemical Processes.** Prentice Hall, NJ, 1998.

TUNES, Caroline. **Produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de efluentes orgânicos em reator UASB 2017.** 75f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2017.

TURTON, R.; BAILIE, R.C.; WHITING, W.B.; SHAEIWITZ, J. A. **Analysis, Synthesis and Design of Chemical Process.** Prentice Hall, NJ, 1998.