

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

ELISABETH CANDIOTO GARCIA

ANÁLISE ENERGÉTICA E AMBIENTAL PELO USO DA VINHAÇA  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DA TECNOLOGIA DE  
BIODIGESTÃO ANAERÓBICA

UBERLÂNDIA  
2018

ELISABETH CANDIOTO GARCIA

ANÁLISE ENERGÉTICA E AMBIENTAL PELO USO DA VINHAÇA  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DA TECNOLOGIA DE  
BIODIGESTÃO ANAERÓBICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental do Instituto de Ciências Agrárias Da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria da Graça Vasconcelos

UBERLÂNDIA

2018

ELISABETH CANDIOTO GARCIA

ANÁLISE ENERGÉTICA E AMBIENTAL PELO USO DA VINHAÇA  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DA TECNOLOGIA DE  
BIODIGESTÃO ANAERÓBICA

Trabalho de conclusão de curso aprovado para obtenção do  
Título de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de  
Graduação em Engenharia Ambiental - Instituto de Ciências  
Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia pela banca  
examinadora formada por:

Uberlândia, 05 de agosto de 2018.

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria da Graça Vasconcelos - Orientadora

---

Dra. Júlia Araújo de Lima

---

Me. Isabella Rodrigues da Cunha e Paula

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me permitir saúde e força para encarar os desafios e superar as dificuldades.

Aos meus pais, por todo o incentivo, apoio e amor que proporcionaram para que meu objetivo e sonho pudessem ser concretizados.

A Universidade Federal de Uberlândia, todo seu corpo docente, funcionários, administração e direção principalmente do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, que abriram as portas por meio de conhecimentos e que contribuíram para minha formação profissional.

A minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria da Graça Vasconcelos, pelo auxílio no pouco tempo que lhe coube, além de seus conhecimentos e suas correções e incentivos para a finalização deste trabalho.

A Usina São Martinho, que me proporcionou uma vivência prática de grande parte dos conhecimentos adquiridos na Universidade para minha formação profissional, cuja contribuição para este trabalho foi de extrema importância.

E a todos as outras pessoas, que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse finalizado com sucesso, o meu imenso e grato obrigado.

# **ANÁLISE ENERGÉTICA E AMBIENTAL PELO USO DA VINHAÇA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DA TECNOLOGIA DE BIODIGESTÃO ANAERÓBICA**

## **RESUMO**

A cultura da cana-de-açúcar é uma das atividades mais importantes para a economia brasileira, devido sua versatilidade em gerar diversos produtos no âmbito energético, alimentar, bem como subprodutos de extrema importância. Com o crescimento da produção de álcool e açúcar, os impactos ambientais gerados na forma de resíduos são extremamente danosos ao meio ambiente. Um dos subprodutos gerados no processo produtivo é a vinhaça, resíduo proveniente da destilação do vinho, cuja proporção é de 10 a 15 litros para cada litro de álcool produzido. O objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência energética da vinhaça em um período de safra de 2014/2015 na Usina São Martinho por meio de fórmulas obtidas pela literatura referentes ao balanço energético, bem como a eficiência ambiental através dos cálculos de emissões de gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>). Os resultados mostraram um saldo positivo de 110 TJ/ano de energia térmica e balanço de energia elétrica de 7,7 MWhe/ano bem como a geração de 111MWh e 4,98 MWh produzido respectivamente pelo CO<sub>2</sub> e SO<sub>x</sub>. Concluiu-se que pela quantidade de energia gerada, a eficiência da vinhaça é alta, sendo considerada uma boa alternativa para sua utilização, pois além de minimizar os impactos gerados pelo resíduo ao meio ambiente, os gases de efeito estufa produzidos no processo são revertidos como fonte de energia evitando sua emissão para a atmosfera.

**Palavras-chave:** Cana-de-açúcar; Digestão anaeróbica; Biogás.

# ENERGY AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS FOR THE USE OF VINEYARD FOR ENERGY GENERATION BY ANAEROBIC BIODIGESTION TECHNOLOGY

## ABSTRACT

The culture of sugar cane is the most important activities for the Brazilian economy, especially for the versatility in producing several products for the energetic sector and food industry, besides important sub-products. The growth of these activities has had many environmental impacts in production and about the waste generation. One of the most important waste generated is the vinasse. Vinasse is produced by the distillation of wine. For every one liter of alcohol is produced around of 10, 15 liters of vinasse. The objective of this study was to analyze the energy efficiency of vinasse during a period of 2014/2015 at the São Martinho Plant using formulas obtained from the literature on the energy balance as well as the environmental efficiency through calculations of emissions of effect gases greenhouse (CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>). The results showed a positive balance of 110 TJ / year of thermal energy and energy balance of 7.7 GWh / year as well as the generation of 111 MWh and 4.98 MWh produced by CO<sub>2</sub> and SO<sub>x</sub> respectively. The conclusion was that the efficiency of the vinasse is high, being considered a good alternative for its use, since in addition to minimizing the impacts generated by the waste to the environment, the greenhouse gases produced in the process are reverted as a source of energy avoiding its emission to the atmosphere.

**Keywords:** Sugar cane, Anaerobic digestion, Biogas.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 01. Produção total de etanol do Brasil na safra 2016/17

Tabela 02. Características físico- químicas da vinhaça

Tabela 03. Valores de concentração de DBO (mg/L) em diferentes efluentes

Tabela 04. Comparação entre os combustíveis e o biogás

Tabela 05. Dados primários referentes a produção de cana-de-açúcar

Tabela 06. Dados primários sobre a produção de cana-de-açúcar (Safra 2014-15)

Tabela 07. Dados primários do biodigestor da Usina São Martinho

Tabela 08. Poder calorífico do CH<sub>4</sub> e do biogás

Tabela 09. Resultados referentes ao balanço energético

Tabela 10. Emissões de CO<sub>2</sub>eq

Tabela 11. Emissões de SO<sub>x</sub>

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 01. Produção estimada de vinhaça no Brasil

Figura 02. Fluxograma do processo de produção do bioetanol de cana-de-açúcar

Figura 03. Processo da digestão anaeróbica

Figura 04. Reator anaeróbico de fluxo ascendente (UASB)

Figura 05. Etapas de produção e utilização do biogás

Figura 06. Turbina a gás vista em corte

Figura 07. Localização da Usina São Martinho

Figura 08. Biodigestão da vinhaça na Usina São Martinho

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. Objetivo geral .....	14
2.2. Objetivos específicos .....	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1. Problemas ambientais e energéticos .....	15
3.2. Energias renováveis .....	15
3.3. Matriz energética brasileira .....	16
3.4. Álcool e cana-de-açúcar no Brasil.....	16
3.5. Vinhaça.....	20
3.5.1. Definição .....	20
3.5.2. Potenciais usos para a vinhaça .....	22
3.5.3. Legislação – Normativas referentes ao lançamento da vinhaça.....	22
3.6. Digestão anaeróbica.....	23
3.6.1. A microbiologia/bioquímica do processo .....	24
3.6.2. Fatores que influenciam o processo de biodigestão anaeróbica .....	26
3.7. Biodigestores .....	28
3.7.1. Biodigestor de Fluxo Ascendente .....	28
3.8. Biogás .....	29
3.8.1. Conversão do biogás em energia elétrica.....	31
3.8.2. Purificação do biogás.....	32
3.9. Biodigestão da vinhaça .....	33

3.9.1. Biodigestão da vinhaça na Usina São Martinho.....	34
4. MATERIAISEMÉTODOS.....	36
4.1. Caracterização da área de estudo.....	36
4.1.1. Fluxograma da Usina.....	42
4.2. Equações.....	42
4.2.1. Consumo de eletricidade na biodigestão e dessulfurização.....	43
4.2.2. Balanço de emissões de gases de efeito estufa.....	44
4.2.3. Emissão de CO <sub>2</sub> evitada por produção de energia elétrica.....	46
4.2.4. Emissões de SO <sub>x</sub> .....	46
4.2.5. Cálculo de geração de energia elétrica.....	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

## 1. INTRODUÇÃO

A ampliação dos recursos energéticos é um dos grandes desafios para a sociedade contemporânea. A necessidade de utilização de novas fontes de energia proporcionou novas pesquisas e estudos sobre as energias renováveis e limpas e uma melhor otimização de seus usos.

De acordo com o Relatório Síntese do Balanço Energético de 2017, fornecido pelo Ministério de Minas e Energia, o Brasil possui a matriz energética mais renovável do mundo industrializado com 43,5% de utilização dividida em: biomassa de cana (17,5%), hidráulica (12,6%), lenha e carvão vegetal (8%) e lixo e outras renováveis (5,4%).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia em 2016, o aumento do uso de fontes renováveis cresceu em 30%, por isso é de extrema importância que ocorra cada vez mais a diminuição da dependência por fontes não renováveis, além de que o uso de fontes renováveis torna-se um modelo ambientalmente sustentável caso seja planejado e manejado com cautela.

É importante destacar dentre as utilizações de tais fontes renováveis, o relevante papel da cana-de-açúcar em todo contexto econômico principalmente devido aos produtos e subprodutos os quais ela gera e que possuem extrema influência para o desenvolvimento econômico, ambiental e social do país.

A produção de cana-de-açúcar no Brasil iniciou seu crescimento de forma acelerada após o estabelecimento do programa Proálcool em 1975 cujo objetivo foi a substituição em grande escala aos derivados de petróleo, devido a crise estabelecida na época no oriente médio, onde os valores dos barris de petróleo tiveram um grande aumento. Tal iniciativa trouxe após altos e baixos do programa implantado, a consolidação da produção brasileira frente ao mercado interno e externo (ANDRADE, 2012).

Segundo a Agência Embrapa de Informação e Tecnologia (AGEITEC), os principais produtos gerados pela cana-de-açúcar são o açúcar, o etanol anidro, utilizado na mistura com a gasolina brasileira, e também o etanol hidratado, que é

vendido comumente nos postos de gasolina. Como os produtos possuem um grande destaque no mercado, é de conhecimento o aproveitamento da cana-de-açúcar em sua totalidade, sendo assim gerados os subprodutos e resíduos como o bagaço, torta de filtro, melaço, vinhaça, óleo fúsel, álcool bruto e levedura seca.

Destacada como um dos subprodutos, a vinhaça possui outras nomenclaturas conhecidas como vinhoto, restilo ou tiborna e na quase totalidade dos casos, é empregada “in natura” na lavoura da cana-de-açúcar, em um volume que varia entre 400 a 500 m<sup>3</sup> por hectare, de acordo com a necessidade de nutrientes do solo, substituindo em parte a utilização de fertilizantes químicos, mantendo a fertilidade do solo após anos do cultivo da cana-de-açúcar, mineralizando a matéria orgânica, aumentando o conteúdo de cálcio, potássio, nitrogênio e fósforo (ROSSETO,1988).

A técnica intitulada fertirrigação apresenta em um pequeno prazo uma solução para o problema de acomodação desse resíduo. A porcentagem da área de fertirrigação nas usinas é bastante variável. Existem usinas que já aplicam a vinhaça em 70% da sua área de cultivo, por outro lado podem-se encontrar também, locais onde as áreas de fertirrigação estão bem abaixo deste valor. Pode-se considerar também que, de maneira geral, a cada safra o valor de área de fertirrigação das usinas aumenta, mostrando a preocupação das mesmas com o uso racional da vinhaça, buscando maior rendimento agrícola e redução no uso de fertilizantes químicos, bem como uma adequação de dose de vinhaça que não cause prejuízo ao meio ambiente (ANDRADE,2012).

Em dezembro de 2006, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo promulgou em Decreto a Norma Técnica P4.231, que estabeleceu critérios e procedimentos para a aplicação de vinhaça no solo. O principal problema da vinhaça e sua aplicação em relação aos impactos ambientais é que devido a sua alta concentração em matéria orgânica e potássio, com significativas concentrações de cálcio, magnésio e enxofre além de outros minerais em menores quantidades, e características como alta DBO (Demanda Biológica de Oxigênio) e alta DQO (Demanda Química de Oxigênio) causam a poluição por substâncias orgânicas. Por

possuir aspectos físicos relacionados a uma baixa produção por altas temperaturas, pode-se considerar um poluente químico devido ao seu poder de corrosão e poluente de natureza física devido ao calor (ANA, 2009).

Essas características geram impactos em mananciais de superfície, solos e águas de lençol freático. Existem estudos sobre alternativas para a utilização da vinhaça que é gerada em grandes quantidades. Lacôte et al., (1989) por exemplo, utiliza ração animal à base de vinhaça, bagaço de cana-de-açúcar e levedura para alimentação de bovinos confinados. Já Rolim & Freire (1998) estudaram como alternativa, o aproveitamento do material solo e vinhaça concentrada e sua possível utilização na fabricação de tijolos prensados para construção.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral apresentar uma alternativa ambientalmente viável para o uso da vinhaça, como a geração de energia por meio do biogás produzido e assim minimizando alguns impactos ambientais que a vinhaça causa ao meio.

### **2.2. Objetivos específicos**

Analisar o balanço energético e ambiental da geração de energia pela vinhaça por meio do processo de biodigestão anaeróbica na usina São Martinho na safra 2014/15.

### **3. REFERENCIALTEÓRICO**

#### **3.1. Problemas ambientais e energéticos**

A Revolução Industrial em meados do século XVIII, iniciada na Inglaterra, trouxe transformações em todos os âmbitos: sociais, energéticos, econômicos e ambientais. A substituição do modo de trabalho manual por máquinas teve como consequência, a consolidação do modelo capitalista e conseqüentemente a mudança de vida na grande maioria dos países. O uso de máquinas nos sistemas produtivos ocasionou um modo de produção acelerado, onde o tempo dos bens e produtos reduziu drasticamente. Com isso, o aumento do consumo, a aquisição de bens gerou uma intensa exploração dos recursos naturais dentre eles: carvão, lenha, gás, minérios, além do consumo excessivo de água (VICHI, 2009).

Na década de 80, o Brasil passou por dificuldades em seu setor energético. Tais dificuldades causaram em 2001, uma crise energética muito séria pelo alto consumo de energia devido ao crescimento populacional e alta produção pelas indústrias, o que acentuou a falta de planejamento no setor e a ausência de investimentos em geração e distribuição de energia. Devido a tal situação, criou-se incentivos no país para a busca de novas e diferentes fontes para produção de energia(PRATI, 2010).

#### **3.2. Energiasrenováveis**

As fontes de energia renováveis são formas de produção de energia em que suas fontes têm a capacidade de permanecerem disponíveis durante um grande período de tempo, por meio de recursos que se regeneram ou que estão ativados permanentemente. São considerados recursos não esgotáveis. Entre as várias fontes existentes, podemos citar a solar, a eólica, a hídrica, a biomassa, a geotérmica, a das ondas e a das marés (PENA, 2012).

A biomassa é definida como toda e qualquer matéria orgânica não fóssil e é utilizada para a queima e produção de energia. Sua importância está no aproveitamento de materiais que, em tese, seriam descartáveis, como restos

agrícolas (principalmente o bagaço da cana-de-açúcar). Existem três tipos de biomassa utilizados como fonte de energia: os sólidos (madeira, carvão vegetal, restos orgânicos vegetais e animais), os líquidos (etanol, biodiesel, etc.) e os gasosos (biogás, gás metano, etc.) (SEABRA, 2008).

### **3.3. Matriz energética brasileira**

A matriz energética é definida como sendo a oferta interna de energia (OIE) discriminada quanto às fontes e setores de consumo. As unidades mais usadas são caloria, joule e btu para o poder calorífico e kWh (quilowatt-hora) para eletricidade.

De acordo com o boletim “Energia no Mundo 2014-2015” publicado anualmente pela Secretária de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia (MME), em 2015 as fontes renováveis no Brasil totalizaram participação de 41,2% na matriz energética, indicador quase três vezes maior ao indicador mundial, de apenas 13,8%. Porém, apesar do Brasil ter valores consideráveis em relação a sua matriz energética renovável, ainda existem alguns desafios a serem combatidos em termos econômicos, institucionais e por meio da própria distribuição, para que se insira por completo o uso de tais fontes.

### **3.4. Álcool e cana-de-açúcar no Brasil**

O álcool historicamente foi utilizado como alternativa economicamente viável para combater as crises econômicas instaladas no Brasil desde o início da década de 1970, por meio do programa Proálcool. O programa foi criado na época da ditadura militar e surgiu com o objetivo principal de fornecer energia, além de incentivar a indústria açucareira, na qual, na época possuía preços baixos, para atender as demandas de combustível automotivo tanto para o mercado interno quanto externo. Algumas medidas tomadas foram o incentivo ao aumento da produtividade no setor agrícola, modernização e/ou construção de novas destilarias e unidades de armazenamento. O crescimento de áreas plantadas deu-se principalmente na região de Piracicaba e aos redores de Ribeirão Preto, localizadas no interior do estado de São Paulo. Entre 1975 até 1985, a produção de etanol aumentou em 20 vezes (KOHLHEPP, 1983).

Devido ao mercado ter que suprir tanto a exportação quanto a importação de açúcar e álcool, o aumento da poluição atmosférica foi agravado tanto pela queima que existe no processo produtivo da cana como pelo fato de haver um incentivo a compra de veículos movidos a álcool. Além disso, para a produção canavieira ter alto índice de aproveitamento e poucas perdas, o uso de agrotóxicos teve um grande crescimento, no qual afetou diretamente a saúde da população. Processos erosivos e contaminação de solos foram impactos frequentes, pois os cuidados de preservar as terras utilizadas eram inexistentes. (MANHÃES et al., 2003). No processo tradicional, são necessárias 13 toneladas de cana-de-açúcar para produzir 1m<sup>3</sup> de álcool (VAN HAANDEL,2003).

A Tabela 01 foi obtida pelo levantamento feito pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), disponibilizando a produção total de etanol referente a safra de 2016/17 divididos pelas regiões brasileiras.

Tabela 01. Produção total de etanol no Brasil na safra 2016/17

<b>REGIÕES</b>	<b>VALORES</b>
<b>Norte</b>	<b>214.051,0</b>
<b>Nordeste</b>	<b>1.389.071,0</b>
<b>Centro-Oeste</b>	<b>8.330.949,0</b>
<b>Sudeste</b>	<b>16.469.268,0</b>
<b>Sul</b>	<b>1.404.184,0</b>
<b>Norte/Nordeste</b>	<b>1.603.122,0</b>
<b>Centro-Sul</b>	<b>26.204.401,0</b>
<b>Brasil</b>	<b>27.807.523,0</b>

Fonte: CONAB (2016)

Tendo como base a relação de Lamo (1991), com a proporção de 1L de álcool para 10 a 15L de vinhaça, pode-se considerar que na safra de 2016/17 houve em média a geração de aproximadamente 347.594.037,5 mil L de vinhaça.

A indústria da cana-de-açúcar dá ao Brasil o título de maior produtor de cana do mundo. De acordo com os dados obtidos pela CONAB (2016), o país produziu na safra de 2016/17, 38.489,1 mil toneladas de açúcar em uma área plantada de 9.049,2 mil hectares. A previsão dada pela CONAB é que na safra de 2017/18, a produção de açúcar bata a meta de 39.461,4 mil toneladas em uma área plantada de 8.738,6 mil hectares.

A quantidade de resíduos que sobram após a produção do álcool e do açúcar possui um potencial significativo, porém não explorado energeticamente a médio e longo prazo. Considerando todo o processo produtivo de geração de álcool e açúcar, o efluente produzido em maior quantidade é a vinhaça ou também conhecida como vinhoto. As destilarias produzem entre 7 a 15 L de vinhaça por litro de etanol, mas o valor médio é de 12 L de vinhaça por litro de acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA,2009).

A Figura 01 mostra os dados obtidos em pesquisas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e CONAB, para a análise da proporção de vinhaça e etanol que foram produzidos. A figura 02 mostra um fluxograma do processo de produção do bioetanol de cana-de-açúcar, comum ao processo básico já existente pelo Brasil.

Figura 01. Produção estimada de vinhaça no Brasil

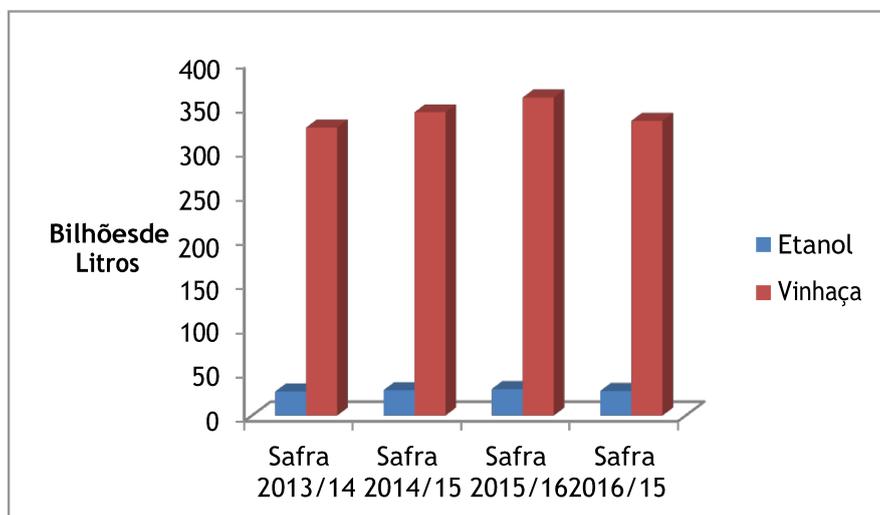
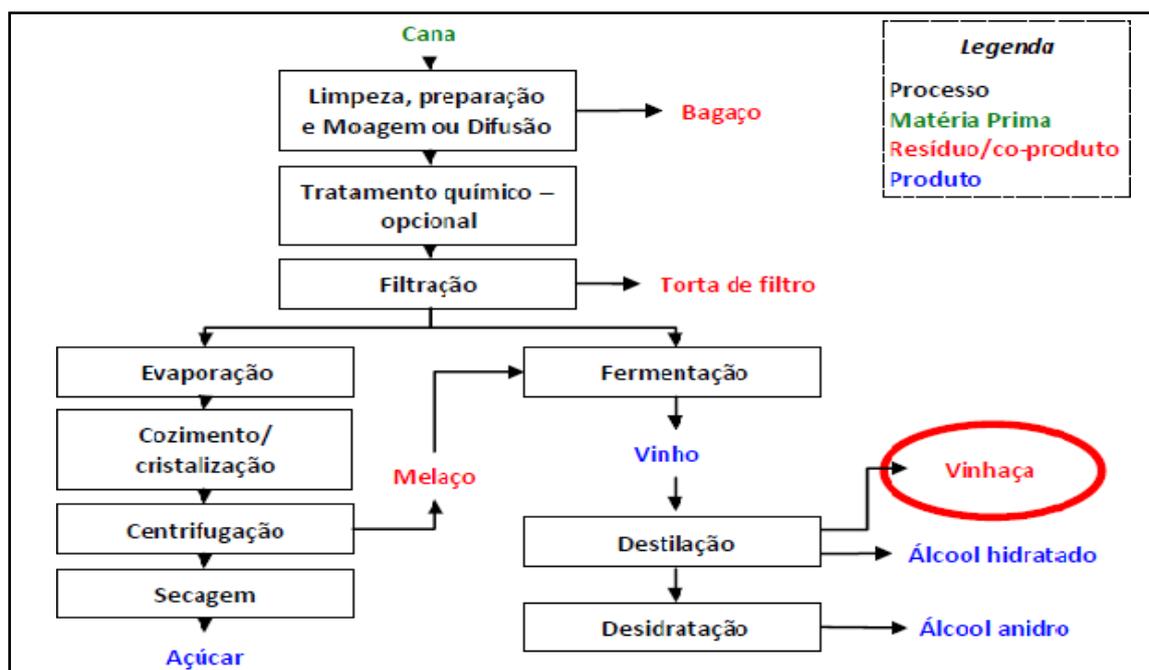


Figura 02. Fluxograma do processo de produção do bioetanol de cana-de-açúcar



Fonte: Adaptação do SEABRA (2008)

A Tabela 02 mostra as características físico-químicas da vinhaça, de acordo com Elia Neto et al., (2009) :

Tabela 02. Características físico-químicas da vinhaça

PARÂMETRO	VALOR
pH	4,3
Temperatura	90°C
Vazão da vinhaça	11,5 L/L etanol
DBO	14.833 mg/L
DQO	23801 mg/L
Relação DQO/DBO	1,6
Sólidos totais	32.788 mg/L
N : P : K	433: 34 : 2206 mg/L
Carga orgânica	274g DQO/ L etanol

Normalmente, a vinhaça é utilizada “in natura” na lavoura de cana-de-açúcar, auxiliando ou substituindo os fertilizantes. A técnica é chamada de fertirrigação e é mostrada como uma alternativa para sua disposição, pois o descarte em cursos d’água foi proibido. Apesar de existir estudos mostrando ganhos de fertilidade no solo, o excesso gera um efeito contrário (CORAZZA, 2006).

O uso da vinhaça como fonte de energia é uma alternativa “ecologicamente correta”, já que gera um uso para algo que causa danos graves ao meio ambiente. Quando a vinhaça é tratada em um biodigestor adequado utilizando o processo de digestão anaeróbica, gera-se até 13 litros nas condições normais de temperatura de biogás com uma proporção de 60% a 65% de metano (CH<sub>4</sub>) e 35 a 40% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (PINTO, 1999).

### 3.5. VINHAÇA

#### 3.5.1. Definição

A vinhaça é um subproduto que deriva da destilação de uma dissolução alcoólica chamada “vinho”. Considerada uma suspensão de sólidos orgânicos e minerais como potássio, cálcio e magnésio, contém os componentes do vinho não arrastados na etapa de destilação, e quantidades residuais de açúcar, álcool e compostos voláteis mais pesados. Por se tratar de uma suspensão com teor de sólidos em torno de 7%, dos quais 75% orgânicos e biodegradáveis apresenta elevados valores de DQO e DBO, motivo para ser um potencial poluidor. (SZYMANSKI et al., 2010).

A Tabela 03 mostra um comparativo de DBO para os efluentes mais gerados na indústria.

Tabela 03. Valores de concentração de DBO para diferentes efluentes

TIPO DE EFLUENTE	CONCENTRAÇÃO DBO (mg/L)	
	Faixa	Valor Típico
Esgoto Sanitário	110 - 400	220
Têxtil	250 - 600	
Laticínio	1000 - 1500	

Cervejaria	1611 - 1784	1718
Açúcar e álcool		25000

Fonte: Braile e Cavalcanti e CETESB (2004)

A composição da vinhaça pode variar de acordo com os seguintes fatores:

- Da matéria-prima, ou seja, se o mosto é proveniente de melaço obtido da fabricação de açúcar, se o melaço é diluído em água ou caldo das últimas moendas, ou ainda se o mosto é proveniente do caldopuro;
- Natureza e composição dos vinhos;
- Sistema de fermentação;
- Aditivos utilizados na fermentação, produtos químicos, ácido, antibióticos e nutrientes à base de nitrogênio e potássio;
- Tipos de aparelhos utilizados na destilação;
- Raça da levedura utilizada;
- Qualidade da água usada;
- Sistema de trabalho e influência dos operadores;

O processo de geração da vinhaça consiste basicamente na lavagem e moagem da cana-de-açúcar inteira ou picada, proveniente da lavoura, para extração do caldo de cana; a seguir sofre o processo de clarificação, concentração e centrifugação ou turbinagem para tratamento do caldo que contém sacarose em solução, glicose, levulose, matéria nitrogenada, etc. Logo após são obtidos o açúcar comercial e o mel que passa pelo processo de cozimento a vácuo para obtenção do açúcar de segunda, que resulta em mel final, também conhecido como mel pobre ou melaço. O mel final, diluído e transformado em mosto de melaço, é conduzido para as dornas de fermentação e dele resulta um líquido denominado vinho que será centrifugado para recuperar o fermento nas colunas de destilação; cujo resultado é álcool hidratado; o que sobra deste processo de destilação é vinhaça – resíduo da destilação do vinho (DA SILVA et al., 2007).

O desenvolvimento tecnológico e aprimoramento de técnicas para otimizar os processos, mostram também que atualmente algumas indústrias acrescentam antibióticos com o objetivo de eliminar contaminações que possam prejudicar a fermentação utilizada no processo de produção do etanol combustível. (JUNIOR, 2010)

### 3.5.2. Potenciais usos para vinhaça

Com todo o histórico de impactos ambientais causados pela vinhaça dentre os citados anteriormente desde o século passado e após a proibição de sua destinação final em cursos d'água, desencadeou-se a busca por tecnologias e novos usos para esse efluente gerado em quantidades extremamente altas. Laimeetal., (2011) listou diversas possibilidades tecnológicas para o tratamento e uso da vinhaça:

- **Concentração da Vinhaça:** A vinhaça em sua composição tem um elevado teor de água, a técnica de concentração consiste em evaporar parte desta água. Além da captação direta desta água para a indústria, há a diminuição dos custos com transporte da vinhaça concentrada, sua utilização varia desde fermento até fertilizante;
- **Combustão da Vinhaça:** O objetivo é queimar o resíduo e assim reduzir sua carga orgânica.
- **Digestão anaeróbia:** A digestão anaeróbia tem como objetivo reduzir a carga poluente da vinhaça e ao mesmo tempo produzir metano. Entretanto existe o custo de instalações estação de tratamento, necessidade de pós-tratamento e ainda o baixo valor associado a biogás;
- **Fertirrigação:** Esta solução encontrada para a vinhaça é a técnica mais utilizada desde a produção do etanol por via bioquímica. Consiste em utilizar a vinhaça para irrigar e fertilizar a própria lavoura, em função do seu alto teor de água e nutrientes, porém os impactos ambientais devem ser analisados criteriosamente.

Apesar da técnica mais utilizada que é a fertirrigação, neste trabalho será explorado a alternativa mais ambientalmente viável. As outras soluções, ainda são inviabilizadas devido a grande quantidade gerada do efluente e da sua quantidade alta de DBO e DQO.

### 3.5.3. Legislação – Normativas referentes ao lançamento da vinhaça

Apesar dos estados brasileiros terem autonomia para criar meios legais de cumprimento da legislação brasileira vigente, a realidade em relação ao descarte da vinhaça ainda está longe de ser ideal no território nacional. Dos 26 estados brasileiros existentes, apenas 8 estados, ou seja 30% , é que possuem uma legislação específica para o descarte da vinhaça.

Segundo Fernandes Filho e Araújo (2016), os Estados que não possuem tais normas são: Acre, Alagoas, Amapá, Amazonas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Paraíba, Piauí, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Rondônia, Roraima, Sergipe e Tocantins.

Para o Estado de São Paulo, a norma vigente é a P 4.231/2005 da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, que fornece às usinas as diretrizes para disposição de vinhaça ao mesmo tempo em que dá suporte jurídico aos órgãos fiscalizatórios.

A norma apresenta critérios e procedimentos detalhados para a aplicação de vinhaça seguindo parâmetros técnicos e bem específicos no solo, na agricultura, armazenamento e transporte originados pelas atividades sucro-energética no processamento de cana-de-açúcar. A norma fornece requisitos técnicos relativos à construção de tanques de armazenamento, à impermeabilização de canais, à concentração máxima de elementos nas amostras fiscalizadas e instruções de aplicação do efluente.

### **3.6. Digestão anaeróbica**

O processo de digestão anaeróbia é historicamente uma das mais antigas formas de tratamento biológico de águas residuárias. Basicamente, o processo consiste na utilização de micro-organismos específicos que agem nas condições de ausência de oxigênio (anaerobiose) e que degradam a estrutura de substratos orgânicos complexos, produzindo compostos da forma mais reduzida possível como o metano e o dióxido de carbono. A digestão anaeróbica é dividida em duas categorias: de estado sólido (Concentração de sólidos superior a 15%) e de estado líquido (Concentração de sólidos entre 0,5% e 15%). (SALOMON,2007)

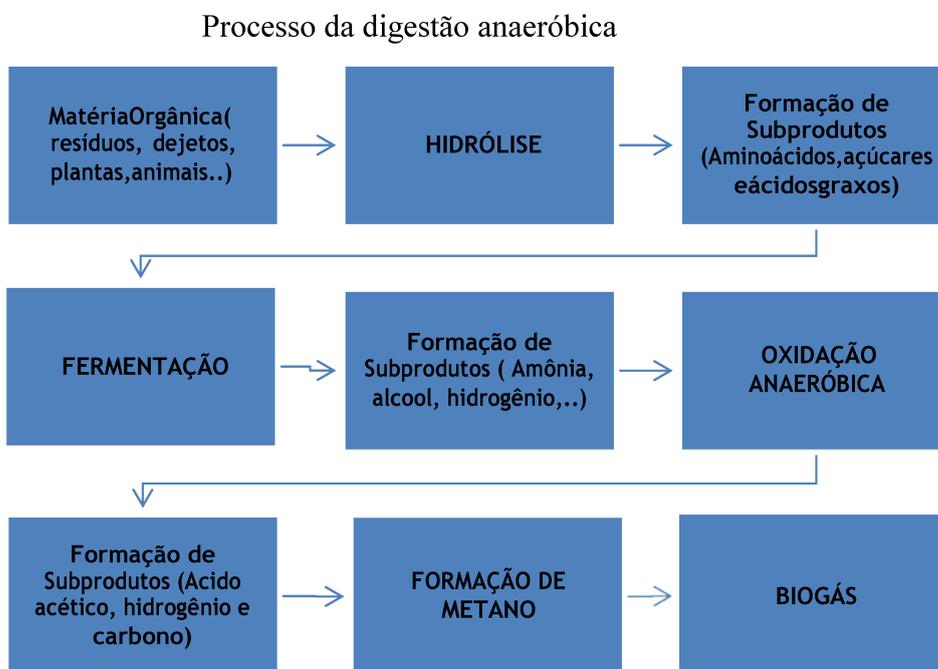
No caso deste processo biológico, um elevado potencial de produção de substâncias úteis faz com que, tal tratamento seja bastante vantajoso, no qual possui uma fração gasosa, uma fração líquida e uma fração sólida. A valorização da fração gasosa, chamada de biogás é composta por cerca de 60 a 70% de CH<sub>4</sub> e 30 a 35% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), além de resquícios de outros gases, como oxigênio (O<sub>2</sub>), azoto (N<sub>2</sub>), ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S), amoníaco (NH<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (COV) que são além de eficientes, ambientalmente favoráveis devido à baixa emissão de poluentes perigosos. Na

maioria dos casos, o biogás é valorizado energeticamente em instalações de cogeração para a produção simultânea de eletricidade e calor. (REGO; HERNANDEZ,2006)

O processo possui diversas vantagens em relação a outros métodos que também realizam esse objetivo de estabilização. De acordo com Turovskiy, et al., (2006) na maioria dos casos é produzido um excesso de energia em relação ao que se deve ser utilizada para a manutenção do processo de digestão. Sendo assim, o gás metano produzido é utilizado como fonte de energia. Outra vantagem se refere a redução na massa total de lamas através da conversão de matéria orgânica em metano, dióxido de carbono e água. Além de que a lama digerida contém nutrientes, como azoto, fósforo e matéria orgânica, e que pode ser utilizada para melhorar a fertilidade e a textura do solo. O processo pode ser totalmente eficaz na destruição de agentes patogênicos, especialmente, com o processo de digestão termófila.

### 3.6.1. A microbiologia/bioquímica do processo

A Figura 03 apresenta o processo da digestão anaeróbica: Figura 03.



Fonte: Adaptado Gurgel et al., (2014)

Este processo tem demonstrado ser cada vez mais complexo e suas principais etapas podem ser agrupadas em cinco sequências de degradação principais do processo de digestão anaeróbia e são descritas da seguinte forma:

I **HIDRÓLISE:** É a primeira fase da digestão anaeróbia, onde compostos orgânicos complexos, tais como proteínas, carboidratos e lipídios são transformados em simples produtos solúveis, tais como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos e glicerina, pela ação de enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias fermentativas (TUROVSKIY; MATHAI, 2006) e (KHANAL, 2008). Nesta etapa, a conversão de compostos insolúveis, tais como lenhina e o material celulósico, constitui um dos passos limitantes do processo de digestão anaeróbia (HOBSON, 1983, citado por GROBICKI, 1997). Esta etapa é muito importante para uma instalação de biogás, pois o material orgânico submetido ao processo de digestão deve ser quebrado em pequenas moléculas para que os microrganismos consigam se alimentar delas. A quebra das moléculas do material orgânico faz com que os microrganismos absorvam as pequenas partes do material orgânico e tirem proveito da energia que nelas estão contidas (KARLSSON et al., 2014).

II **ACIDOGÊNESE:** Ocorre a geração de ácidos orgânicos voláteis através dos compostos originados na hidrólise que são degradados por micro-organismos acidogênicos. Estes ácidos juntamente com o etanol são convertidos em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono por outro grupo de bactérias conhecidas como bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio. Vários ácidos são produzidos durante a acidogênese, mas o acetato é o primeiro substrato usado para a produção de metano em um digestor anaeróbico (KHANAL, 2008).

III **ACETOGÊNESE:** Os compostos orgânicos intermediários produzidos na acidogênese são oxidados por bactérias acetogênicas para produzir principalmente o acetato,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ , tornando-os apropriados para os microrganismos metanogênicos. Estão envolvidas nesta fase dois tipos de bactérias: as bactérias homoacetogênicas que produzem hidrogênio, dióxido de carbono, acetato e metanol a partir de compostos multicarbonados, como os ácidos gordos, monossacáridos, aminoácidos, purinas/ pirimidinas, ácidos orgânicos voláteis e álcoois; e bactérias sintróficas que produzem hidrogênio molecular a partir destes mesmos compostos multicarbonados (KARLSSON et al., 2012).

IV. **METANOGÊNESE:** Considerada a etapa mais importante e sensível na digestão anaeróbia, devido a formação do metano ( $\text{CH}_4$ ) principalmente a partir de

acetato, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ). Algum metano extra é produzido na conversão do dióxido de carbono e hidrogênio produzidos na acetogênese. Enquanto a taxa de degradação de bactérias acetogênicas na etapa anterior e das metanogênicas forem praticamente as mesmas, a atividade metabólica do estágio metanogênico é garantido (GIRARDI NETO et al., 2014). As bactérias metanogênicas metabolizam os produtos finais das reações anteriores em metano (PEREIRA, 2003). Estas bactérias podem subdividir-se em dois grupos tróficos

distintos, dadas suas características morfológicas e de utilização de substrato, designada mente em bactérias hidrogenofílicas e acetoclásticas. As bactérias hidrogenofílicas, são responsáveis, pela formação de biogás, basicamente utilizando hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias acetoclásticas são consideradas a espécie mais importante que intervém nesta etapa (CONNAUGHTON et al., 2006).

V. **SULFETOGÊNESE:** É o processo no qual sulfato, sulfito, e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de bactérias sulfato redutoras. A sulfetogênese é um problema potencial no tratamento anaeróbio, pois leva a formação de ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), que pode resultar em problemas de corrosão, liberação de maus odores e toxicidade do meio, e como consequência não se teria a produção de metano, desperdiçando o potencial energético que poderia ser aproveitado dentro ou fora da ETE. A sulfetogênese depende da concentração de sulfato no meio (CHERNICARO, 2007). Na presença de sulfato, muitos compostos intermediários passam a ser utilizados pelas bactérias sulfato redutoras provocando uma alteração nas rotas metabólicas no digestor, acarretando em competição entre as bactérias fermentativas acetogênicas e metanogênicas, pelos substratos disponíveis. Mizuno et al., (1997) mencionam que o tratamento anaeróbio, especialmente a etapa final da metanogênese, pode ser significativamente influenciada pelo sulfeto produzidos a partir de redução do sulfato. Em particular, uma alta concentração de sulfeto de hidrogênio livre pode levar à inibição da metanogênese e eventualmente falha no processo anaeróbio.

### 3.6.2. Fatores que influenciam o processo de biodigestão anaeróbica.

- **Temperatura:** Dos fatores físicos que afetam o crescimento microbiano, a temperatura é um dos mais importantes na seleção das espécies. Os microrganismos não possuem meios de controlar sua temperatura interna, dessa forma, a

temperatura no interior da célula é determinada pela temperatura ambiente externa. A taxa de crescimento específica máxima da população microbiana cresce com o aumento da temperatura, portanto, se o digestor for operado próximo a temperatura ótima pode-se conseguir uma considerável redução no seu volume (CHERNICHARO, 2007). A digestão anaeróbia é possível à temperaturabaixa(10°C), mas a eficiência e a carga orgânica diminuem drasticamente conforme a diminuição da temperatura. Segundo Speece (1996) para cada 5°C de queda de temperatura há um declínio de 34% da atividade dos microrganismos, o autor considera a temperatura ótima na faixa de 25 a 30°C.

- **pH e acidez do meio:** O pH do processo deve ser mantido entre 6 e 8, podendo ser considerado ótimo de 7 a 7,2; seu controle é em função do acúmulo de bicarbonato, da fração de CO<sub>2</sub> da parte gasosa, da concentração em ácidos voláteis ionizados e da concentração de nitrogênio sob a forma de amônia. Um fator que tende a elevar o pH é o teor de amônia, que aumenta quando as proteínas começam a ser digeridas. Outro fator atuante sobre o pH do meio, agindo de modo a estabilizá-lo, é o bicarbonato. A concentração do íon bicarbonato é diretamente proporcional ao teor de dióxido de carbono e ao pH do meio. Assim, se as bactérias do primeiro grupo são muito rápidas e produzem mais alimentos do que as metanogênicas conseguem digerir, o dióxido de carbono liberando tornará maior a concentração de bicarbonato, o que impede a queda acentuada no pH. Com o decorrer da degradação do material orgânico em um sistema fechado, o pH tende a se elevar e a produção de metano tem o seu pico (SPEECE, 1996).

- **Necessidades Nutricionais:** As necessidades nutricionais dos microrganismos presentes no sistema anaeróbio são baixas e estabelecidas de acordo com a composição química das células microbianas. Este dado exato é raramente conhecido, sendo esta informação determinada com base na composição empírica das células. Os elementos químicos em maior quantidade na composição dos microrganismos são: carbono (CO<sub>2</sub> pelos autotróficos e carbono orgânico pelos heterótrofos), oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, fósforo e enxofre. A relação de nutrientes em que DQO = N:P = 350: 5: 1 é geralmente utilizada nos processos de tratamento de efluente (SPEECE, 1996).

- **Tempo de retenção:** O tempo necessário para a mistura ser totalmente digerida no digestor é quando a produção de gás é máxima. Seu valor depende do

substrato, tipo de digestor, além de outros fatores, e pode variar de 50 dias, em alguns tipos de digestores rurais, para apenas algumas horas, em certos digestores industriais. A eficiência de acordo com Salomon (2007) deve-se ao tempo de retenção combinado com a taxa de decomposição dos sólidos voláteis. O tempo de retenção é definido pela relação entre o volume do digestor e o volume da carga diária, e pode variar em função da adição de nutrientes, ou pela agitação e variação da temperatura da mistura no digestor.

- **Impermeabilidade do ar:** Nenhuma das atividades biológicas dos micro-organismos, inclusive, seu desenvolvimento, reprodução e metabolismo, exige oxigênio, que em cuja presença são eles, de fato, muito sensíveis. A decomposição de matéria orgânica na presença de oxigênio produz dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); na ausência de oxigênio produz metano. Se o biodigestor não estiver perfeitamente vedado a produção de biogás é inibida. (SALOMON,2007).

### 3.7. Biodigestores

Biodigestor é um equipamento de fabricação relativamente simples, privado do contato com o ar atmosférico, no seu interior acontece à fermentação da biomassa (matéria orgânica). A matéria orgânica contida nele é metabolizada por bactérias anaeróbias (que se desenvolvem em ambiente sem oxigênio), por isso o ambiente tem que ser o mais vedado possível. A decomposição da matéria orgânica dá origem ao biogás e ao biofertilizante (DA SILVA,2015).

Os biodigestores são classificados de acordo com sua complexidade, seu dimensionamento e sua alimentação, variando de país para país, em função da experiência, da disponibilidade de resultados para elaboração de projetos mais adaptados a cada situação, do desenvolvimento técnico-científico e econômico, dos diferentes tipos de materiais de construção e de matérias-primas disponíveis para digestão.

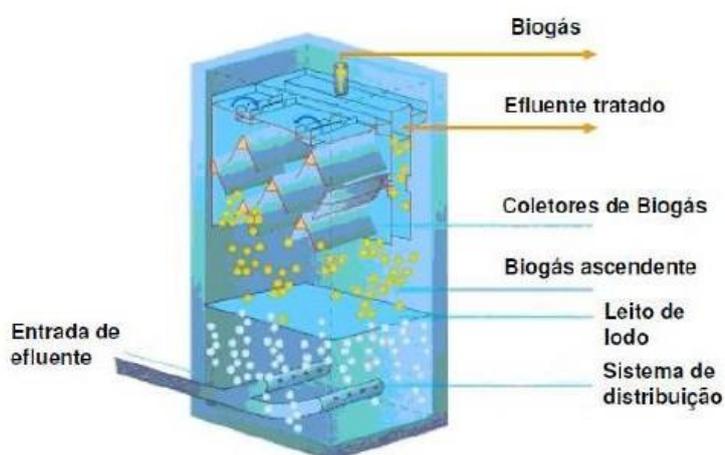
#### 3.7.1. Biodigestor de Fluxo Ascendente

De acordo com estudos realizados por Souza (2001), os reatores de fluxo ascendente com leito de Iodo (UASB) seriam os mais adequados para ser utilizado com a vinhaça. Basicamente, os UASB são reatores de manta de lodo e seu funcionamento consiste no bombeamento de baixo para cima do efluente, aonde se encontra sob condições anaeróbias a uma velocidade de ascensão que varia de 0,5 a

1,5 m/h. Ocorre então, um processo de seleção que pode resultar no crescimento de microrganismos anaeróbios em conglomerados compactos (grânulos) variando de tamanho entre 0,5 e 5 mm. Esses grânulos são biocatalíticos, ou seja, podem converter a matéria orgânica degradável em biogás de maneira rápida e completa (GRANATO,2003).

A figura 04 abaixo mostra uma representação em corte de como é a estrutura de um reator anaeróbico de fluxo ascendente em seu interior, além do sentido de seu funcionamento.

Figura 04. Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente (UASB)



Fonte: PAQUES (2014)

No reator do tipo UASB, a remoção do DQO de efluentes industriais chega a ser de 80% com uma carga orgânica aplicada de 4 a 12 kg DQO/m<sup>3</sup> /dia, com um TRH de 4 a 12 horas (TCHOBANOGLOUS10 et al., 1993 apud SALOMON, 2007). O biogás produzido é extraído na parte superior do biodigestor com o uso de um separador trifásico (sólido-líquido-gás) que separa o gás do efluente e faz o lodo retornar à câmara de digestão dando continuidade ao processo.

### 3.8. BIOGÁS

De acordo com a Agência da Embrapa de Informação e Tecnologia, o biogás é um gás resultante da fermentação anaeróbia (em ausência de oxigênio livre do ar) da matéria orgânica. Os principais componentes do biogás são o gás metano - CH<sub>4</sub>, no qual é um gás de efeito estufa e que contribui para o aquecimento global, e o gás carbônico - CO<sub>2</sub>. Quanto maior o teor de metano, mais puro é o biogás. O gás sulfídrico - H<sub>2</sub>S, também formado no processo de fermentação, é responsável pelo odor pútrido do gás e pode ocasionar corrosão nos componentes do sistema. A

proporção dos gases na mistura se modifica de acordo com o manejo aplicado.

Uma das características mais importantes de um combustível e que representa a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do mesmo (Kilo Joules/kg) é denominada poder calorífico, também conhecido como poder de queima, calor de combustão ou potência calorífica.

De acordo com Silva (2012), na determinação da composição de um combustível, verifica-se que o mesmo é composto normalmente pelos elementos carbono, hidrogênio e oxigênio. No momento da combustão do combustível, existe a formação de água pela presença do hidrogênio. A água formada pode estar no estado líquido, gasoso ou nas duas fases. No caso da água se condensar, obtém-se um poder calorífico do combustível maior (poder calorífico superior – PCS), mas caso a água estiver no estado gasoso o poder calorífico será menor (poder calorífico inferior – PCI). Sendo assim, o metano apresenta tanto poder calorífico superior quanto poder calorífico inferior e conseqüentemente o biogás que é formado majoritariamente por gás metano e gás carbônico terá um poder calorífico superior e outro inferior.

Em função da porcentagem de metano na composição do biogás, o poder calorífico do mesmo pode variar de 5.000 a 7.000 kcal por m<sup>3</sup>. Caso haja a eliminação completa do gás carbônico, o poder calorífico pode chegar a aproximadamente 12.000 kcal por m<sup>3</sup> (MAZZUCCHI, 1980).

A Tabela 05 mostra um comparativo do biogás e outros combustíveis em relação ao seu poder calorífico.

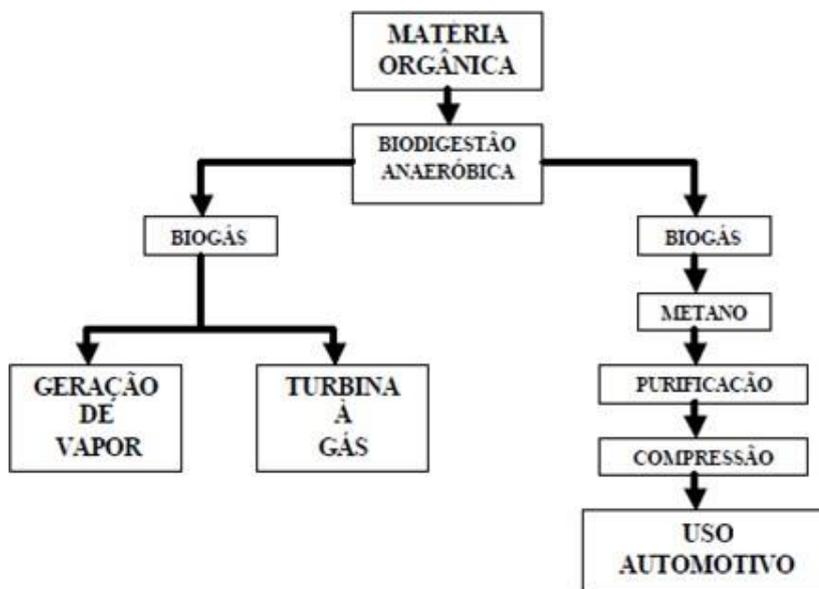
Tabela 05. Comparação entre biogás e outros combustíveis

<b>GÁS</b>	<b>PODER CALORÍFICO</b>
Biogás	5500
Butano	28000
Gás de cozinha – GLP	25775
Metano	8500
Propano	2200
Gás natural	7600

Fonte: Adaptado CHIBARI (2012)

A Figura 05 mostra o processo de produção simplificada do biogás, juntamente com suas utilizações mais comuns como geração de vapor, turbina à gás e para uso automotivo.

Figura 05. Etapas de produção e utilização do biogás



Fonte: LAMO (1991)

Dependendo a finalidade de uso do biogás, existem diversas alternativas de purificação do mesmo.

### 3.8.1. Conversão do biogás em energia elétrica

Entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso da conversão do biogás em energia elétrica, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador, que a converte em energia elétrica (COELHO et al., 2016).

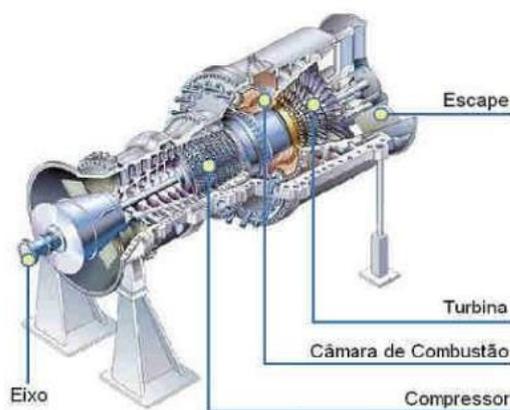
Nos processos de conversão destacam-se as seguintes tecnologias disponíveis comercialmente: turbina a gás, microturbinas e grupos geradores de combustão interna.

- **Turbina a Gás:** As turbinas a gás são equipamentos térmicos que realizam a conversão da energia de um combustível em potência. São geralmente constituídas por um compressor de ar cuja função é aumentar a pressão do ar

favorecendo a combustão, uma câmara de combustão onde ocorre a combustão da mistura ar-combustível e uma turbina responsável por converter a energia da combustão liberada em potência mecânica.

A figura 06 mostra a estrutura de uma turbina à gás vista em corte juntamente com todas as suas estruturas existentes.

Figura 06. Turbina a gás vista em corte



Fonte: FRANÇA JÚNIOR (2008)

- **Microturbinas a gás:** As microturbinas são sistemas reduzidos compostos por: compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico. São denominadas microturbinas porque o gerador elétrico necessita ter potência inferior a 250 KW e por apresentarem o mesmo princípio de funcionamento que as turbinas a gás, porém de menor porte. A maioria das microturbinas funciona a gás natural, mas pode-se utilizar, também, gasolina, óleo combustível, álcool, querosene e propano (FRANÇA JÚNIOR,2008).
- **Motores de combustão interna:** Os motores de combustão interna são máquinas térmicas onde a energia química do combustível se transforma em energia mecânica, por meio da combustão da mistura de ar e combustível (ICLEI, 2010). Por serem máquinas simples, robustas e flexíveis, os motores de combustão interna são os equipamentos mais utilizados para a queima do biogás. A geração de energia elétrica é realizada pelo grupo gerador, acoplado diretamente ao motor (ICLEI, 2010). Alguns estudos mostram que a eficiência do motor varia drasticamente de acordo com o teor de metano nobiogás.

### 3.8.2. Purificação do biogás

Existem algumas substâncias presentes no biogás que podem comprometer sua aplicação, como a água, dióxido de carbono, ácido sulfídrico, entre outros. O biogás produzido nos reatores UASB deve, portanto, passar por um tratamento de purificação, a fim de aumentar o seu poder calorífico, padronizar o gás produzido e atender as especificações necessárias para cada aplicação (geradores, caldeiras, veículos, etc.) (ICLEI, 2010).

De acordo com Iclei (2010), a presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, tornam o processo de queima menos eficiente, visto que essas substâncias misturam-se com o combustível e absorvem parte da energia gerada. A presença de ácido sulfídrico pode acarretar em uma combustão incompleta, falha de alimentação, perda de potência e corrosão precoce, diminuindo tanto o rendimento quanto a vida útil do motor térmico. A umidade pode comprometer o bom funcionamento das partes internas da microturbina (bicos injetores, câmara de combustão, paletas da turbina), além de causar a condensação em dutos, formação de soluções ácidas e problemas com a corrosão.

### **3.9. BIODIGESTÃO DA VINHAÇA**

De acordo com Freire e Cortez (2000), a biodigestão é um processo recomendado para a vinhaça devido às suas características de baixo teor de sólidos, alta DQO e pela grande quantidade produzida diariamente.

O biogás gerado pela vinhaça como citado anteriormente pode ter diversos usos. No caso da utilização do reator UASB para a vinhaça, é o mais indicado já que ele pode tratar efluentes com até 30 kg de DQO/m<sup>3</sup> reator/dia enquanto os convencionais tratam os efluentes com DQO de 2 a 4 mg/m<sup>3</sup> reator/dia.

Normalmente tais reatores são cilíndricos, porém a biodigestão da vinhaça possui uma vantagem que é a possibilidade de disposição *in situ* enquanto garante a produção do biogás para fins energéticos e geração de um ótimo fertilizante devido à total disponibilidade de potássio, principalmente.

É importante destacar que a composição da vinhaça afeta diretamente a taxa de produção do biogás e, proporcionalmente, a redução da DQO (Demanda Química de Oxigênio). Ou seja, quanto maior o teor de sólidos voláteis e a disponibilidade de nitratos, fosfatos e sulfatos, mais rápida será a finalização do

processo.

As primeiras experiências realizadas no Brasil com o objetivo de utilizar a vinhaça como fonte de energia em maior escala, ocorreu em um acordo realizado entre a Eletrobrás e Coperflu (Cooperativa Fluminense de Produtores de Açúcar e Álcool), porém o reator utilizado foi um modelo modificado tipo indiano (Campos, 1981).

### **3.9.1. Biodigestão da Vinhaça na Usina São Martinho**

Um caso importante de se destacar é o da Usina São Martinho, localizada em Pradópolis-SP iniciado em 1987 e que até nos dias de hoje o processo de biodigestão da vinhaça está em pleno funcionamento. Nesse caso, a vinhaça é tratada através de um processo termofílico (55°C) contínuo por meio de um reator piloto tipo UASB com capacidade de 75m<sup>3</sup>. Além das utilizações citadas anteriormente, o biogás é queimado em um forno gerador de gás quente para a secagem de leveduras.

Conforme Freire e Cortez (2000) menciona nos estudos aplicados na Usina São Martinho, a DQO foi reduzida para 9000 mg/L, com eficiência de 69%. Para obtenção desse resultado, o tempo de retenção foi de 9,8 horas com uma taxa de aplicação de 30kg de DQO/m<sup>3</sup> de reator/dia. Gerou-se ainda 10 Nm<sup>3</sup> de biogás/m<sup>3</sup>.dia. Tais valores são duas vezes maiores do que os apresentados na literatura especializada em relação ao processo mesófilo (35°C).

Por meio de experimentos conduzidos na planta – piloto na Usina São Martinho, depositou-se a vinhaça em um tanque de mistura que também recebeu parte do efluente reciclado pelo biodigestor com alguns produtos químicos como ureia, ácido fosfórico e soda, quando necessário. Do tanque de mistura, o material foi bombeado por meio de um trocador de calor diretamente para o biodigestor. Depois disso, o efluente foi direcionado a um decantador o qual reteve o lodo biológico excedente. O biogás, coletado na parte superior do biodigestor, foi enviado a um sistema de remoção de umidade e então mediu-se sua vazão antes de ser queimado.

O projeto em escala comercial da Usina São Martinho utiliza a biodigestão termofílica em um reator UASB à temperatura controlada de 55°C. A vinhaça chega ao processo vinda da coluna de destilação à 85°C. O reator de biodigestão tem uma capacidade de 5000 m<sup>3</sup> e um tempo de retenção hidráulica de

um dia. A indústria utiliza 75% da vinhaça remanescente como fertilizante junto com o material biodigerido. Cerca de 50% do biogás produzido da biodigestão da vinhaça é usado na secagem de leveduras o qual tem uma capacidade de cerca de 40 toneladas. O biogás excedente é queimado em caldeiras convencionais a bagaço, gerando um excedente de bagaço equivalente a 16.000 toneladas por safra. A composição média do biogás é 60% de CH<sub>4</sub> e 40% de CO<sub>2</sub> com um poder calorífico de 21.500Kj/Nm<sup>3</sup>.

Vale destacar que a Usina São Martinho aumentou o tratamento de vinhaça via biodigestão, da produção de efluente biodigerido, biogás e leveduras secas, a partir da biodigestão de vinhaça na Usina São Martinho, safras de 1995 a 1999. (CORTEZ et al., 1998)

É importante destacar que o setor sucroalcooleiro tem feito esforços e buscado meios para a questão da vinhaça e sua disposição. O desenvolvimento das tecnologias no tratamento dos efluentes líquidos tem trazido muitos benefícios no que se diz respeito a disposição da vinhaça. Benefícios como a redução da alta carga poluidora da vinhaça, geração de metano para o biogás, fertilizantes, além de benefícios ao meio ambiente, melhoria no balanço energético do álcool e criação de renda devido aobiogás.

## 4. MATERIAL EMÉTODOS

### 4.1. Caracterização da área de estudo

A Usina São Martinho, fundada em 1948, localiza-se na cidade de Pradópolis (SP), é a maior processadora de cana do mundo, com moagem de 10 milhões de toneladas/safra. A unidade se destaca como referência não apenas pelo porte, mas também por seus processos agroindustriais.

O funcionamento atual da usina é de 24 horas, dividido em três turnos diferentes. A quantidade de funcionários é de aproximadamente 5 mil colaboradores.

Figura 07. Localização da Usina São Martinho



De acordo com o página do Grupo São Martinho, os principais produtos e subprodutos gerados são:

- **Açúcar:** As usinas da São Martinho produzem vários tipos de açúcar bruto. Nos últimos anos, o principal produto tem sido o VVHP, um tipo de açúcar padrão negociado no mercadointernacional.

- **Etanol:** Utilizado nos tanques dos carros movidos a etanol; etanol anidro, que é misturado à gasolina como aditivo para abastecer os tanques dos veículos movidos a gasolina; e etanol industrial, usado principalmente na produção de tintas, cosméticos e bebidas alcoólicas.

- **Energia elétrica:** O bagaço da cana, resíduo do processo de fabricação de açúcar e etanol, é integralmente reaproveitado. A energia elétrica proporcionada por sua queima alimenta as usinas e ainda é vendida - um processo limpo que evita a utilização de combustíveis fósseis.

- **RNA:** Sal Sódico do Ácido Ribonucléico, utilizado na indústria farmacêutica e alimentícia como matéria-prima e também como realçador de sabor.

Como subprodutos do processo de produção de açúcar e etanol, a São Martinho fabrica e comercializa levedura, usada para ração animal; óleo fúsel, utilizado como solvente e na fabricação de explosivos e etanol amílico puro. No setor sucroenergético, praticamente nada se perde e tudo se transforma. As unidades da São Martinho mantêm um conjunto de esforços em toda a área agrícola e industrial com o objetivo de aumentar a produtividade e otimizar o uso dos resíduos.

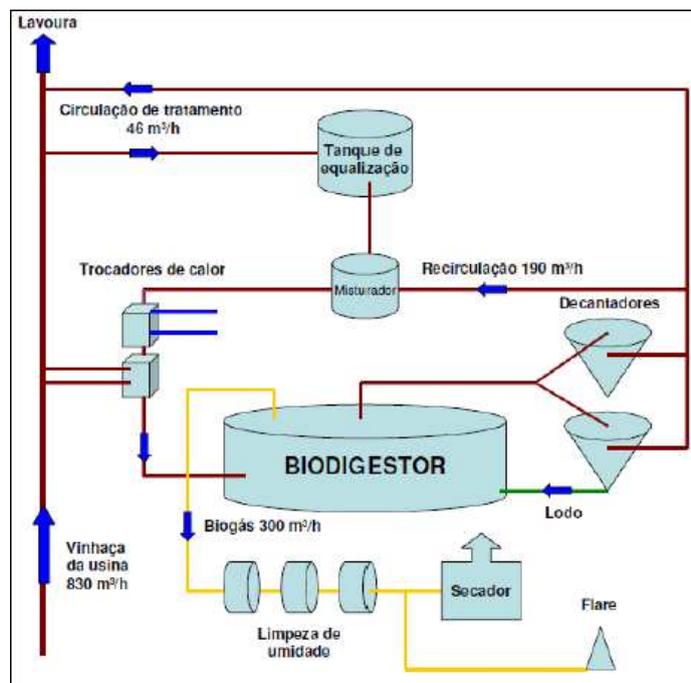
- **Vinhaça:** trata-se de um resíduo líquido da destilação que ocorre durante o processo de produção do etanol. É rico em potássio, um nutriente necessário à adubação da cana-de-açúcar. Por meio de ações rigorosamente controladas, a vinhaça é aplicada para fertirrigação, técnica de adubação que utiliza a água de irrigação para levar nutrientes ao solo cultivado. Jatos de água no ar caem como chuva em grande parte dos canaviais para facilitar a sua aplicação.

- **Torta de Filtro:** gerada na clarificação do caldo de cana, a torta é rica em fósforo e matéria orgânica. Após tratamento e complementação com nutrientes, resulta em um composto usado no plantio e nas socas de forma a substituir a utilização de fertilizantes minerais.

#### 4.1.1. Fluxograma da Usina

O fluxograma abaixo mostra em etapas como ocorre o processo de digestão anaeróbica da vinhaça nos biodigestores presentes na usina São Martinho.

Figura 08. Biodigestão da vinhaça na Usina São Martinho



Fonte: POVEDA (2015)

#### 4.2. Equações

Para o cálculo do balanço energético gerado pela vinhaça (energia térmica e elétrica) referente a safra de 2014/ 2015 da Usina São Martinho utilizou-se os dados primários que estão representados na tabela 06 abaixo cujo valores foram obtidos por meio do relatório de sustentabilidade da usina publicado anualmente.

O balanço energético consiste no cálculo tanto da energia térmica produzida pelo vapor do processo em si, como energia elétrica gerada pelo biogás obtido no processo de biodigestão anaeróbica.

Tabela 06. Dados primários sobre a produção de cana-de-açúcar  
(Safrá 2014/15)

<b>Dados Primários</b>	<b>Valores</b>
Dias corridos de safra	235
Quantidade de horas totais da safra (h/ano)	5640
Média de moagem diária (T/dia)	9821
Média de moagem anual (T/ano)	2308,039
Quantidade de cana para o álcool etílico (T)	1188178,47
Quantidade de álcool etílico por ano (m <sup>3</sup> )	95648
Quantidade de álcool etílico total por hectare de cana colhida (L)	5868
Produção de vinhaça por litro de álcool etílico (L/L)	10,85
Quantidade de vinhaça por ano (m <sup>3</sup> )	1040000

#### 4.2.1. Consumo de eletricidade na biodigestão e dessulfurização

Para este cálculo, adota-se uma potência instalada de 200 kWe e um biodigestor com capacidade de 5000 m<sup>3</sup>/dia (Tabela 07).

O consumo anual de eletricidade na biodigestão é dada pela equação 01.

#### Equação 01.

$$5640 \left( \frac{\text{horas}}{\text{ano}} \right) \times 200 \text{kWe} = 1.13 \text{MWhe/ano}$$

#### 4.2.2. Balanço de emissões de gases de efeitoestufa

- **Produção de biogás e energiaelétrica**

Para calcular a produção de biogás, houve o levantamento de dados referentes ao biodigestor instalado na usina e representados na tabela 07.

Tabela 07. Dados primários do biodigestor da Usina São Martinho

Reator	Kg DQO/ m <sup>3</sup> de vinhaça	Taxa de remoção DQO (%)	Prod. Gás (m <sup>3</sup> / kg DQO)	Nm <sup>3</sup> biogás/ m <sup>3</sup> vinhaça	CH4 (%)
UASB (5000 m <sup>3</sup> )	20-30	70	0,24	6,0	50

A Tabela 08 mostra o poder calorífico inferior do CH<sub>4</sub> e do biogás, cujas informações foram retiradas de estudos anteriores e que estão na literatura. Tais valores foram utilizados nas equações a seguir.

Tabela 08. Poder Calorífico do CH<sub>4</sub> e do biogás

Poder Calorífico		Fontes
PCI do CH <sub>4</sub>	35.530 KJ/Nm <sup>3</sup>	Salomon (2007)
PCI do Biogás	17.765 KJ/Nm <sup>3</sup>	Cálculo de 50% do PCI do CH <sub>4</sub>

Por meio dos dados das tabelas acima calculou-se os seguintes valores:

- Produção Anual de CH<sub>4</sub> ; (Equação02)
- Energia Térmica disponível por safra, resultante do biogás; (Equação03)
- Energia Elétrica disponível por safra, resultante do biogás; (Equação04)

Para o cálculo da produção anual de CH<sub>4</sub>, têm-se:

### Equação 02.

$$V_{\text{biogás}_{\text{ano}}} = V_{\text{biogás}_{V4^{\circ}\text{Bx}}} \times V_{4^{\circ}\text{Bx}_{\text{ano}}}$$

$$V_{\text{biogás}_{\text{ano}}} = 6 \frac{\text{Nm}^3}{\text{m}^3} \times 1040000 \frac{\text{m}^3}{\text{ano}} = 6240000 \text{ Nm}^3/\text{ano}$$

Sendo:

- $V_{\text{biogás}_{V4^{\circ}\text{Bx}}}$  = Volume de biogás produzido por m<sup>3</sup> de vinhaça
- $V_{4^{\circ}\text{Bx}_{\text{ano}}}$  = Volume de vinhaça 4°Bx produzido por ano

Para o cálculo da energia térmica disponível por safra resultante do biogás têm-se:

### Equação 03.

$$Q_{\text{biogás}_{\text{ano}}} = V_{\text{biogás}_{\text{ano}}} \times (1 - V\%_{\text{VAZ}}) \times \text{PCI}_{\text{biogás}}$$

$$Q_{\text{biogás}_{\text{ano}}} = 6240000 \text{ Nm}^3_{\text{ano}} \times (1 - 0,05) \times 17765$$

$$Q_{\text{biogás}_{\text{ano}}} = 110 \text{ TJ}_{\text{ano}}$$

Sendo:

- $V_{\text{biogás}_{\text{ano}}}$  = Volume de biogás produzido por ano
- $V\%_{\text{vaz}}$  = Porcentagem de volume vazado de biogás (POVEDA,2014)
- $\text{PCI}_{\text{biogás}}$  = Poder calorífico do biogás

Para o cálculo da energia elétrica disponível por safra, resultante do uso do biogás, tem-se:

#### Equação 04.

$$Ee_{ano} = (Q_{biogás_{ano}} \times \eta_{et}) - C_{biod_{ano}}$$

$$Ee_{ano} = (3,047 \times 10^{-11} \text{TMWh} \times 0,29) - 1,13 \text{ MWh}$$

$$Ee_{ano} = 7,7 \text{ MWh}_{ano}$$

Sendo:

- $Q_{biogás_{ano}}$  = Energia térmica produzida com biogás por ano
- $\eta_{et}$  = Rendimento do termoelétrico do motor (POVEDA, 2015)
- $C_{biod_{ano}}$  = Consumo anual de eletricidade na biodigestão

#### 4.2.3. Emissão de CO<sub>2</sub> evitada por produção de energia elétrica

Para esse cálculo, considerando uma intensidade de Carbono na Geração Elétrica Brasileira (ICGEB) ou seja, a quantidade de carbono que é emitida a cada MWh, é de 139,6 kg de CO<sub>2</sub>, segundo o relatório de balanço energético nacional com ano base de 2015.

Além do balanço positivo de geração de energia de 7,7 GWh/ano, calculado na equação 04.

Através dessa analogia, têm-se que a quantidade de emissões de GEEs evitadas foi de 93kgCO<sub>2</sub>eq/MWh.

#### 4.2.4. Emissões de SO<sub>x</sub>

Referentes as emissões de gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>) relacionados aos processos existentes da biodigestão da vinhaça e geração de energia. Em particular, para este cenário, os óxidos de enxofre cujas emissões são provenientes da atividade de combustão de caldeiras das próprias usinas termoelétricas.

Para o cálculo do SO<sub>x</sub> no ano, têm – se:

### Equação 05.

$$\begin{aligned} \text{SO}_{\text{xano}} &= V_{\text{biogásano}} \times (1 - V_{\% \text{VAZ}}) \times [\text{H}_2 \text{S}] \times \frac{M_{\text{SO}_2}}{M_{\text{H}_2\text{S}}} \\ &= 6240000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{ano}} \times (1 - 0,05) \times 113 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \times \frac{64,06}{34,08} \\ \text{SO}_{\text{xano}} &= 1,3 \text{ T SO}_2/\text{ano} \end{aligned}$$

Sendo:

- $V_{\text{biogásano}}$  = Volume de biogás produzido por ano
- $V_{\% \text{vaz}}$  = Porcentagem de volume de biogás vazado (POVEDA)
- $[\text{H}_2\text{S}]$  = Concentração de  $\text{H}_2\text{S}$  no biogás (PAQUES, 2014)
- $M_{\text{SO}_2}$  = Massa molecular do  $\text{SO}_2$
- $M_{\text{H}_2\text{S}}$  = Massa molecular do  $\text{H}_2\text{S}$

#### 4.2.5. Cálculo de geração de energia elétrica

Para o cálculo de geração de energia elétrica, têm-se as seguintes informações provenientes do Inventário da Eletrobrás (2016):

- Intensidade de Emissão de GEE – Fator de Emissão Específica:
  - ✓ CO<sub>2</sub>eq : 0,047 t CO<sub>2</sub>/ MWh
  - ✓ SO<sub>x</sub>: 383,17g/MWh

A quantidade de energia elétrica produzida em um ano completo de safra:

- **Gás Carbônico Equivalente (CO<sub>2</sub>eq)**

##### Equação 06

$$E.E.TotalCO_2eq = \text{Fator de Emissão Esp.} \cdot CO_2eq \cdot Qtd. \quad \frac{CO_2eq}{ano}$$

$$E. E. Total CO_2eq = 0,047 \times 2.360,8$$

$$E. E. Total CO_2eq = 111 \text{ MWh}$$

- **Óxidos de Enxofre (SO<sub>x</sub>)**

##### Equação 07.

$$E. E. TotalSO_x = \text{Fator de Emissão Esp } SO_x \times Qtd. SO_{x,ano} \quad E. E. TotalSO_x$$

$$= 383,17 \times 1,3$$

$$E. E. TotalSO_x = 4,98 \text{ MWh}$$

## 5. RESULTADOS EDISCUSSÕES

A tabela 09 representa os valores obtidos de energia térmica e elétrica da geração de energia pela vinhaça, calculados anteriormente.

Tabela 09. Resultados referentes ao balanço energético

<b>Situaçãoop roposta (Safr 2014/2015)</b>	<b>Energia Térmica (TJ/ano)</b>	<b>Energia Elétrica (MWhe /ano)</b>
Biodigestão		
+	110	7,7
Eletricidade		

Com base nos resultados acima, é possível perceber uma produção favorável de energia proveniente da biodigestão com 7,7 MWhe/ano de energia elétrica, além de 110 TJ/ano de energia térmica referente a safra calculada.

Com os cálculos realizados anteriormente, gerou uma tabela com resultados das emissões dos gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub> e SO<sub>x</sub>) de acordo com as fontes de emissões consideradas (moto gerador, biodigestor). Têm-se então:

Tabela 10. Emissões de CO<sub>2</sub>eq

<b>EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>eq</b>	<b>A cada m<sup>3</sup> de vinhaça (g)</b>	<b>Anual (T)</b>
<b>Moto gerador</b>	0	0
<b>Biodigestor</b>	2,27	2.360,80
<b>TOTAL</b>		2.360,80

Tabela 11. Emissões de SOx

<b>EMISSÕES DE Sox</b>	<b>A cada m<sup>3</sup> de vinhaça (g)</b>	<b>Anual (T)</b>
<b>Moto gerador</b>	1,22	1,3
<b>Biodigestor</b>	0	0
<b>TOTAL</b>		1,3

Pelos valores adquiridos na geração de energia elétrica por meio dos gases CO<sub>2</sub> e SO<sub>x</sub> de respectivamente 111 MWh e 4,98 MWh, pode-se concluir que o uso da vinhaça na digestão anaeróbica pode gerar um ganho energético positivo, além de inibir com que esses gases de efeito estufa cheguem até a atmosfera causando grandes impactos ambientais.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio de toda literatura levantada anteriormente e pelos cálculos e resultados mostrados neste presente trabalho, é possível considerar que o processo de biodigestão da vinhaça com a finalidade de geração de energia possui uma geração de energia considerável capaz de suprir as necessidades do processo e que é uma das alternativas ambientalmente viáveis para minimizar os impactos que a vinhaça in natura pode causar devido a sua alta carga orgânica.

É importante frisar que, apesar do processo de biodigestão não causar a redução do volume do resíduo gerado, o fato de promover a diminuição tanto da DQO (Demanda Química de Oxigênio) quanto da DBO (Demanda Biológica de Oxigênio) e assegurar que em caso de estar em condições e padrões corretos que não agridam o meio em que será disposta, a manutenção da qualidade de cursos d'água (subterrâneos ou livre), solos e até mesmo atmosférica (diminuição da emissão de gases de efeito estufa) será mantida ou em alguns casos, minimizada o impacto ao máximo.

A palha da cana-de-açúcar como mencionado, a qual consiste em basicamente tudo que é anterior a retirada para o processo de esmagamento para extração do caldo da cana, já é utilizada normalmente como fonte energética e a proposta da vinhaça para este fim, surge como um adicional a essa tecnologia, podendo em muitos casos suprir a necessidade tanto da usina que a produz quanto gerar para possíveis exportações.

Destaca-se ainda que a energia gerada por meio da vinhaça pelo biodigestor é uma alternativa bastante econômica pois se trata de uma tecnologia simples, além de que a energia do ponto de vista ambiental seria proveniente de uma fonte renovável, na qual haveria a diminuição da exploração e o uso de recursos não renováveis e que causam tantos danos ambientais.

Infelizmente, a literatura e os estudos referentes a esse tema ainda são escassos ou até mesmo desatualizados, e a exemplificação prática dessa tecnologia com a finalidade energética em nosso país ainda existem poucos exemplares.

Temas como o avanço na pesquisa de biodigestores, até mesmo os citados neste presente trabalho estão bem condicionados, porém referente especificamente a tecnologia da digestão anaeróbica da vinhaça na área energética e seus impactos ambientais e a relação econômica que tal energia contribui para mudanças, ainda são assuntos a serem estudados mais a fundo.

Sem dúvida, é uma área e um tema a ser amplamente estudado e investido, pois na posição que o Brasil se encontra no mercado mundial de álcool e açúcar e na produção da cana, tais estudos só iriam trazer benefícios, tanto do ponto de vista econômico, energético e até mesmo sustentável.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEITEC – Agência Embrapa de Informação e Tecnologia. **Definição do Biogás**. Disponível em: <

<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fb123vn102wx5eo0sawqe3qf9d0sy.html>>. Acesso em: 03 fev 2018.

ANA - Agência Nacional de Águas. Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética. Agência Nacional de Águas, BRASÍLIA, 2009.

ANDRADE, Fábio P. Uso da vinhaça na fertirrigação: revisão da literatura sobre a técnica e seus benefícios . Escola de Engenharia de Lorena EEL – USP. Trabalho de conclusão de curso, 2012.

BRAILE, P.M.; CAVALCANTI, J.E.W.A. Manual de tratamento de águas residuárias industriais. São Paulo: CETESB, 2004. Cap. 9, p.175-218: Usinas de açúcar e álcool.

BRASIL. Lei nº 1.413, de 14 de agosto de 1975. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 ago. 1975. Disponível em:

<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto-lei/1965-1988/De1413.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/De1413.htm)>. Acesso em: 10 jan. 2018

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 fev. 1998. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9605.htm)>. Acesso em: 10 jan. 2018.

BRASIL. Portaria nº124, de 20 de agosto de 1980. Estabelece normas para a localização de indústrias potencialmente poluidoras junto à coleções hídricas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 ago. 1980. Disponível em:

<<http://www.oads.org.br/leis/3426.pdf>>. Acesso em: 10 jan.2018.

BRASIL. Portaria nº 158, de 03 de novembro de 1980. Mantém proibição de lançamento direto ou indireto de vinhaça em qualquer coleção hídrica. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 nov. 1980. Disponível em: <<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/bra14334.pdf>> Acesso em: 10 jan. 2018.

BRASIL. Portaria nº 323, de 29 de novembro de 1978. Proíbe o lançamento, direto ou indireto, da vinhaça em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias do álcool. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 nov. 1978. Disponível em: <<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/bra14330.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

CHERNICHARO, C.A.L. Reatores anaeróbios. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2007. 247p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.5).

COELHO, S.T. ; VELÁZQUEZ, S. M. S. G; SILVA, O.C ; ABREU, F. C.  
Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um grupo gerador de 18Kw. V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 31 de maio a 2 de junho de 2016, Brasília – DF.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. P4.231. Dez 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Boletim de acompanhamento da safra brasileira (Cana-de-açúcar). Abril 2018. V4 – Safra 2017/18 N.4. – Quarto levantamento.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil. V.3, Safra 2014/15, Brasília, p. 1-64, 2017.

CONNAUGHTON, S., COLLINS, G., O’FLAHERTY, V. – Psychrophilic and mesophilic anaerobic digestion of brewery effluent: A comparative study – Microbial Ecology Laboratory, Department of Microbiology and Environmental Change Institute (ECI), National University of Ireland, 2006.

CORAZZA, Rosana I. Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lock-in na fertirrigação?. In: CONGRESSO SOBER,44., 2006, Fortaleza. Resumo...Fortaleza,CE. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/5/453.pdf>>. Acesso em: 22 abr2018.

DA SILVA, Z.R. Manual didático do biodigestor. Programa de pós graduação em educação científica, educacional e tecnológica. UTFPR. Curitiba/PR, p. 144, 2015.

ELIA NETO, A. &ZOTELLI,L.C. Caracterização das águas residuárias para reusoagrícola. Piracicaba, SP: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC),2009.31p.

FERNANDES FILHO, F.E.; ARAUJO, G.J. Normativos federais e estaduais reguladores da destinação da vinhaça no Brasil: uma proposta de nova abordagem. Revista de Administração, Contabilidade e Economia da Fundace, v.7, n.3, 2016.

FRANÇA JÚNIOR, A. T. Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto. 2008. 148 f.Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira , 2008.

FREIRE,W.J. ; CORTEZ,L.A.B. Vinhaça de cana-de-açúcar. Ed. Agropecuária, Guaíba. 2000. 203p.

GIRARDI NETO, J.; SANTOS, V.G.; ANDREGUETTO, L.G.; LANGE, G.H.; SILVA, J.D.; VALLE, J.A.B.; PINHEIRO, I.G. (2014) Quantificação de biogás em reatores anaeróbios através do método de deslocamento de volume de água. **Revista de estudos ambientais (online)**, v. 16, n. 1, p. 45-53.

GRANATO, E. F. Geração de energia a partir da biodigestão anaeróbia de vinhaça. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2003. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90820/granato\\_ef\\_me\\_bauru.p](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90820/granato_ef_me_bauru.p)

df?sequenc>. Acesso em 03 Fev 2018.

GROBICKI, A. (1997). Design manual for anaerobic treatment of industrial effluent. WRc, Swindon.

GURGEL, L. V. A.; PIMENTA, M. T. B.; CURVELO, A. A. D. S. Enhancing liquid hot water (LHW) pretreatment of sugarcane bagasse by high pressure carbon dioxide (HP-CO<sub>2</sub>). *Industrial Crops and Products*, v. 57, p. 141-149, 2014. ISSN 09266690.

ICLEI - Brasil - Governos Locais pela Sustentabilidade. Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, efluentes urbanos. Escritórios de projetos no Brasil, São Paulo, 2010.

KHANAL, S.K. Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and application. 2008. 308p.

KOHLHEPP, Gerd. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. *Estud. av.*, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142010000100017&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142010000100017&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 14 jun 2018.

LAIME, M.O. et al. Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão. 2011. *Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas*, v.5, N.3, P.16, 2011.

LACÔRTE, M.; BOSE, M.; RIPOLI, T. Desempenho de bovinos confinados com ração à base de bagaço de cana-de-açúcar auto-hidrolisado, levedura e vinhaça, sub-produtos da indústria de açúcar e álcool. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, v. 46, n. 2, p. 433-452, 1 jan. 1989.

LAMO, PAULO DE. Produção de Biogás a Partir de Vinhaça, *TECNOLOGIA/PESQUISA – STAB – vol. 7*, pp 16-25, 1991.

LITTIG, V. S. Geração de Energia Elétrica a partir do biogás produzido em Estações de Tratamento de Esgoto. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo – Vitória, 2011.

LUCAS JR., J.; CORTEZ, L.A.B.; SILVA, A Biodigestão. In: CORTEZ, L.A.B.; MANHÃES, M. S.; SOUZA, D.; BERTO, P. N. A. Acúmulo de potássio em solos de áreas canavieiras fertirrigadas no norte fluminense. *Agronomia*, v.37, n.1, p. 64-68, 2003.

MAZZUCCHI, O. A. J. Biodigestor rural. São Paulo, CESP, 1980. 29p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de pesquisa energética – EPE. Balanço energético nacional 2017 – Ano base 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 2018. Apresenta informações referentes aos dados do governo. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br> >. Acesso em: 14 mar2018

PECORA, V. Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PENA, Rodolfo F. Alves. "Fontes renováveis de energia"; *Brasil Escola*. Disponível em <<http://brasilescola.uol.com.br/geografia/fontes-renovaveis-energia.htm>>. Acesso em 02 de fevereiro de 2018.

PINTO, Cláudio P. Tecnologia da digestão anaeróbica da vinhaça e desenvolvimento sustentável. Dissertação (Mestrado em planejamento de sistemas energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP: [s.n.], 1999.

POVEDA, Manuel M. R.; COELHO, Suani T.; Impactos ambientais do procedimento da vinhaça com aproveitamento energético. In: CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL ,10., 2015, São Paulo. Resumo..SãoPaulo,SP. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/sites/default/files/PovedaImpactgosAmbientais.pdf>>. Acesso em: 10 mar 2018.

PRATI, L. Geração de Energia Elétrica a partir do biogás gerado por Biodigestores. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná – Curitiba, 2010.

REGO, Erick Eduardo and HERNANDEZ, Francisco Del Moral. Eletricidade por digestão anaeróbica da vinhaça de cana-de-açúcar: contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. In *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2006, Campinas (SP, Brazil) [online]. 2006. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000)>. Acesso em: 13 abr 2018.

ROLIM, M. M.; FREIRE, W. J. Resistência à compressão de tijolos fabricados com solo-vinhaça concentrada. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 17, n. 3, p. 1-8, mar. 1998.

ROSSETTO, R., & SANTIAGO, A. D.. Adubação - resíduos alternativos. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG01\\_39\\_711200516717.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html)>. Acesso em: 18 mar 2018

SALOMON, K. R. Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em:<[homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/publicacoes.asp](http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/publicacoes.asp)> . Acesso em: 03 de Fev de 2018.

SEABRA, J.E.A. Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos), Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008

SILVA, Gaspar A. Avaliação das Tecnologias de Disposição de Vinhaça de cana-de-açúcar quanto ao aspecto de desenvolvimento ambiental e econômico, USP ; Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica , 2012 – Tese de Doutorado.

SOUZA, C.F. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: obtenção de dados e aplicação no desenvolvimento de um modelo dinâmico de simulação da produção de biogás. 2001. 140 f. Tese (Doutorado em Produção Animal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.

SPEECE, R.E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. Nashville: Archae press. 1996.

TUROVSKIY I. S.; MATHAI P. K. **Wastewater sludge processing**. New York: Wiley. U.S. Environmental Protection Agency, Emerging Technologies for Biosolids Management, US EPA/832/R-06/005, Washington, DC (2006). 383 p.

VAN HAANDEL, Adrianus. "**Valorização de subprodutos gerados nas destilarias de álcool**", 2003.

VICHI, F. M . Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. 2 abril 2009. Disponível em:

<[http://www.producao.usp.br/bitstream/handle/BDPI/12309/art\\_VICHI\\_Energia\\_meio\\_ambiente\\_e\\_economia\\_o\\_Brasil\\_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.producao.usp.br/bitstream/handle/BDPI/12309/art_VICHI_Energia_meio_ambiente_e_economia_o_Brasil_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 12 mar 2018.