



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

JOÃO MARCOS DE CASTRO

Estudo do potencial de geração de bioeletricidade a partir de biogás proveniente de biodigestão de vinhaça no estado de Minas Gerais

Belo Horizonte  
2019

JOÃO MARCOS DE CASTRO

ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE  
BIOELETRICIDADE A PARTIR DE BIOGÁS PROVENIENTE DE  
BIODIGESTÃO DE VINHAÇA NO ESTADO DE MINAS GERAIS

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de Concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Antonella Lombardi Costa  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino

Belo Horizonte  
2018

C355e	<p>Castro, João Marcos de. Estudo do potencial de geração de bioeletricidade a partir de biogás proveniente de biodigestão de vinhaça no estado de Minas Gerais [manuscrito] / João Marcos de Castro. - 2018. xiii, 59 f., enc.: il.</p> <p>Orientadora: Antonella Lombardi Costa. Coorientadora: Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices e anexos: f. 53-59. Bibliografia: f. 47-52.</p> <p>1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Álcool - Teses. 3. Biogás - Teses. 4. Digestão anaeróbia - Teses. 5. Energia elétrica - Teses. 6. Vinhaça - Teses. I. Costa, Antonella Lombardi. II. Flausino, Bruna de Fátima Pedrosa Guedes. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.039(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES



PCTN

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DE BIOGÁS PROVENIENTE DE BIODIGESTÃO DE VINHAÇA NO ESTADO DE MINAS GERAIS**


**JOÃO MARCOS DE CASTRO**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.


Aprovada em 7 de dezembro de 2018, pela banca constituída pelos membros:

  
Profª. Antonella Lombardi Costa - Orientadora  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

  
Profª. Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Coorientadora  
UFOP

  
Prof. Carlos Eduardo Velasquez Cabrera  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

  
Profª. Sônia Seger Pereira Mercedes  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

  
Profª. Miriam Cristina Santos Amaral Moravia  
DESA/UFMG

Belo Horizonte, 7 de dezembro de 2018.

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço, primeiramente, a GADU por todas as oportunidades que a mim foram concedidas.*

*Agradeço ao meu filho pelo seu exemplo de paciência, persistência e superação e à minha esposa pelo companheirismo e incentivo para a realização deste curso.*

*A minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Antonella, pelo apoio e motivação durante o desenvolvimento de todo o curso e a minha coorientadora, Prof. Bruna Flausino pelas valiosas contribuições para a finalização deste trabalho.*

*Por fim agradeço a todos aqueles que de alguma forma me auxiliaram nesta caminhada, os quais sejam, professores, companheiros de curso, colegas de trabalho e demais colaboradores.*

*A todos meus mais sinceros agradecimentos*

*“Os dias prósperos não vêm por acaso,  
mas nascem de muita fadiga e persistência.”*

Henry Ford

## RESUMO

A produção de energia através da cana-de-açúcar ocorre de duas maneiras, sendo pela produção de sacarose contida no caldo extraído do colmo da cana e pela produção de celulose concentrada nas folhas, palhas e no bagaço que sobra após a moagem da haste ou colmos. A sacarose pode ser transformada em açúcar e etanol, dependendo da via escolhida para processamento do caldo extraído da planta após a colheita. Durante o processo de produção de etanol, é gerado um importante resíduo após sua destilação, denominado vinhaça. A vinhaça pode ser biodigestada, gerando um biogás com alto teor de metano ( $\text{CH}_4$ ) e que, posteriormente, pode ser utilizado para a geração de bioeletricidade, além de outras finalidades. O Estado de Minas Gerais é um dos principais produtores de cana-de-açúcar no Brasil, ocupando o terceiro lugar na produção de cana e de etanol e o segundo lugar na produção de açúcar (SIAMIG, 2018). Dessa forma, o objetivo deste estudo se concentrou em avaliar e calcular o potencial teórico da geração de energia elétrica através do biogás proveniente da biodigestão de vinhaça residual da destilação de etanol no setor sucroenergético das usinas licenciadas pelo estado de Minas Gerais. Dentre os principais resultados obtidos pode-se concluir que o Estado possui um importante potencial para produção de energia elétrica a partir do biogás da vinhaça. O montante de energia elétrica adicional que poderia ser gerado a partir do biogás de vinhaça, tomando-se como base para a simulação o volume de etanol produzido no Estado na safra 2015/16, representaria um incremento entre 17% a 24% de geração de bioeletricidade no setor.

Palavras-chave: Etanol; Vinhaça; Biodigestão; Biogás; Energia Elétrica.

## ABSTRACT

The production of energy through sugar cane occurs during the process of development of the plant in two different ways, which are the production of sucrose contained in the juice extracted from the stem and the production of cellulose concentrated in the leaves, straws and remaining bagasse from the milling of the stem. Sucrose, in turn, can be transformed into two distinct products that are sugar and ethanol, depending on the route chosen to process the juice extracted from the plant after harvesting and industrial processing of sugarcane. When the extracted juice is heated, the excess water evaporates, thus producing the crystallized sugar. However, if the broth is fermented, it will be transformed into ethanol. During the ethanol production an important residue is generated after distillation, called vinasse. Vinasse can be biodigested, generating a biogas with a high content of methane (CH<sub>4</sub>) that can be used for the generation of bioelectricity Minas Gerais is one of the main producers of sugarcane in Brazil, being the third producer of sugarcane and ethanol and the second of sugar (SIAMIG, 2018). Thus, the objective of this study was to evaluate and calculate the theoretical potential of the generation of electricity through biogas from the biodigestion of residual vinasse from ethanol distillation in the sugarcane industry of the plants licensed by the state of Minas Gerais. Among the main results obtained, it can be concluded that the State possesses an important potential to produce electric energy from the vinasse biogas. The amount of additional electricity that could be generated from vinasse biogas, taking as a basis for the simulation the volume of ethanol produced in the State in the 2015/16 crop, would represent an increase of 17% to 24% in bioelectricity generation in the sector.

Keywords: Ethanol, Vinasse, Biodigestion, Biogas, Electricity.



## LISTA DE GRÁFICOS, FIGURAS E TABELAS

<b>GRÁFICO 1 - CAPACIDADE INSTALADA DE MOAGEM DE CANA DE MINAS GERAIS</b>	<b>9</b>
<b>FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS USINAS EM ATIVIDADE MINAS GERAIS</b>	<b>10</b>
<b>FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR, SAFRA 2014.</b>	<b>11</b>
<b>FIGURA 3 - PÉ DE CANA-DE-AÇÚCAR</b>	<b>12</b>
<b>FIGURA 4 - PROCESSO SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL.</b>	<b>13</b>
<b>GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ETANOL EM MINAS GERAIS</b>	<b>15</b>
<b>FIGURA 5 - MATRIZ DE COPRODUTOS E APROVEITAMENTOS</b>	<b>16</b>
<b>GRÁFICO 3 - VARIAÇÕES DA MÉDIA, MÁXIMA E MÍNIMA ANUAL DA TAXA DE PRODUÇÃO DE VINHAÇA (L/L DE ETANOL) NAS USINAS DA REGIÃO CANAVIEIRA DO CENTRO-SUL (CTC, 2009).</b>	<b>18</b>
<b>TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS QUALIQUANTITATIVAS DE VINHAÇA PROCEDENTES DE MOSTO DE MELAÇO, CALDO E MISTO</b>	<b>21</b>
<b>TABELA 2 - PODER CALORÍFICO DO BIOGÁS E DE OUTROS COMBUSTÍVEIS COM EQUIVALÊNCIA COM O METANO</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 6 - PRODUÇÃO DE BIOGÁS DA VINHAÇA.</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 7 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS DA VINHAÇA</b>	<b>28</b>
<b>TABELA 3 - QUANTIDADE DE ATR NECESSÁRIA PARA OBTENÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL</b>	<b>32</b>
<b>TABELA 4 - QUANTIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR NECESSÁRIA PARA A FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL</b>	<b>33</b>
<b>GRÁFICO 4 - MIX DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL EM MINAS GERAIS.</b>	<b>34</b>
<b>TABELA 5 - EQUAÇÕES DO CÁLCULO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DE BIOGÁS DE VINHAÇA</b>	<b>40</b>
<b>TABELA 6 - TERMINOLOGIA UTILIZADA</b>	<b>40</b>
<b>TABELA 7 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DE BIOGÁS</b>	<b>41</b>
<b>GRÁFICO 5 - POTENCIAL DE ACRÉSCIMO DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DO BIOGÁS DE VINHAÇA EM RELAÇÃO AO POTENCIAL LICENCIADO</b>	<b>42</b>
<b>TABELA 8 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DE BIOGÁS DE VINHAÇA – SAFRA 2016/2017</b>	<b>43</b>

**GRÁFICO 6 - POTENCIAL DE ACRÉSCIMO DE GERAÇÃO DE  
BIOELETRICIDADE A PARTIR DO BIOGÁS DE VINHAÇA – SAFRA  
2016/2017 .....43**

## LISTA DE ABREVIATURAS

ATR - Açúcar Total Recuperável

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CGEE – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos

CH<sub>4</sub> – Metano

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

COP21 - 21ª Conferência do Clima

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono

CCT – Corte, Carregamento e Transporte

CTC – Centro de Tecnologia Canavieiro

DQO - Demanda Química por Oxigênio

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais

*IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change* - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

PEMC – Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais

Proálcool - Programa Nacional do Alcool

SIAMIG – Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais

SEAPA - Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais

SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas

NO<sub>x</sub> – óxidos de nitrogênio

*UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente

UNICA - União da Indústria de Cana de Açúcar

*VHP - Very High Polarization* - Açúcar bruto, matéria prima para a produção de açúcar refinado e outros processos de industrialização.

1G – Etanol de primeira geração

2G – Etanol de segunda geração

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS .....	3
1.1.1	OBJETIVO GERAL .....	3
1.1.1.1	<b>Objetivos Específicos</b> .....	4
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>6</b>
2.1	BREVE HISTÓRICO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL E EM MINAS GERAIS .....	6
2.2	CARACTERIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DO SETOR SUCROENERGÉTICO DE MINAS GERAIS .....	9
2.3	CANA-DE-AÇÚCAR: PRODUTOS, COPRODUTOS E RESÍDUOS .....	11
2.3.1	<b>Aproveitamento dos Resíduos do Setor Sucroenergético</b> .....	15
<b>3</b>	<b>VINHAÇA: PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES</b> .....	<b>19</b>
3.1	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA VINHAÇA.....	20
3.2	PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA VINHAÇA .....	21
3.3	BIOGÁS DE VINHAÇA: PRODUÇÃO E LIMPEZA .....	22
3.4	TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE VINHAÇA .....	25
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>29</b>
4.1	LEVANTAMENTO DE DADOS .....	29
4.2	METODOLOGIA.....	30
4.3	DESENVOLVIMENTO DOS CÁLCULOS PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DA VINHAÇA.....	30
4.3.1	FLEXIBILIZAÇÃO DA PRODUÇÃO, ATR E MIX DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL .....	32
4.3.2	CÁLCULO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ETANOL .....	34
4.3.3	CÁLCULO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE VINHAÇA .....	35
4.3.4	CÁLCULO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE VINHAÇA...	36
4.3.5	CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE VINHAÇA.....	38
<b>5</b>	<b>ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE VINHAÇA NO ESTADO DE MINAS GERAIS</b> .....	<b>39</b>

5.1	CÁLCULO DOS POTENCIAIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE VINHAÇA .....	39
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os países em desenvolvimento que se comprometeram com a redução de emissões de gases de efeito estufa, assumindo uma das metas mais ambiciosas do “Acordo de Paris, como resultado” da 21ª Conferência do Clima (COP21), realizada em dezembro de 2015. De acordo com os compromissos assumidos na chamada “Contribuições Nacionalmente Determinadas Pretendidas” (INDC, em inglês), o Brasil deverá ter uma participação de 18% de biocombustíveis na sua matriz energética até 2030, e um aumento de 10% para 23% no uso de energias renováveis (além da geração hídrica) na sua matriz elétrica, o que inclui o incremento da participação de biomassa (Portal Brasil, 2016). Dentre os biocombustíveis já produzidos pelo Brasil, destaca-se o etanol proveniente da cana-de-açúcar que, historicamente, tem participação significativa na economia do país.

Para que o Brasil possa cumprir a meta assumida na COP21, no que se refere à sua matriz energética, terá que praticamente dobrar sua produção de etanol, passando dos atuais 28 bilhões de litros para 50 bilhões de litros até 2030. A estimativa é de que para isso será necessário a construção de mais 75 usinas de etanol, considerando-se a média de moagem de 3,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar para cada unidade (UNICA, 2015).

Daí a importância do maior aproveitamento energético da cana-de-açúcar, que é, uma planta polivalente, tanto do ponto de vista da produção de alimento (açúcar e bebidas), quanto como fonte de energia (etanol e eletricidade). Atualmente, o setor sucroalcooleiro já introduziu um novo item em sua cartela de produtos. Trata-se do chamado “plástico verde” (polietileno), proveniente da implantação de unidades de alcoolquímica junto às usinas de processamento de cana-de-açúcar.

A produção de energia através da planta da cana-de-açúcar ocorre durante o seu desenvolvimento e provém de duas rotas distintas, sendo:

- a- na produção de sacarose, que é um adoçante de alta energia;
- b- na produção de celulose, que está concentrada nas folhas e palhas, além do bagaço que sobra após a moagem do colmo.

A sacarose pode ser transformada em açúcar ou etanol, de acordo com a rota de produção a ser escolhida durante o processamento do caldo da cana. Já a celulose pode ser transformada em energia através da queima direta em caldeiras ou

submetido a processos de hidrólise enzimática ou ácida para a produção de etanol de segunda geração (ANDRADE, 2014).

Na atualidade, praticamente toda cana-de-açúcar que o Brasil produz é transformada em etanol ou açúcar. O processo industrial inicia-se com a extração do caldo da cana, por meio de moendas ou difusores. Quando este caldo é fervido, o excesso de água evapora e ele se transforma em açúcar cristalizado. Porém, se este mesmo caldo for fermentado, ele se transformará em etanol (MATEUS, 2010). A fermentação alcoólica nada mais é do que o uso de microorganismos (leveduras) que quebram as moléculas dos açúcares (glicose, frutose e sacarose) que compõem o caldo da cana para a conversão em energia celular, com a produção do etanol de primeira geração, o chamado etanol 1G. Após a retirada do caldo da cana, o que sobra é uma biomassa de alto valor energético chamada bagaço. Normalmente, esse bagaço é queimado em caldeiras para geração de energia elétrica, consumida nas próprias usinas, cujo excedente é vendido para outros consumidores ou concessionárias de energia elétrica. Esse bagaço, juntamente com as palhas e folhas retiradas do campo, ainda podem ser transformados em etanol celulósico, o chamado etanol de segunda geração ou 2G (MANOCHIO, 2015). Segundo a autora, o alto custo de produção de etanol 2G, somado a problemas de eficiência no processamento enzimático, ainda são as principais razões pelas quais este produto não se tornou realidade no setor. De acordo com Moraes (2015), no Brasil, atualmente, existem estudos promissores para o desenvolvimento da produção em larga escala, porém o atual estágio de desenvolvimento da produção de etanol 2G ainda está em fase de pesquisa.

Durante o processo de produção, é gerado um importante subproduto proveniente da destilação do etanol 1G e 2G. Este subproduto é a vinhaça ou vinhoto. Devido a sua composição, a vinhaça constitui-se em um efluente com alta carga poluidora, sendo necessária sua correta destinação. A vinhaça proveniente da destilação do etanol 1G é muito utilizada na fertirrigação da lavoura, possibilitando a melhora dos solos agricultáveis e promovendo uma importante redução nos custos de plantio. No entanto, existem controvérsias e discussões a respeito de sua intensiva aplicação nas próprias lavouras de cana-de-açúcar, isto devido ao elevado potencial poluente, pois a vinhaça contém altos níveis de compostos orgânicos e nutrientes, principalmente potássio, além de nitrogênio e fósforo. Esta mesma técnica não pode

ser utilizada com a vinhaça proveniente do etanol 2G, pois além de também conter uma alta carga poluidora, já não possui a mesma riqueza de nutrientes que primeira (MORAES, 2015). Moraes (2015) relata que ambas as vinhaças podem ser biodigeridas e transformadas em uma significativa fonte de energia alternativa devido ao alto teor de gás metano ( $\text{CH}_4$ ) contido no biogás gerado a partir deste processo. Assim, a biodigestão da vinhaça surge como uma possível alternativa para uma destinação mais nobre deste resíduo, além da otimização da energia utilizada no processo produtivo (MORAES, 2015).

A produção de vinhaça é ditada pela produção do etanol, que por sua vez pode variar de acordo com o tipo de unidade industrial e com as condições mercadológicas. Desta forma, as usinas integradas podem produzir mais açúcar, ou etanol, de acordo com o melhor retorno financeiro de cada produto em um determinado momento.

Entretanto, conforme mencionado por Manochio (2015), apesar de ser uma alternativa interessante para a otimização energética e aumento da sustentabilidade da indústria de bioetanol, o aproveitamento da vinhaça para a produção de biogás através da biodigestão ainda é pouco explorado pelo setor sucroenergético nacional.

Minas Gerais é um dos maiores produtores de cana do Brasil e ocupa o terceiro posto no *ranking* nacional de produção de etanol e, conseqüentemente, possui um enorme potencial para geração de energia elétrica através do biogás proveniente do processo de biodigestão da vinhaça.

Diante deste contexto, fica evidenciada a relevância do dimensionamento do potencial de bioeletricidade gerada a partir do biogás proveniente de vinhaça produzida em Minas Gerais. Este poderia subsidiar o setor com relação às possibilidades de novos investimentos bem como justificar a adoção de políticas públicas e a criação de linhas de financiamentos que possibilitem a exploração de tal potencial.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do processo de biodigestão da vinhaça



produzida durante a destilação do etanol de primeira geração - 1G, do setor sucroenergético do estado de Minas Gerais.

#### **1.1.1.1 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são:

- a) Mapear todos os empreendimentos sucroenergéticos em atividade em Minas Gerais, analisando o potencial de produção de açúcar, etanol e ambos, a partir dos dados disponibilizados por órgãos governamentais e não governamentais ligados ao setor;
- b) Analisar o potencial de produção de vinhaça das usinas em atividade localizadas no Estado;
- c) Quantificar o potencial de produção de biogás a partir da biodigestão da vinhaça no Estado;
- d) Estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás de vinhaça considerando o volume de etanol produzido na safra 2015/2016 (período de realização da pesquisa) em Minas Gerais.

## **1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O trabalho é constituído de 6 capítulos, sendo o primeiro destinado à introdução sobre tema e descrição dos objetivos geral e específicos, bem como da estruturação do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada a revisão da literatura com um breve histórico do setor sucroenergético no Brasil e, especialmente, no Estado de Minas Gerais. Também é caracterizada a cadeia produtiva do setor sucroenergético mineiro, bem como da cana-de-açúcar e seus coprodutos e resíduos.

O terceiro capítulo trata especificamente da caracterização da vinhaça e da produção do biogás. Neste capítulo é estudado o estado da arte da vinhaça enquanto fonte geradora de energia, considerando desde sua produção e biodigestão, até o seu aproveitamento energético. O objetivo principal deste capítulo é enfatizar a utilização do biogás de vinhaça para produção de energia elétrica.

No quarto capítulo é descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho, demonstrando a modelagem e o desenvolvimento das fórmulas utilizadas para os cálculos, bem como os levantamentos de dados.

O quinto capítulo é destinado ao desenvolvimento dos cálculos propriamente ditos para a determinação do potencial teórico de geração de energia elétrica a partir do biogás em Minas Gerais. A partir dos resultados obtidos é realizado um estudo comparativo deste potencial com o montante de cogeração já licenciado no Estado.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões relativas ao estudo descrito no trabalho e sugestão para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 BREVE HISTÓRICO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL E EM MINAS GERAIS

As atividades agrícolas e econômicas do setor sucroalcooleiro, historicamente figuram entre as mais antigas e importantes do Brasil, em seus diferentes períodos. Siqueira (2013) destaca que a produção de cana-de-açúcar sempre foi relevante para a economia brasileira. Foi muito importante principalmente nos primórdios do século XVI, durante a colonização portuguesa, e ganhou novo impulso a partir de meados da década de 1970, com a criação do Programa Nacional do Álcool – o Proálcool. Rico (2010) afirma que o uso do etanol como combustível, desde seu início, esteve fortemente ligado à produção e comercialização do açúcar que, como um dos principais produtos de exportação do Brasil, sempre foi importante para proporcionar estabilidade econômica e destaca que quando o Proálcool foi criado, o governo deu ao programa a dupla finalidade de substituir a gasolina, muito cara devido à primeira crise do petróleo, e regular a estabilidade da indústria açucareira. De acordo com o autor, o Proálcool representou uma transição entre os interesses do agronegócio da cana-de-açúcar, sobrecarregada pela queda nos preços do açúcar, e a necessidade de equilibrar o balanço comercial devido às crises do petróleo da década de 1970. Apesar das crises de desabastecimento terem prejudicado sua credibilidade, a consolidação do etanol como combustível veicular foi possível devido à implementação de uma política pública abrangente e coordenada, e sua confiança foi retomada com o surgimento e introdução das novas tecnologias dos veículos *flex-fuel* a partir de 2003 (RICO, 2010).

Logo após o descobrimento, as primeiras mudas de cana-de-açúcar chegaram às terras brasileiras trazidas por Martim Afonso de Souza. Devido ao clima úmido e quente do Brasil, muito favorável ao cultivo da cana, numerosos engenhos foram criados no litoral do nordeste brasileiro e começaram a produzir açúcar de qualidade equivalente ao produzido pela Índia. Apesar dessa atividade ter se iniciado na Capitania de São Vicente (São Paulo), onde foi implantado o primeiro engenho de açúcar, foi no Nordeste que os engenhos se multiplicaram, principalmente nas capitanias de Pernambuco e da Bahia (SIQUEIRA, 2004). A partir de então, a cultura de cana-de-açúcar se tornou a atividade econômica mais importante durante o século

XVI, levando o Brasil ao posto de maior produtor de açúcar do mundo em meados do século XVII. Contudo, o Brasil perdeu essa posição durante muitas décadas e só recuperou a liderança na década de 1970, com o início da produção de álcool combustível, voltando a ser o maior produtor mundial de açúcar de cana, onde permanece até hoje.

Em relação especificamente a Minas Gerais, Siqueira (2004) diz que a implantação e o desenvolvimento da produção de açúcar encontraram algumas dificuldades, sendo que a produção de cana apareceu no Estado somente a partir do século XVIII, quando já não tinha a mesma importância econômica devido à extração do ouro. O cultivo da cana não teve expressão econômica no estado durante o século XX. Este cenário se modificou apenas a partir de meados da década de 1990 (SIQUEIRA, 2004). De acordo com Costa (2009), a cadeia do setor sucroalcooleiro teve seu maior desenvolvimento em Minas Gerais somente a partir da instituição do Proálcool, na década de 1970.

Especificamente a respeito do Proálcool, Shikida (1999) estratifica o programa em três fases evolutivas bem distintas que o autor considera como sendo: a fase de expansão "moderada" no período de 1975 a 1979; a fase de expansão "acelerada" no período de 1980 a 1985; e a fase de "desaceleração e crise" do Proálcool no período de 1986 a 1995. Conforme Siqueira (2004), o Proálcool propiciou uma enorme contribuição para a diversificação da agroindústria da cana-de-açúcar. A partir de então, a produção de etanol passou a contribuir significativamente com a produção total do setor, funcionando como um regulador do mercado de açúcar e vice-versa (SIQUEIRA, 2013). Jonh Wilkinson (2015) revela que na primeira década do século XXI o setor sucroalcooleiro nacional sofreu períodos de altos e baixos, com grandes investimentos no período de 2003 a 2009, quando a produção de etanol cresceu 13% ao ano, seguida de forte crise e estagnação entre 2010 e 2014.

O período de 2008 e 2009 foi marcado por forte crise financeira mundial e tal cenário reforçou a monopolização no setor através de fusões e aquisições. Especificamente, o setor sucroalcooleiro atraiu uma grande variedade de investidores como empresas petroquímicas, buscando entrar no mercado de combustíveis alternativos e/ou complementar para os transportes, os *traders* agrícolas buscando oportunidades para um novo mercado global de *commodities* e até mesmo empresas de investimentos que tinham interesse na diversificação de seus portfólios

(WILKINSON, 2015). O agravamento da crise trouxe sérios problemas para o setor, pois as empresas sucroalcooleiras contavam com créditos privados com base no dólar e, principalmente, com empréstimos do BNDES (MENDONÇA, 2012). A consequência desta combinação de fatores resultou na falência de muitas usinas, aprofundando ainda mais o processo de aquisições e fusões com empresas multinacionais. Os reflexos da crise se concretizaram com a queda de produção de cana-de-açúcar na safra de 2011/2012. Wilkinson (2015) afirma que nos anos de 2014 e 2015 foram tomadas medidas positivas para o setor e diz que: “A taxa CIDE foi reimposta sobre a gasolina, a percentagem de mistura foi aumentada de 25% para 27% e a taxa de ICMS foi eliminada para o etanol no estado de Minas Gerais (p.4)”. Segundo o autor essas medidas possibilitaram preços mais competitivos do etanol nas bombas em diversas regiões e a produção tornou-se novamente lucrativa.

O fato positivo ocorrido neste período foi o aumento de produção de bioeletricidade produzida através da queima do bagaço de cana que acabou se transformando em um terceiro “coproduto” muito importante para o setor. Na grande maioria das usinas, a bioeletricidade gerada a partir do bagaço é consumida na própria unidade, sendo o excedente comercializado para as empresas distribuidoras de energia elétrica (WILKINSON, 2015). De acordo com informações publicadas pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, e citadas por Flausino (2015), a partir de 2007, a biomassa de cana assumiu a liderança na oferta de energia interna e ultrapassou a geração de eletricidade de fonte hidráulica, se tornando uma das principais fontes responsáveis pela renovabilidade da matriz energética brasileira.

Atualmente, o setor sucroalcooleiro não produz apenas açúcar e etanol, mas também bioeletricidade e outros coprodutos, como melaço e plástico, e futuramente o bioquerosene para aviação, que está em fase de desenvolvimento. Campos (2015) afirma que já não faz muito sentido a utilização do termo “setor sucroalcooleiro”, assim recentemente a literatura passou a adotar a denominação “setor sucroenergético”, pois este termo engloba tanto a produção de açúcar, como de fontes energéticas - etanol e bioeletricidade. Portanto, a partir deste ponto, neste trabalho adotaremos o termo “sucroenergético”.

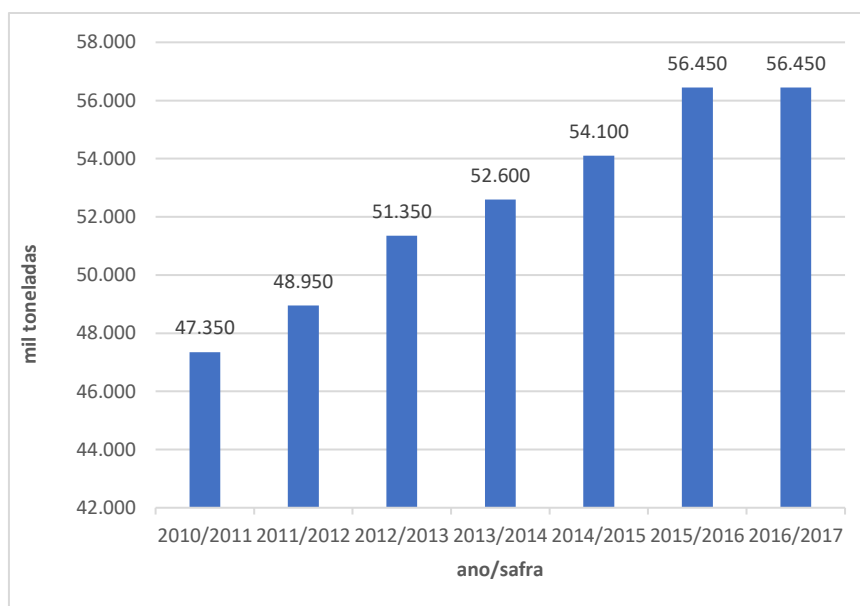
## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DO SETOR SUCROENERGÉTICO DE MINAS GERAIS

A cadeia produtiva do setor sucroenergético, tanto em Minas Gerais quanto no restante do Brasil, é bastante estruturada. O país é pioneiro no desenvolvimento e aplicação de tecnologias setoriais, dominando todos os estágios de produção. Uma das principais características da indústria da cana é sua versatilidade no tocante à produção de açúcar e/ou etanol. Esta flexibilidade permite ao produtor direcionar sua produção de acordo com as necessidades mercadológicas, permitindo assim a maximização dos seus lucros. Para Vidal (2006, p.3):

“O agronegócio da cana-de-açúcar compõe-se de elos geradores de várias oportunidades de negócios: produção da cana-de-açúcar, processamento de açúcar, álcool, e produtos derivados de subprodutos e coprodutos, bem como serviços de pesquisa, capacitação, assistências técnica e creditícia, transporte, comercialização, exportação, serviços portuários e dealers, dentre outros”.

Particularmente, em Minas Gerais, a cadeia produtiva do setor sucroenergético teve seu desenvolvimento acelerado a partir do Proálcool e continuou sua transformação ao longo dos anos. Atualmente, apresenta-se plenamente consolidada. Esta consolidação pode ser observada pela evolução da capacidade de moagem (Gráfico 1).

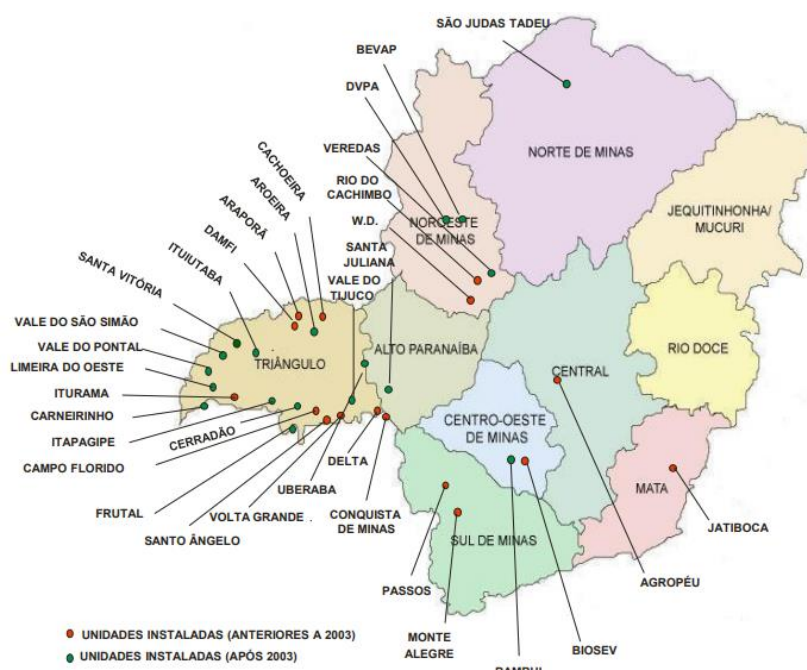
**GRÁFICO 1 - CAPACIDADE INSTALADA DE MOAGEM DE CANA DE MINAS GERAIS**



Fonte: Adaptado de SIAMIG, 2017

De acordo com os dados publicados no site da Secretaria de Meio Ambiente - MG, ao final de 2007, Minas Gerais contava com 66 unidades em processo de licenciamento ambiental concluído ou em andamento, relacionadas no Anexo 1. No entanto, devido às sucessivas crises que atingiram o setor, várias unidades não concluíram suas implantações e outras encerraram suas atividades. Atualmente o Estado possui 35 usinas em atividade (Figura 1).

**FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS USINAS EM ATIVIDADE MINAS GERAIS**

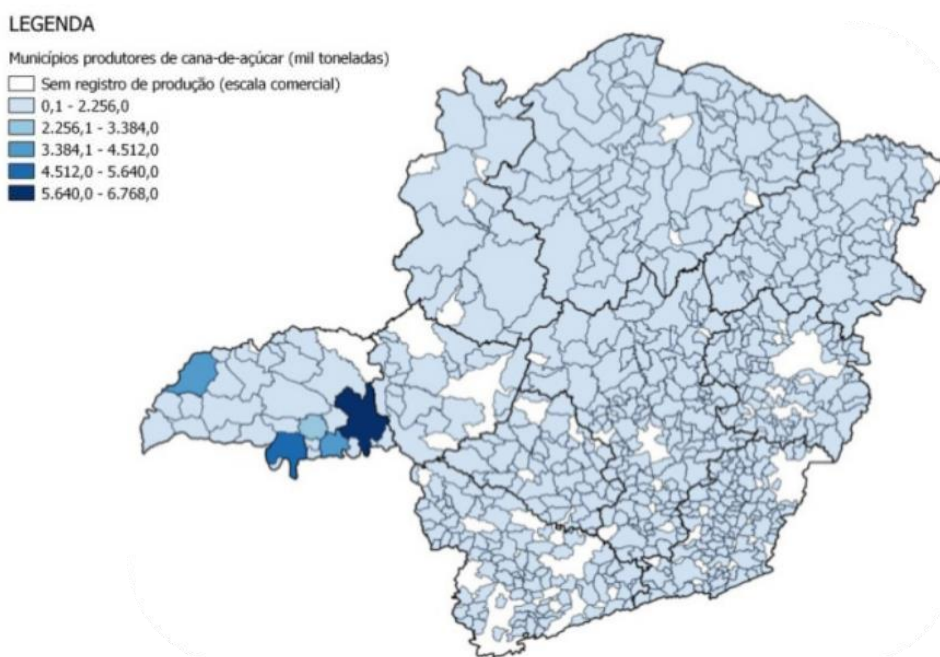


Fonte: Adaptado de SIAMIG, 2017

Apesar de todos os problemas enfrentados pelo setor nos últimos anos, na safra 2016/17, o Estado permaneceu no 3º lugar em volume de moagem de cana, no 2º lugar em produção de açúcar e em 4º lugar na produção de etanol no ranking brasileiro (SIAMIG, 2018). Outro destaque do setor sucroenergético mineiro é a produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar. Atualmente, Minas Gerais é o quarto estado de maior produção nacional, com 182 MW médios (CCEE, 2015). O Estado possui uma capacidade instalada de 949,5 MW (ANEEL, 2015), sendo que apenas 22 das suas usinas estão exportando energia para o sistema elétrico (SIAMIG, 2015). De acordo com Flausing (2015), estima-se que até 2015 o potencial mineiro de comercialização de eletricidade proveniente do bagaço de cana era de 847 MWh.

Com relação à parte agrícola e ao plantio, a cultura da cana-de-açúcar encontra-se distribuída em todo o território mineiro (Figura 2). Além da produção de açúcar e etanol, em Minas Gerais, “a cana também é utilizada para alimentação animal, produção de cachaça e rapadura” (SEAPA, 2017). Na safra de 2017, as maiores produções mineiras de cana se concentraram na região do Triângulo Mineiro (SEAPA, 2017).

**FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR, SAFRA 2014.**



Fonte: Projeções do Agronegócio Minas Gerais 2017 a 2027, SEAPA, 2017

A notória concentração da cadeia produtiva da cana no Triângulo Mineiro é devida principalmente às características do solo e do relevo, que favorece a mecanização das atividades agrícolas, além do clima, que também é extremamente favorável ao cultivo da cana. Dessa maneira, pode-se inferir que as regiões Oeste de Minas Gerais e Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba são as mais aptas para sua produção (SOUZA e JÚNIOR, 2009).

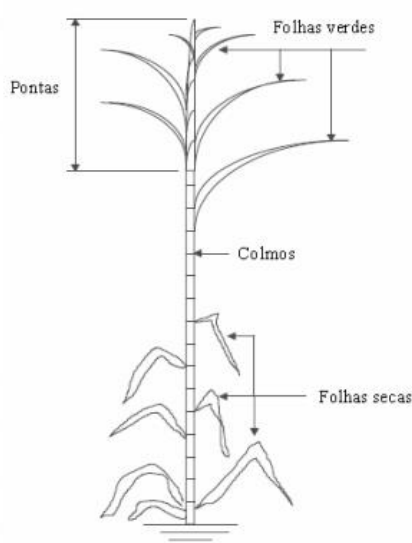
### 2.3 CANA-DE-AÇÚCAR: PRODUTOS, COPRODUTOS E RESÍDUOS

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene, pertencente ao gênero *Saccharum*, da mesma família das gramíneas e oriunda de regiões temperadas e



quentes da Ásia, especialmente da Índia (BNDES, 2008). A planta cana-de-açúcar, conforme apresentada na Figura 3, é facilmente reconhecida por suas características peculiares: planta fina com colmos de formato cilíndrico onde se concentra a sacarose, com pontas e folhas grandes, que constituem a palha da cana, e que podem alcançar até seis metros de altura até sua extremidade.

**FIGURA 3 - PÉ DE CANA-DE-AÇÚCAR**



Fonte: Seabra, 2008

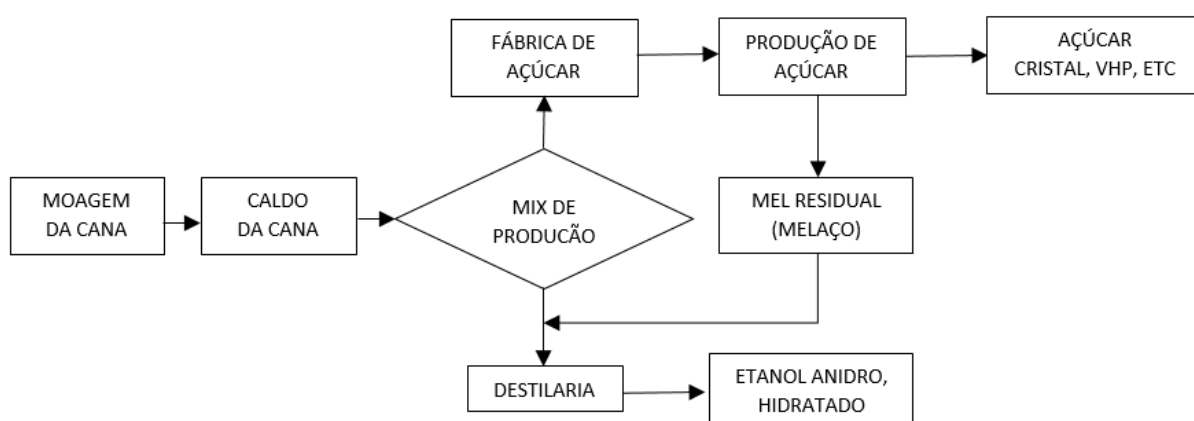
Após seu plantio, a cana pode sofrer vários cortes antes de seu replantio, já que seu ciclo produtivo dura em média cinco anos, com variações devidas a fatores ambientais e tecnológicos. O primeiro corte da chamada “cana planta” ocorre após 18 meses de seu plantio e a colheita se repete por uma média de 4 vezes a cada 12 meses, da chamada “cana soca”, a partir da cana cortada (soqueira). Após o ciclo completo, ocorre a rotação de cultura com o plantio de alguma oleaginosa. Em Minas Gerais, normalmente são usadas a soja e o amendoim como culturas rotacionais (COSTA, 2009).

A sacarose contida no caldo extraído da cana-de-açúcar é a matéria-prima mais importante da planta, sendo utilizada para a fabricação tanto do açúcar quanto do etanol. O teor de sacarose é o principal critério para determinação da qualidade, e, conseqüentemente, da precificação da cana-de-açúcar (SEABRA, 2008). Baptista (2017) afirma que a produção de açúcar e/ou etanol estão relacionados com a porcentagem de açúcar redutor (glicose e frutose) e com o teor de sacarose

(polarização) que compõem o caldo extraído da cana-de-açúcar. Estes fatores determinam a quantidade de açúcar total recuperável, o chamado ATR, que é de fato a quantidade de açúcar total presente na cana e que a indústria consegue efetivamente aproveitar na produção de açúcar e/ou etanol. Em outras palavras, o ATR é o somatório da glicose, frutose e sacarose que compõem o caldo de cana, ou seja, a quantidade útil de açúcares contida no caldo extraído da cana e que indica qual quantidade de açúcar ou etanol poderá ser fabricada.

O processo produtivo do açúcar, seja açúcar cristal, açúcar VHP - *Very High Polarization* - ou de qualquer outro tipo de açúcar, bem como do etanol, seja anidro ou hidratado, inicia-se da mesma forma. No entanto, como não faz parte do escopo deste estudo, não serão detalhadas nenhuma das formas de produção dos tipos de açúcares e nem de etanol. Apenas será enfatizada a quantidade total de etanol que poderá ser produzida, uma vez que ambos os tipos de etanol produzem vinhaça. A Figura 4 representa de forma simplificada o processo de produção de uma usina que possui uma destilaria anexa, ou seja, pode produzir açúcar e etanol.

**FIGURA 4 - PROCESSO SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL.**

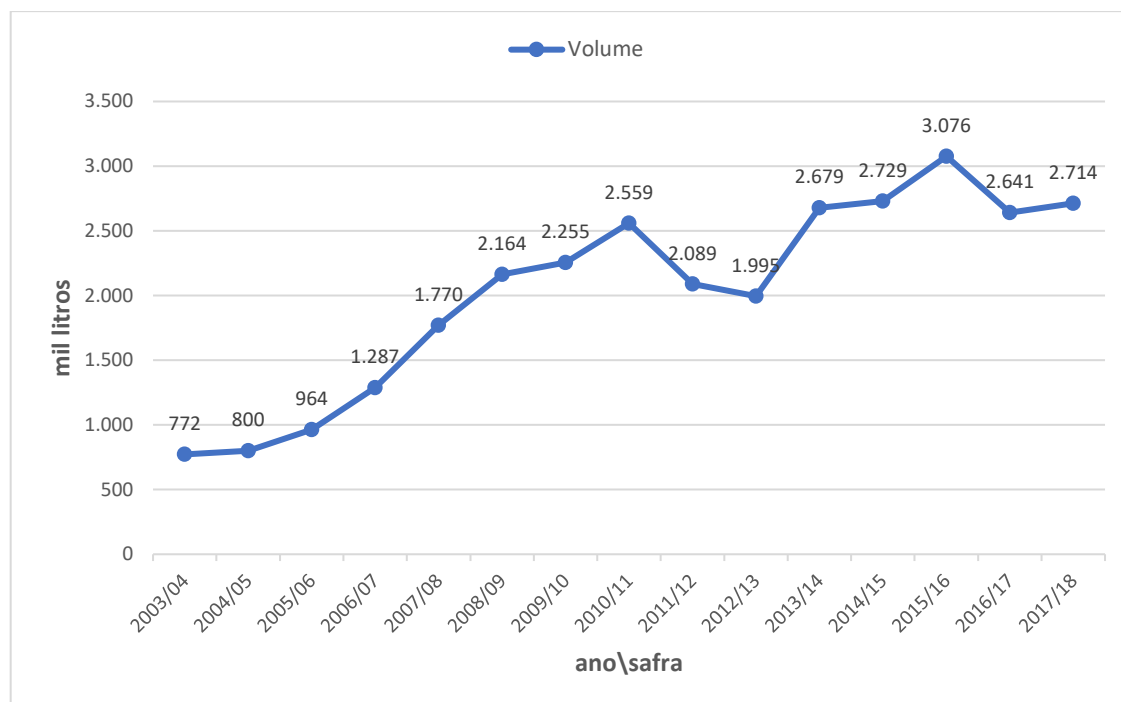


Fonte: Autor.

Após a produção do açúcar, é obtido um subproduto ainda rico em açúcares, de cor parda escura, denso e viscoso. Este líquido recebe algumas denominações populares, como mel esgotado, mel pobre, mel final ou simplesmente melaço, como é mais usualmente conhecido. O melaço, após ser diluído em água e/ou mais caldo-de-cana, será utilizado para a fabricação de etanol. A esta mistura dá-se o nome de mosto (SANTOS, 2012).

Cortez (2010) afirma que o Brasil possui um modelo próprio de produção de açúcar e etanol, sendo que as produções de ambos cresceram associadas uma à outra. De acordo com o autor, pode-se dizer que o Brasil ganhou competitividade e se tornou o maior exportador de açúcar, em grande medida, graças à produção de etanol, uma vez que a produção do etanol está associada à produção de sacarose. Diferentemente de outros países, no Brasil os produtores de açúcar não esgotam o mel final, pois normalmente, o mistura ao caldo de cana para produzir o etanol. Desta forma, o aumento da produção de etanol está sempre dependente do aumento de produção de açúcar (CORTEZ, 2010). Por outro lado, Goldemberg (2004) afirma que no período da criação do Proálcool os preços dos combustíveis eram controlados pelo governo federal como tentativa de conter a inflação, sendo que os preços do etanol eram fixados em patamares abaixo dos custos médios de produção do etanol. Esta condição resultou na queda gradativa dos preços, refletindo ganhos financeiros agroindustriais e economia de escala, o que impulsionou a produção de etanol (GOLDEMBERG, 2004).

Por definição, etanol (álcool etílico) é um álcool de origem vegetal, que é utilizado para a fabricação de bebidas fermentadas, produtos de limpeza e também como combustível (biocombustível), sendo assim uma fonte de energia alternativa e renovável. Etanol, álcool ou álcool etílico se referem à mesma substância e, diferentemente de outras, não é encontrado em seu estado puro na natureza, sendo necessária à sua produção. O etanol pode ser extraído de várias matérias-primas vegetais, tais como trigo, cevada, milho, beterraba, mandioca e cana-de-açúcar, com influência direta na qualidade do vinho de acordo com cada uma delas. A produção brasileira de etanol é praticamente toda baseada na extração do caldo da cana-de-açúcar para a fermentação e destilação (FEAM, 2014). Em Minas Gerais, a produção de etanol experimentou um expressivo crescimento a partir da última década (Gráfico 2).

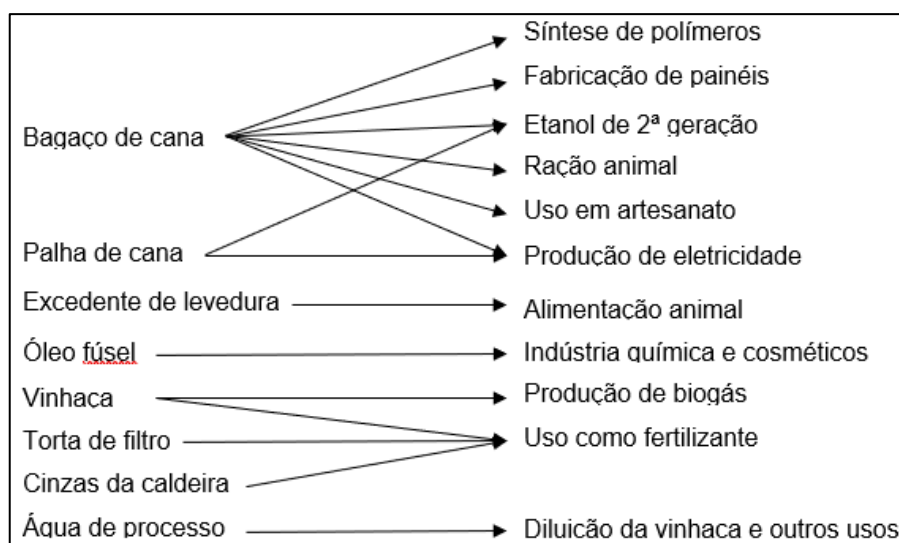
**GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ETANOL EM MINAS GERAIS**

Fonte: Adaptado de SIAMIG, 2018.

### 2.3.1 Aproveitamento dos Resíduos do Setor Sucroenergético

De maneira geral, a utilização dos resíduos do setor sucroenergético tornou-se muito mais importante do que apenas uma necessidade de atendimento às exigências ambientais quanto à sua correta destinação. Atualmente, o aproveitamento destes resíduos como matéria-prima para produção de outros produtos tornou-se uma importante fonte de geração de mais benefícios financeiros e ambientais para o setor, aumentando sua sustentabilidade.

Em sua pesquisa e análise do potencial teórico do aproveitamento da cadeia produtiva do etanol, Costa (2009) relacionou os coprodutos e seus respectivos aproveitamentos em uma “Matriz de Coprodutos e Aproveitamentos”, apresentados na Figura 5.

**FIGURA 5 - MATRIZ DE COPRODUTOS E APROVEITAMENTOS**

Fonte: Adaptado de Costa, 2009.

O maior destaque em termos de aproveitamento é o da palha e do bagaço, na queima direta nas caldeiras, para produção de vapor e bioeletricidade (COSTA, 2009). O bagaço, como é popularmente conhecido, se refere à sobra da cana depois de moída, sendo considerado como grande responsável pela competitividade dos outros produtos da cana. O seu potencial energético tem garantido às usinas a autossuficiência em energia térmica e elétrica (SEABRA, 2008). Segundo Flausino (2015), o alto teor de fibras contido no bagaço da cana possibilita a sua utilização para a produção de vapor e de energia elétrica. O vapor produzido nas caldeiras, além de suprir as necessidades internas do processo, é empregado para a geração de bioeletricidade, que é utilizada na própria planta industrial, sendo que o excedente da geração é exportado para concessionárias de energia (FLAUSINO, 2015).

Nos últimos anos, têm-se estudado a produção de etanol 2G através da hidrólise do bagaço de cana, porém, ainda não se conseguiu a viabilidade econômica deste processo. A opinião de Santos (2012) sobre este assunto é que, devido às constantes oscilações de preços, a viabilidade econômica do etanol celulósico a partir do bagaço da cana não será tão facilmente atingida no Brasil. Outro ponto importante a ser observado é que em muitas usinas a utilização do bagaço na cogeração proporciona um excedente de energia elétrica que normalmente é comercializado com concessionárias de energia, criando também a possibilidade de exportação de crédito de carbono (FLAUSINO, 2015). Estes fatores possibilitam o aumento da lucratividade das

usinas e acabam desestimulando os investimentos na produção de etanol 2G, o que não impede discussões futuras sobre esta possibilidade.

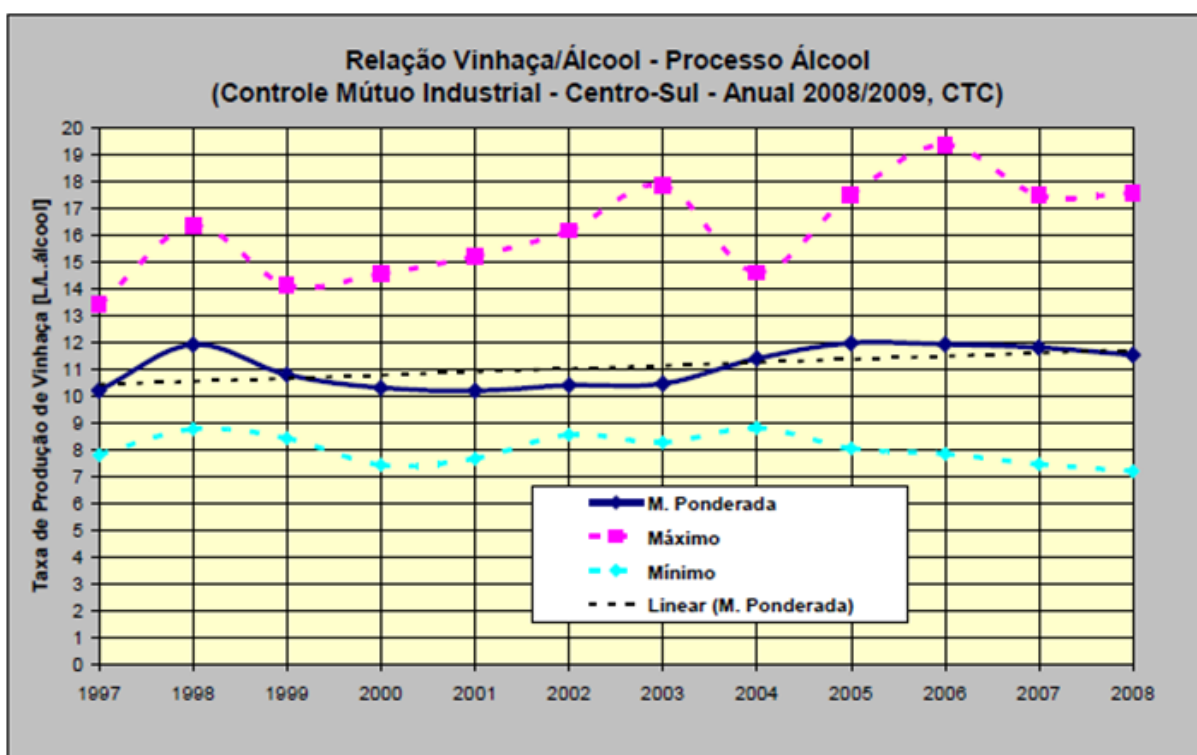
Outros coprodutos têm grande destaque na cadeia do setor sucroenergético, como é o caso da vinhaça e tortas de filtro, que podem ser utilizados como insumos em outros processos de transformação, gerando produtos de maior valor agregado. Costa (2009) destaca a torta de filtro como um importante coproduto da cana-de-açúcar. Terminada a etapa de decantação do processamento do caldo de cana, o lodo residual passa por um processo de filtração para a remoção do açúcar residual, sobrando a chamada torta de filtro. Este resíduo possui grande quantidade de nitrogênio, fósforo, cálcio e outros materiais orgânicos. Por este motivo, este material, juntamente com as cinzas das caldeiras, torna-se extremamente interessante para utilização como fertilizante e corretor de solo nas lavouras de cana-de-açúcar (COSTA, 2009).

Alguns autores consideram que após o bagaço e a palha da cana, a vinhaça é o resíduo mais importante deste setor. Para Szymanski (2010) a importância da vinhaça não se dá apenas pelo grande volume gerado, mas também devida ao seu elevado potencial poluente e alto valor fertilizante. A autora, afirma que a quantidade produzida, bem como o seu potencial energético favorecem o emprego dessa fonte na matriz energética brasileira (SZYMANSKI, 2010). Em destaque, temos o grande potencial de geração de bioeletricidade a partir do biogás proveniente do tratamento anaeróbio da vinhaça, que é tema do presente trabalho.

No entanto, na literatura atual existem algumas divergências entre os pesquisadores com relação ao volume de produção de vinhaça a partir da destilação do etanol. Após pesquisa mais aprofundada sobre o tema, Elia Neto (2016) concluiu que a taxa de produção de vinhaça pode sofrer grande variação conforme o teor alcoólico do vinho e da recuperação ou não do vapor injetado na coluna de destilação de etanol. O autor esclarece que se tais fatores forem devidamente considerados, poderá ser obtida uma variação da taxa de produção de vinhaça de 7 a 16 m<sup>3</sup> por m<sup>3</sup> de etanol destilado, sendo que este volume poderá chegar até 18 m<sup>3</sup> por m<sup>3</sup> de etanol

quando se incorpora a flegmaça<sup>1</sup>. Neste caso, a variação poderá ser de até 150% na quantidade gerada de vinhaça. No Gráfico 3 são apresentadas as variações da taxa de produção de vinhaça observadas em levantamento do controle mútuo industrial do CTC – Centro de Tecnologia Canaveieira no período de 1997 a 2008 (2009).

**GRÁFICO 3 - VARIAÇÕES DA MÉDIA, MÁXIMA E MÍNIMA ANUAL DA TAXA DE PRODUÇÃO DE VINHAÇA (L/L DE ETANOL) NAS USINAS DA REGIÃO CANAVEIEIRA DO CENTRO-SUL (CTC, 2009).**



Fonte: CTC, 2009 apud Elia Neto, 2016

Com base nas informações deste levantamento o autor concluiu que a média da taxa de produção de vinhaça varia de aproximadamente 10 a 12 m<sup>3</sup>, e mostrou uma tendência de variação de 11 a 12 m<sup>3</sup> etanol nos últimos anos do período pesquisado (ELIA NETO, 2016).

---

<sup>1</sup> Flegmaça - Quando o vinho proveniente da fermentação é submetido ao processo de destilação, resulta em duas frações, o flegma e a vinhaça. O flegma é destilado novamente resultando na flegmaça, que é utilizada para assepsia dos equipamentos.

### 3 VINHAÇA: PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES

Há algum tempo a vinhaça vem sendo considerada por muitos autores como o principal subproduto ou coproduto do setor sucroenergético, proveniente do processo de destilação de etanol.

Como mencionado, há mais de quatro décadas o Brasil vem desenvolvendo uma maneira toda própria para a fabricação de açúcar e etanol, e, apesar deste processo já estar plenamente consolidado no país, ainda permanece em constante aprimoramento.

O etanol de primeira geração é produzido a partir de caldo de cana, do melaço ou da mistura de ambos, dependendo do tipo de processamento de cada usina. Em destilarias autônomas, o etanol é produzido diretamente a partir do caldo de cana, enquanto que em plantas anexas (produzem açúcar e etanol), uma fração do caldo da cana é desviada para a produção de açúcar e a fração restante, juntamente com o melaço residual da produção do açúcar, é usada para a produção de etanol (MORAES, 2014). Ao final de todo este processo, é originado um resíduo que recebe o nome de vinhaça.

A denominação vinhaça é empregada indistintamente para os resíduos da destilação da solução alcoólica chamada vinho, que é obtida através do processo de fermentação alcoólica. Sua classificação é feita de acordo com os componentes no preparo do mosto, ou seja, caldo, melaço, ou mistura de ambos. No entanto, devido ao estágio atual da produção de etanol no Brasil, esta classificação acaba sendo muito genérica, pois pode-se referir a qualquer tipo de vinhaça, independentemente de sua classificação, seja de caldo de cana, melaço ou mista (ELIA NETO, 2016).

Com relação à taxa de produção da vinhaça por litro de etanol produzido, conforme já observado anteriormente, na literatura existente encontramos algumas variações de valores informados pelos autores que já abordaram este assunto. Salomon (2007), em sua pesquisa, considerou a produção de aproximadamente 13 m<sup>3</sup> de vinhaça para cada m<sup>3</sup> de etanol destilado, enquanto que Souza (2009) cita em seu trabalho a produção de vinhaça a uma taxa que pode variar de 10 a 16 m<sup>3</sup> para cada m<sup>3</sup> de etanol destilado. Elia Neto (2016), em uma pesquisa mais aprofundada sobre o tema, observou que a taxa de produção de vinhaça sofre uma grande variação conforme o teor alcoólico contido no vinho e da recuperação ou não do vapor injetado



na coluna de destilação e afirma que podemos adotar o valor de 11,5 m<sup>3</sup> de vinhaça para cada m<sup>3</sup> de etanol destilado como sendo um valor médio.

### 3.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA VINHAÇA

Elia Neto (2016) caracteriza a vinhaça como

“um resíduo reaproveitável como fertilizante, com temperatura alta, elevada quantidade de matéria orgânica, altas concentrações de sólido (aproximadamente 2,5% em média), teores de nitrogênio e micronutrientes interessantes para o solo agrícola e rica em potássio” (2016, p. 4).

A composição química da vinhaça está relacionada a diversas variáveis, como a variedade e a qualidade da cana-de-açúcar, o tipo de solo e clima para a produção agrícola, a safra, a colheita e o processamento industrial (MORAES, 2015). Independentemente da procedência da vinhaça (caldo de cana, melaço ou mista), destacam-se dentre os demais elementos o teor de matéria orgânica e a concentração de potássio, além de sulfato, nitrogênio, fósforo, cálcio e magnésio. Um aspecto muito importante é o tipo de etanol que está sendo produzido, se anidro ou hidratado, pois isso afetará suas características. Moraes (2015) afirma que a vinhaça é considerada como um resíduo grande complexidade dentro do mesmo processo de produção, pois pode variar suas características durante todo o processo de operação industrial. Outros fatores que também influenciam a composição da vinhaça são os produtos utilizados para a fermentação e o tratamento das leveduras. Elia Neto (2016) relata que até as técnicas utilizadas no processo produtivo têm influência nas características da vinhaça e consolida suas principais características quali-quantitativas na Tabela 1.

Salomon (2007) chama a atenção para as características altamente poluidoras da vinhaça quando disposta no solo, destacando que sua carga de contaminantes pode chegar a cem vezes a do esgoto doméstico, por ser rica em matéria orgânica e possuir elevada DQO (Demanda Química por Oxigênio). Para a autora, este é o ponto que requer maior atenção para o uso da vinhaça, pois as altas taxas de DQO podem alcançar valores de 30.000 a 40.000 mg/l. Outra preocupação é o baixo pH, que pode variar de 4 a 5, devido aos ácidos orgânicos presentes em sua composição (SALOMON, 2007).

**TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS QUALIQUANTITATIVAS DE VINHAÇA PROCEDENTES DE MOSTO DE MELAÇO, CALDO E MISTO**

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 - 5,0	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6
Temperatura (°C)	80 - 100	80 - 100	80 - 100
DBO5 (mg/L O <sub>2</sub> )	25.000	6.000 - 16.500	19.800
DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos totais (mg/L)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg/L)	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg/L)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg/L N)	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710
Fósforo (mg/L P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	100 - 290	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg/L K <sub>2</sub> O)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340
Cálcio (mg/L CaO)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
Magnésio (mg/L MgO)	420 - 1.520	200 - 490	580 - 700
Sulfato (mg/L SO <sub>4</sub> )	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
Carbono (mg/L C)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria orgânica (mg/L)	63.400	19.500	3.800
Substâncias redutoras (mg/L)	9.500	7.90	8.300

Fonte: Adaptado de Elia Neto, 2016

### 3.2 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA VINHAÇA

Durante décadas, o principal destino da vinhaça no Brasil tem sido a sua aplicação como fertilizante nas lavouras de cana-de-açúcar, prática mais conhecida como fertirrigação. De acordo com Elia Neto (2016), já na década de 1940, a vinhaça era utilizada de forma empírica para irrigação das lavouras de cana, sendo identificados registros de estudos e discussões sobre seu efeito no solo desde 1952. De acordo com o mesmo autor, antes da década de 1960, uma grande parte da vinhaça produzida nas usinas era lançada diretamente nos cursos d'água sem nenhum tratamento, o que causava sérios problemas de contaminação das águas superficiais (ELIA NETO, 2016). Entretanto, com o aumento significativo da produção de vinhaça e o aparecimento de novas tecnologias para seu tratamento, novas formas de sua utilização e aproveitamento vêm sendo buscadas. Além da aplicação no solo para a fertirrigação, estudam-se usos alternativos, como a reciclagem da vinhaça pelo processo de fermentação, a utilização para alimentação animal, a utilização para produção de fungos e até o uso em materiais de construção (SALOMON, 2007).

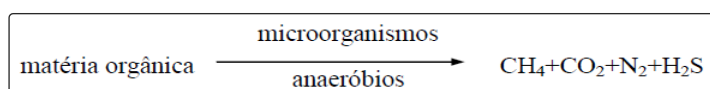
### 3.3 BIOGÁS DE VINHAÇA: PRODUÇÃO E LIMPEZA

Devido ao grande volume gerado e à alta carga orgânica, Granato (2003) considera a vinhaça como sendo o resíduo mais significativo proveniente da destilação do etanol, desde que este combustível começou a ser fabricado no Brasil, e aponta a biodigestão anaeróbia como uma das mais importantes alternativas para o aproveitamento da vinhaça. Segundo o autor, este processo permite a estabilização da matéria orgânica, com elevadas taxas de remoção da carga poluidora e, ao mesmo tempo, gera uma mistura gasosa (biogás) de alto valor energético, tendo como principais componentes o metano - CH<sub>4</sub> e o dióxido de carbono – CO<sub>2</sub>.

Em sua pesquisa sobre as tecnologias da digestão da vinhaça, Pinto (1999) define a digestão anaeróbia como sendo

“um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio livre, no qual diversas populações de bactérias convertem a matéria orgânica numa mistura de metano, dióxido de carbono e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio (1999, p. 80)”.

Segundo o autor, a degradação da matéria orgânica é um processo quimicamente complexo, envolvendo centenas de outros possíveis compostos e reações intermediárias, ocorre em um ambiente anaeróbio e só pode ser realizado por microrganismos capazes de utilizar moléculas complexas, ao invés de oxigênio, como receptores de hidrogênio. O autor sintetiza a reação completa de forma simplificada, conforme mostrado abaixo:



Fonte: Pinto, 1999 p 80

Constant (1989) descreve o biogás como uma mistura de gases resultante da degradação biológica de compostos orgânicos através de processos anaeróbios. Segundo o autor, geralmente o biogás contém mais de 50% de metano - CH<sub>4</sub> e menos de 50% de dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>, além de vestígios de vários outros gases. Colturato (2015) afirma que “o potencial energético do biogás está relacionado com a quantidade de metano em sua composição, fator este determinante para o seu poder calorífico” (p. 31). O metano é definido como um gás inodoro, incolor e mais leve que o ar, sendo o mais simples dos hidrocarbonetos, possui alto valor combustível e

corresponde ao principal componente do biogás. De acordo com Constant (1989), o valor calorífico mínimo representa a energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de combustível a 1 atm e 0 ° C, sendo que o poder calorífico mínimo do biogás é determinado pelo seu teor de metano, cujo poder calorífico é de 35,9 MJ.m<sup>-3</sup>. Colturato (2015) afirma que considerando um biogás com 60% de metano em sua composição, tem-se o poder calorífico de 21,5 MJ.m<sup>-3</sup>, o que corresponde a cerca de 70% do poder calorífico do gás natural. A Tabela 2 resume o poder calorífico inferior do biogás e de outros combustíveis, bem como a equivalência destes com o metano.

**TABELA 2 - PODER CALORÍFICO DO BIOGÁS E DE OUTROS COMBUSTÍVEIS COM EQUIVALÊNCIA COM O METANO**

Combustível	MJ.kg <sup>-1</sup>	MJ. m <sup>-3</sup>	kWh.Nm <sup>-3</sup>	Equivalência ao metano
Metano	50	35,9	9,97	1
Biogás purificado (90%)	45,1	32,3	8,8	0,9
Biogás típico (60%)	30	21,5	5,97	0,6
Butano	45,7	118,5	32,9	3,3
Propano	46,4	90,9	25,2	2,5
Metanol*	19,9	15.900	4.415,40	442,9
Etanol*	26,9	21.400	5.942,80	596,1
Gasolina*	45	33.300	9.247,40	927,6
Diesel*	42,1	34.500	9.580,70	961

Nm<sup>3</sup>: volume e condições padrão de temperatura e pressão: 273K e 1atm; 1kJ=0,2388kcal; 1kJ=0,277Wh

\*MJ.m<sup>-3</sup> e kWh.m<sup>-3</sup>

Fonte: Adaptação de Constant, 1989 apud Colturato, 2015

Levando-se em consideração-se que a concentração de CH<sub>4</sub> no biogás é inversamente proporcional à concentração de CO<sub>2</sub>, torna-se de grande importância a concepção de um sistema de purificação com o objetivo de elevar seu poder calorífico e, conseqüentemente, otimizar o processo de conversão energética (SZYMANSKI, 2010).

Devido principalmente a presença do sulfeto de hidrogênio - H<sub>2</sub>S em sua composição, além de outras impurezas, o biogás se torna um produto muito corrosivo. O sulfeto de hidrogênio propicia a geração de óxidos de enxofre durante o processo de combustão, os quais são altamente solúveis em água e propiciam a formação de ácido sulfúrico - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, fazendo com que o biogás se torne muito corrosivo. Devido a esta condição, é necessário adotar cuidados especiais na escolha dos materiais empregados na fabricação dos equipamentos e tubulações que utilizarão o biogás (COLTURATO, 2015). Salomon (2007) ressalta ainda que, além do CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, o

biogás contém outros componentes e umidade que também podem acarretar corrosão e diminuição de rendimento, recomendando-se, portanto, a purificação e limpeza do biogás. Silva, (2009) define os processos de purificação e limpeza do biogás como sendo o uso de qualquer método que tenha como finalidade evitar qualquer dano nos equipamentos os quais utilizarão o biogás, além de aumentar o seu poder calorífico. Estes processos consistem essencialmente em isolar o  $\text{CH}_4$  dos demais componentes do biogás, reduzindo as emissões de  $\text{CO}_2$  e ao mesmo tempo aumentando o seu potencial energético. Segundo o autor, a utilização final do biogás definirá a qualidade necessária que este deverá possuir e conseqüentemente qual será o processo de limpeza e purificação mais adequado a ser empregado (SILVA, 2009).

Em seu estudo sobre a dessulfuração<sup>2</sup> do biogás, Colturato (2015) defende a metanização (processo de digestão anaeróbia) como a melhor forma de tratamento e valorização energética da vinhaça. O autor ressalta, no entanto, que a aplicação efetiva do biogás gerado no tratamento anaeróbio com o objetivo de geração de energia depende diretamente da eficiência dos processos de limpeza do biogás. De acordo com Baldacin (2015), durante o processo de produção de biogás também é produzido o  $\text{H}_2\text{S}$  em diversas concentrações, sendo que este ácido além de tóxico possui alto poder de corrosão. A produção e concentração do  $\text{H}_2\text{S}$  varia de acordo com o efluente tratado, sendo necessária sua remoção, pois poderá causar corrosão nas tubulações, compressores, tanques de armazenamento e demais equipamentos, podendo também comprometer o rendimento e a vida útil do sistema utilizado para a geração de energia (BALDACIN, 2015). Para Colturato (2015), este é mais um dos motivos pelo que qual o setor sucroenergético ainda vê a metanização do biogás da vinhaça com alguma reserva.

---

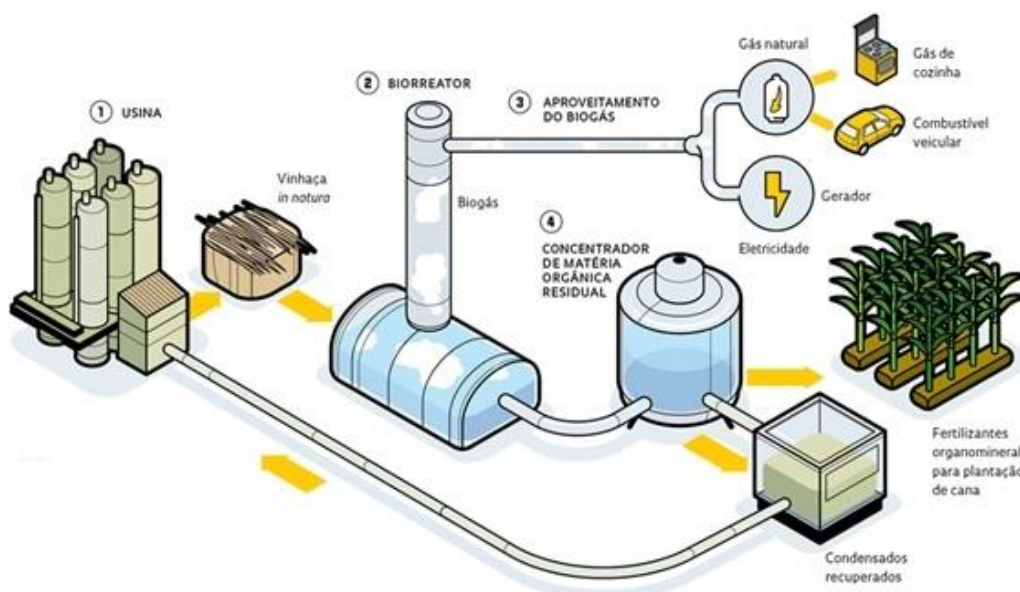
<sup>2</sup> Dessulfuração - processo de remoção do dióxido de enxofre ( $\text{H}_2\text{S}$ ) a partir de algum dispositivo, evitando contaminação.

### 3.4 TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE VINHAÇA

De acordo com Elia Neto (2016, p. 21), “*A biodigestão da vinhaça via anaeróbia, mais que um sistema de tratamento da vinhaça é antes de tudo um processo visando obter uma energia extra pela utilização do biogás gerado, rico em metano*”. O autor relata que na década de 1980 a biodigestão de vinhaça foi muito cogitada para a produção de biometano para uso automotivo nos caminhões das usinas que transportavam cana-de-açúcar em suas propriedades. Porém, atualmente o setor sucroenergético ainda vê a metanização do biogás da vinhaça com alguma reserva e ainda não adotou este processo em escala industrial devido ao insucesso ocorrido em um determinado projeto piloto de grande escala. A experiência malsucedida ocorreu no projeto implantado na Usina São João da Boa Vista, no Estado de São Paulo em 1986 e devido aos baixos resultados foi paralisado e a planta está atualmente desativada. Elia Neto (2016) chama a atenção para o fato de que nos últimos anos esta tecnologia vem sendo novamente retomada para a geração de biogás, com fins de produção de energia elétrica. A produção de biometano com a purificação do biogás também vem retomando o seu uso no setor automotivo e até mesmo para injeção nas redes de gás natural, devido, principalmente aos apelos de produção de energia alternativa no Estado de São Paulo (ELIA NETO, 2016).

Pinto (1999) afirma que o biogás pode ter diversas aplicações termodinâmicas, seja para a geração de frio, calor ou potência. Para o autor, o biogás “*pode ser usado diretamente em equipamentos estacionários como fogões, lampiões, campânulas para aquecimento, conjuntos moto-bomba e conjuntos geradores, entre outros*” (p. 99). O autor ainda adverte que em motores de unidades móveis é aconselhável utilizar o biogás obtido a partir da purificação e remoção do CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S. Isto porque, como já mencionado, o H<sub>2</sub>S pode danificar os componentes do motor e o CO<sub>2</sub> (gás inerte) ocupa um considerável espaço de armazenamento. A Figura 6 apresenta um esquema da produção do biogás da vinhaça e algumas das suas utilizações mais comuns.

FIGURA 6 - PRODUÇÃO DE BIOGÁS DA VINHAÇA



Fonte: Silveira, 2015.

A conversão energética é um fator crucial para a utilização do biogás proveniente da vinhaça. De acordo com Costa (2006), entende-se como conversão energética o processo de transformação de um determinado tipo de energia em outro, sendo que atualmente existem diversas tecnologias para a conversão energética do biogás. O autor ainda cita outras tecnologias para a utilização do biogás que estão em fase de desenvolvimento, mas que ainda não estão disponíveis comercialmente, como é o caso, por exemplo, da célula combustível (COSTA, 2006).

Granato (2003) e Szymanski (2010) afirmam que o setor sucroenergético possui três opções básicas para o aproveitamento energético do biogás proveniente da vinhaça, as quais são:

- Queima do biogás gerado diretamente em caldeiras, substituindo o bagaço para a geração de vapor e o acionamento do sistema de moagem da cana;
- Utilização do biogás em substituição aos combustíveis utilizados na frota da agroindústria durante o período da safra (dentro dos limites da usina);
- Utilização do biogás para acionamento de turbina a gás, conjugada a um motor-gerador para geração de eletricidade.

Quando se trata especificamente da utilização do biogás para geração de energia elétrica, tem-se, basicamente três estágios de conversão, que são: a conversão da energia química do biogás em energia térmica devido à queima do  $\text{CH}_4$ ,

a conversão desta energia térmica em energia cinética que irá movimentar um o rotor de gerador, gerando então energia elétrica.

Para o cálculo da geração de energia elétrica a partir do biogás, Moreira (2006) apud Szymanski (2010), afirma que é necessária a determinação da eficiência do sistema em análise, sendo que esta, conseqüentemente, depende da tecnologia que é utilizada para a produção do biogás. De acordo com este autor, são consideradas basicamente três principais tecnologias para geração de energia elétrica a partir do biogás que são:

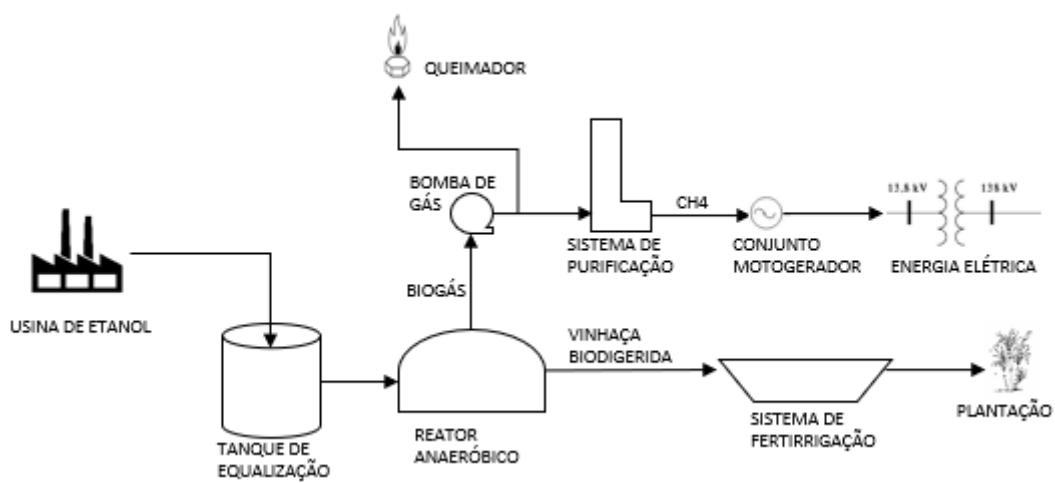
- Motores de ciclo Otto: são motores que podem ser alimentados com combustíveis gasosos podendo ser biogás, gás natural ou propano, ou com combustíveis líquidos que podem ser gasolina, etanol ou misturas.
- Turbinas a gás: o termo turbina a gás é mais comumente empregado em referência a um conjunto de três equipamentos que são o compressor, a câmara de combustão e a turbina propriamente dita. Estas turbinas são motores de combustão interna que transformam energia química através da combustão de combustíveis que podem ser gasosos ou líquidos, em energia mecânica com base no Ciclo Brayton.
- Microturbinas: estes equipamentos são modelos pequenos das turbinas a gás, também baseadas no Ciclo de Brayton. Para a utilização de biogás como combustível são necessárias algumas adaptações às microturbinas convencionais que operam com gás natural.

Costa (2006) afirma que as tecnologias mais utilizadas para este tipo de conversão são as microturbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo Ciclo Otto. De acordo com o autor, dentre as principais vantagens da geração de energia elétrica a partir do biogás está a geração descentralizada e, conseqüentemente, próxima ao ponto de carga. Também existe a possibilidade da utilização de combustível proveniente de resíduo do processo produtivo da unidade na qual está inserida.

A Figura 7 apresenta um fluxograma da geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente da vinhaça.



**FIGURA 7 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS DA VINHAÇA**



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

A metodologia utilizada na elaboração dos cálculos do potencial de geração de bioeletricidade a partir do biogás seguiu o mesmo método adotado por Granato (2003) e Germano (2011), e sugerido por Lamo (1991). Os cálculos do volume de geração de vinhaça foram baseados no método analítico sugerido por Zago (1996).

A análise de sensibilidade foi desenvolvida a partir de uma folha de cálculos estimativos sequenciais com o uso do *software Excel*. Na elaboração do modelo foram considerados dois cenários de produção de energia elétrica a partir de biogás proveniente da vinhaça em Minas Gerais:

- a) Potencial máximo de produção de energia elétrica com base na produção de etanol licenciada pelo Estado;
- b) Potencial mínimo de produção de energia elétrica com base na produção de etanol licenciada pelo Estado.

Esta análise tem como objetivo estimar o potencial máximo e mínimo de energia elétrica que poderá ser gerada a partir do biogás proveniente de vinhaça, tendo como referência a capacidade técnica da produção de etanol das usinas em atividade atualmente no estado e licenciadas pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais – SEMAD (SIAMIG, 2017; MATEUS, 2010).

Espera-se que, a partir dos resultados obtidos, seja possível quantificar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do processo de biodigestão da vinhaça produzida durante a destilação do etanol de primeira geração - 1G do setor sucroenergético do estado de Minas Gerais.

### 4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Apesar de Minas Gerais ser um grande produtor de cana-de-açúcar, atualmente ainda não existem plantas produtivas de etanol 2G no Estado. Assim, foi analisado apenas o potencial de biodigestão de vinhaça proveniente da produção de etanol 1G.

Para a elaboração deste trabalho foi realizada revisão bibliográfica e documental incluindo artigos técnicos, livros, sites e relatórios setoriais, bem como

teses e dissertações sobre o assunto. O desenvolvimento dos cálculos foi baseado na coleta de dados do setor sucroenergético mineiro disponibilizados por instituições governamentais, tais como a SEMAD e a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, e também por instituições não governamentais como é o caso da Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais – SIAMIG, constantes nos anexos. Também foram utilizadas informações provenientes das pesquisas de Flausino (2015) e Mateus (2010).

## 4.2 METODOLOGIA

Conforme o modelo sugerido, para a elaboração do presente trabalho, as simulações foram feitas com a utilização do software Excel. No entanto, devido à dificuldade de obtenção de alguns dados necessários para a realização dos cálculos em função da natureza e do processo de produção do biogás de vinhaça, foi necessária a predefinição de alguns parâmetros conforme será demonstrado no decorrer do trabalho. Ao final da elaboração da ferramenta de cálculo, obteve-se a configuração mostrada na figura do Apêndice 1, cujos dados de entrada para os cálculos são o TD (capacidade de moagem de cana em toneladas por dia), de acordo com licenciamento ambiental feito pela SEMAD e o percentual de produção de etanol com base no mix de produção historicamente registrado pela SIAMIG.

## 4.3 DESENVOLVIMENTO DOS CÁLCULOS PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DA VINHAÇA

Atualmente, uma das grandes dificuldades encontrada pelos pesquisadores para a determinação da produção de energia elétrica a partir do biogás proveniente da vinhaça se deve ao fato de que, tanto a quantidade quanto a qualidade deste energético (biogás) sofrem interferências diretas do tipo de vinhaça produzida e da tecnologia que será utilizada no processo de biodigestão da mesma. Dessa forma, para possibilitar a utilização da metodologia que foi adotada pelos autores Granato (2003) e Germano (2011), foi necessária a determinação prévia de alguns parâmetros.

No desenvolvimento dos seus respectivos trabalhos, os autores Germano e Granato utilizaram as características técnicas dos seguintes equipamentos: biodigestor UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) e turbina a gás modelo J320V81 – Container, com capacidade de 1 MWh (GRANATO, 2003). De acordo com Lamo (1991) apud Germano (2011), o biodigestor UASB é atualmente o equipamento mais estudado e aplicado para tratamento da vinhaça e seu dimensionamento leva em consideração fatores como a produção diária de etanol e a consequente geração de vinhaça, bem como a DQO do efluente e a carga orgânica a ser removida por dia (GERMANO, 2011). Gaspar (2003) descreve biodigestor UASB como uma unidade de fluxo ascendente que favorece a separação das fases sólida, líquida e gasosa, sendo que os gases são direcionados para topo do equipamento e o restante para sua parte inferior. Neste equipamento o efluente entra pela parte inferior por uma série de tubos de alimentação e, imediatamente, sofre a degradação dos seus componentes biodegradáveis que são convertidos em biogás (GASPAR, 2003).

Germano (2011) e Granato (2003) utilizaram valores de produção de vinhaça diferentes, sendo que o primeiro utilizou os dados de produção de vinhaça fornecidos por uma empresa situada no Estado de Pernambuco e o segundo trabalhou com dados de produção de uma destilaria situada no interior de São Paulo. No presente trabalho, optou-se por utilizar os mesmos parâmetros adotados por Granato devido à proximidade entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo. O objetivo desta escolha foi alcançar resultados mais condizentes com as características regionais destes dois estados. Ressalta-se que, em ambos os casos, a metodologia adotada mostrou-se muito eficaz para os cálculos e análises realizados, que tiveram como base os respectivos dados técnicos das usinas que foram estudadas. No entanto, durante o desenvolvimento do presente estudo percebeu-se que a utilização desta metodologia, na íntegra, se tornaria inviável, devido à impossibilidade do acesso a todos os dados técnicos de todas as plantas sucroenergéticas de Minas Gerais. Também não são conhecidas todas as características físico-químicas de toda a vinhaça produzida por estas usinas, o que pode afetar o resultado dos cálculos, conforme afirmado por Colturato (2015). Devido a todos estes fatores, foi necessária a implementação de alguns ajustes na metodologia utilizada, que serão descritos nos tópicos seguintes.

#### 4.3.1 FLEXIBILIZAÇÃO DA PRODUÇÃO, ATR E MIX DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL

De acordo com Alves (2002) apud Lamounier (2006), uma das características mais importantes do setor sucroenergético nacional é a possibilidade de flexibilização da produção de açúcar ou etanol na mesma planta industrial. É obvio que aumentar a produção de açúcar, dada uma mesma quantidade de cana em uma determinada usina, afetará a quantidade de etanol a ser produzido e vice-versa. Lamounier afirma que a flexibilização da produção de açúcar ou etanol é limitada pela capacidade individual de produção de cada usina em fabricar determinado tipo de produto (LAMOUNIER, 2006). A produção de açúcar e etanol pode variar de acordo com as exigências do mercado e esta condição impactará diretamente a produção de vinhaça e, conseqüentemente, o volume de biogás proveniente da sua biodigestão.

Em um estudo realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB - sobre o perfil do setor sucroenergético nacional, identificou-se que o valor do ATR (açúcar total recuperável) sofre enorme variação entre estados e regiões produtoras de cana. O ATR está sujeito também às variações climáticas que ocorrem entre as diferentes safras, cada ano. O estudo aponta ainda que outro fator relevante e de grande interferência na quantidade de ATR é o processo de CCT – Corte, Carregamento e Transporte da cana, que é peculiar de cada unidade produtora (CONAB, 2017). Esta pesquisa demonstrou que, tecnicamente, existe uma relação constante entre a quantidade de ATR e o produto a ser fabricado, conforme Tabela 3.

**TABELA 3 - QUANTIDADE DE ATR NECESSÁRIA PARA OBTENÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL**

<b>Produto</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade de ATR (kg)</b>
Açúcar	1kg	1,0495
Etanol anidro	1l	1,7651
Etanol hidratado	1l	1,6913

Fonte: CONAB, 2017

Com base nestes dados, o estudo da CONAB concluiu que é possível calcular a quantidade de cana-de-açúcar necessária para produzir um quilo de açúcar ou um litro de etanol nas principais macrorregiões brasileiras produtoras de cana-de-açúcar, previamente denominadas de Região Centro-Sul e Região Norte-Nordeste. Estes valores estão disponibilizados na Tabela 4 (CONAB, 2017):

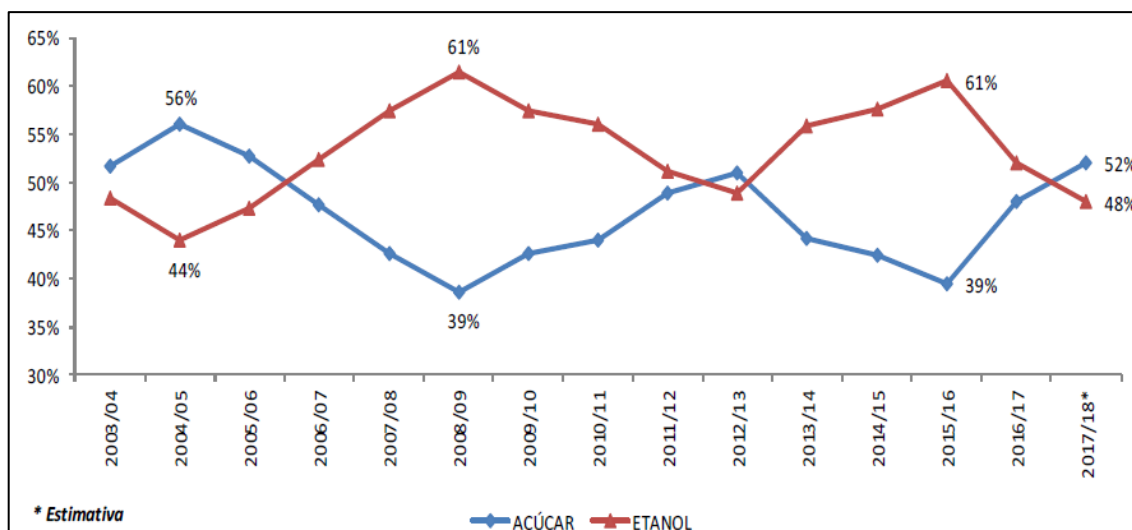
**TABELA 4 - QUANTIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR NECESSÁRIA PARA A FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL**

<b>Produto</b>	<b>Unidade</b>	<b>Região Centro-Sul</b>	<b>Região Norte-Nordeste</b>
Açúcar	1kg	7,4 kg de cana-de-açúcar	7,8 kg de cana-de-açúcar
Etanol anidro	1l	12,5 kg de cana-de-açúcar	13 kg de cana-de-açúcar
Etanol hidratado	1l	12 kg de cana-de-açúcar	12,5 kg de cana-de-açúcar

Fonte: CONAB, 2017

Durante o processamento da cana-de-açúcar, é necessário definir qual a quantidade de cada produto a ser produzido. Esta definição se dá logo após a extração do caldo da cana, com a determinação de qual a quantidade de caldo será destinada para a produção de açúcar e qual será a quantidade destinada para a produção de etanol, ou seja, neste momento se define o “mix da produção” da usina. O “mix de produção” de uma usina pode ser definido como sendo a decisão da quantidade de ATR contido no caldo de cana que será destinado para a produção de açúcar ou etanol (REIS SILVA, 2013). Assim, a determinação do mix de produção em uma dada safra acaba por se tornar um dos grandes problemas operacionais das usinas. Isto se deve ao fato de que as constantes variações dos preços de mercado de ambos produtos criam uma grande dificuldade no planejamento e controle da produção. Desta forma, podemos afirmar que o mix de produção de uma usina se torna um fator de interferência direta no potencial de produção de energia elétrica a partir do biogás extraído da vinhaça.

De acordo com dados publicados pela SIAMIG (2017), historicamente o mix de produção de etanol das usinas sucroenergéticas mineiras estão compreendidas no intervalo de 44% a 61%, conforme Gráfico 4.

**GRÁFICO 4 - MIX DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL EM MINAS GERAIS.**

Fonte: SIAMIG, 2018

#### 4.3.2 CÁLCULO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ETANOL

Flausino (2015) ressalta que, no Estado de Minas Gerais, os processos passíveis de autorização de licenciamento ambiental são de responsabilidade da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais – SEMAD. Isso vale para todos os empreendimentos industriais que desenvolvem atividades modificadoras do meio ambiente, e devem atender às diretrizes da Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 09 de setembro de 2004. A autora salienta que estes processos e seus conteúdos são de livre acesso público, conforme preconiza a Política Nacional de Meio Ambiente através da Lei Federal Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 (FLAUSINO, 2015).

Seguindo estas premissas, foi realizada pesquisa sobre os dados relativos aos empreendimentos dedicados ao processamento de cana e licenciados pela SEMAD, em Minas Gerais, conforme Anexo 1.

Para a realização do cálculo do potencial de etanol a ser produzido em Minas Gerais, tomou-se como base as informações sobre a capacidade instalada de moagem de cana licenciada pelo Estado, de acordo com o Anexo 1. Para este cálculo, formulou-se a Equação 1 com base nos cálculos desenvolvidos pela CONAB para produção de etanol na região Centro-Sul e constantes na Tabela 4. Para o

desenvolvimento da equação também foi utilizado o conceito de mix de produção, chegando à seguinte equação:

$$\mathbf{VED = (TD \times Mix) \times TEP} \qquad \mathbf{Equação 1}$$

Onde:

VED - Volume de produção de etanol m<sup>3</sup>/dia;

TD - Capacidade de moagem de cana t/dia (licenciado pela SEMAD);

Mix – percentual de etanol que será produzido;

TEP - Taxa de produção de etanol produzido (litro) por Ton de cana (cálculo CONAB)

#### 4.3.3 CÁLCULO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE VINHAÇA

Para o cálculo do Volume de Vinhaça Gerada (VVG), foi adotada a mesma metodologia utilizada por Germano e Granato também descrita por Zago (1996). Esta metodologia utiliza amostras de vinho produzido diariamente nas colunas de destilação e a partir de análise laboratorial se calcula a média aritmética através da seguinte equação:

$$\mathbf{VVG = 100 \times (VAV / \% AV)} \qquad \mathbf{Equação 2}$$

Onde:

VVG - Volume de Vinhaça Gerada em m<sup>3</sup>/dia;

VAV - Volume de álcool do vinho, através do Micro Destilador Modelo TE – 012;

%AV - Teor alcoólico do vinho, através do Densímetro Digital Modelo DMA 46 – PAAR.

A utilização, na íntegra, desta metodologia de cálculo para a determinação do volume de vinhaça produzida em todo o Estado de Minas Gerais se mostrou inviável pelos motivos já expostos anteriormente. Portanto, estes cálculos foram realizados com base nas informações sobre o volume de vinhaça gerado para cada litro de etanol produzido e que estão disponíveis na literatura.

Assim sendo, no presente estudo, para os cálculos do potencial de produção de vinhaça em Minas Gerais foi adotado o valor médio de 11,5 m<sup>3</sup> de vinhaça para cada m<sup>3</sup> de etanol destilado, com base na conclusão obtida por Elia Neto através do levantamento do CTC, conforme demonstrado no item 2.3.1.



Desta forma, tomando como base a Equação 1 utilizada para o cálculo do potencial de produção de diária de etanol, a Equação 2 foi adaptada passando à seguinte configuração:

$$\mathbf{VVG = VED \times TPV}$$

**Equação 2'**

Onde:

VVG - Volume de Vinhaça Gerada em m<sup>3</sup>/dia;

VED - Volume de produção de etanol m<sup>3</sup>/dia;

TPV - Taxa de produção de m<sup>3</sup> de vinhaça por m<sup>3</sup> de etanol produzido (considerado o valor médio de 11,5 m<sup>3</sup>, segundo ELIA NETO, 2016, p. 4).

#### **4.3.4 CÁLCULO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE VINHAÇA**

Conforme exposto anteriormente, as diferentes concentrações e composições químicas existentes entre as vinhaças produzidas pelas usinas do Estado dificultam os cálculos do potencial de biogás a ser gerado.

Granato (2013) ressalta que a produção de biogás, e consequentemente de CH<sub>4</sub>, são diretamente proporcionais à DQO – Demanda Química por Oxigênio, e conforme demonstrado na Tabela 1 este parâmetro pode variar de acordo com a procedência da vinhaça, se de melaço, caldo ou mista. Para os cálculos da quantidade de energia gerada pela biodigestão anaeróbia da vinhaça adotou-se a metodologia sugerida por Lamo (1991) e utilizada por Granato (2013). Porém, devido aos motivos descritos anteriormente, em nosso trabalho também foram necessárias algumas adaptações na metodologia e nas equações utilizadas por estes autores, tomando-se como base as Equações 1 e 2'.

A Equação 3 trata da calcula a orgânica presente na vinhaça, conforme apresentado a seguir.

$$\mathbf{CO = VVG \times DQO}$$

**Equação 3**

Onde:

CO = carga orgânica (kg.DQO/dia);

DQO = Demanda Química de Oxigênio em mg/l. (considerado 40.000mg/l LAMO, 1991, apud GRANATO, 2003, p. 66).

Tomando como base a Equação 3, a produção de biogás pela biodigestão anaeróbia pode ser calculada através da Equação 4.

$$\mathbf{PB = CO \times E \times F} \qquad \mathbf{Equação 4}$$

Onde:

PB = produção de biogás em Nm<sup>3</sup>/dia;

CO = carga orgânica (kg.DQO/dia);

E = eficiência (percentual) de remoção de DQO do processo (considerado 70% segundo SOUZA, 2001 apud GRANATO, 2003, p. 66);

F = fator de conversão de biogás por DQO removido (considerado 0,45 N.m<sup>3</sup>/kg DQO removido, LAMO, 1991 apud GRANATO, 2003, p. 66).

Por fim, a quantidade de energia proveniente do biogás pode ser calculada a partir da Equação 5.

$$\mathbf{GEB = PB \times PCIB} \qquad \mathbf{Equação 5}$$

Onde:

GEB = quantidade de energia do biogás em kcal/dia;

PCIB = poder calorífico inferior do biogás em kcal/Nm<sup>3</sup> (considerado 5.100 kcal/Nm<sup>3</sup> LAMO, 1991, apud GRANATO, 2003, p. 66).

É importante observar que os cálculos da produção de biogás, da carga orgânica e da quantidade de energia do biogás estão referenciados à produção diária. No entanto, para o desenvolvimento da nossa pesquisa a produção de biogás foi atrelada ao volume de etanol produzido em um período de safra/ano. Desta forma, foi necessária a conversão do volume de etanol produzido em um período safra/ano em valores de produções diários. De acordo com Rossetto (2010), o período de colheita da cana está compreendido entre os meses de abril e novembro na Região Centro-Sul e entre novembro e abril, na Região Nordeste. Flausino (2015) considerou em

seus cálculos de geração de energia elétrica excedente o período de 270 dias de safra/ano. No presente estudo, também foi adotado este período para o desenvolvimento dos cálculos do potencial de biogás gerado e da quantidade de sua energia.

#### **4.3.5 CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE VINHAÇA**

Conforme exposto no item 3.4, a literatura atual aponta as três formas mais utilizadas para o aproveitamento energético do biogás da vinhaça como sendo: a) a geração de energia térmica; b) o uso automotivo; e c) a geração de energia elétrica. Como o objetivo deste trabalho é a identificação do potencial de geração de energia elétrica com o uso do biogás de vinhaça, não serão analisadas as demais formas de aproveitamento deste energético.

Tomando como base a Equação 5, é possível então estimar a quantidade de energia elétrica que será produzida pela combustão do biogás, e que obviamente dependerá do tipo do conjunto de turbinas/equipamentos que serão utilizadas no processo. Dando sequência à metodologia adotada, a quantidade de energia elétrica gerada pode ser estimada a partir da Equação 6 (GRANATO, 2003, GERMANO, 2011). Aqui também os parâmetros serão os mesmos utilizados por estes autores.

$$\text{PEEB} = \text{GEB} \times \text{E1}$$

**Equação 6**

Onde:

PEEB = quantidade de energia elétrica gerada a partir da combustão do biogás em kcal/dia;

E1 = eficiência da turbina a gás (considerada 35%, LAMO, 1991, apud GRANATO, 2003, p. 67).

## 5 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE VINHAÇA NO ESTADO DE MINAS GERAIS

O Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais, publicado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM-MG, define o potencial teórico de geração de energia a partir de uma determinada fonte como sendo “*o limite máximo de energia fisicamente disponível a partir de um recurso energético em uma determinada área e período de tempo*” (FEAM, 2014, p. 11).

Com base neste preceito, levando-se em consideração os pontos ressaltados anteriormente e a metodologia de cálculo aplicada no Capítulo 4, pode-se então estimar o potencial de energia elétrica que poderá ser gerada a partir da utilização do biogás de vinhaça, tendo como base o volume de etanol que poderá ser produzido no Estado de Minas Gerais. Para a elaboração dos cálculos foram utilizadas a capacidade instalada de moagem de cana (t/d) licenciadas pela SEMAD para as empresas em atividade atualmente no Estado, constantes no Anexo 3. Neste contexto, foram traçados dois cenários com base no mix de produção de etanol da série histórica registrada no Estado, conforme Gráfico 4, que são:

1. Potencial mínimo de produção de energia elétrica: considerado o percentual mínimo do mix de produção de etanol de 44%.
2. Potencial máximo de produção de energia elétrica: considerado o percentual máximo do mix de produção de etanol de 61%.

### 5.1 CÁLCULO DOS POTENCIAIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE VINHAÇA

Conforme discorrido, a primícia para a produção da vinhaça e conseqüentemente do biogás proveniente da sua biodigestão, é a produção de etanol.

Segundo dados publicados pela SIAMG (2017), Minas Gerais possui 35 usinas processadoras de cana-de-açúcar em atividade atualmente, sendo que, deste total, apenas 2 unidades produzem somente açúcar e, portanto, estas usinas não serão consideradas nos cálculos dos potenciais de produção de energia elétrica a partir do biogás de vinhaça.

O desenvolvimento dos cálculos subsequentes está em consonância com as equações descritas no Capítulo 3 e que estão relacionadas na Tabela 5, cujas terminologias estão dispostas na Tabela 6:

**TABELA 5 - EQUAÇÕES DO CÁLCULO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DE BIOGÁS DE VINHAÇA**

<b>Cálculo do volume de produção de etanol em m<sup>3</sup>/dia</b>	
$VED = (TD \times Mix) \times TEP$	(1)
<b>Cálculo do potencial de produção de vinhaça em m<sup>3</sup>/dia</b>	
$VVG = VED \times TPV$	(2)
<b>Cálculo da carga orgânica (kg.DQO/dia)</b>	
$CO = VVG \times DQO$	(3)
<b>Cálculo da produção de biogás em Nm<sup>3</sup>/dia</b>	
$PB = CO \times E \times F$	(4)
<b>Cálculo do conteúdo energético do biogás em kcal/dia</b>	
$GEB = PB \times PCIB$	(5)
<b>Cálculo da quantidade média de energia elétrica gerada em kcal/dia</b>	
$PEEB = GEB \times E1$	(6)

Fonte: Elaborado pelo autor

**TABELA 6 - TERMINOLOGIA UTILIZADA**

<b>Terminologia</b>	<b>Descrição</b>
<b>VED</b>	Volume de produção de etanol em m <sup>3</sup> /dia
<b>TD</b>	Capacidade de moagem de cana em t/dia (licenciado pela SEMAD)
<b>Mix</b>	Percentual de etanol que será produzido
<b>TEP</b>	Taxa de produção de etanol produzido (litro/Ton de cana), cálculo CONAB
<b>VVG</b>	Volume de Vinhaça Gerada em m <sup>3</sup> /dia
<b>TPV</b>	Taxa de produção de m <sup>3</sup> de vinhaça por m <sup>3</sup> de etanol produzido (considerado 11,5 litro)
<b>CO</b>	Carga orgânica (kg.DQO/dia)
<b>DQO</b>	Demanda Bioquímica de Oxigênio em mg/l. (considerado 40.000 mg/l)
<b>PB</b>	Produção de biogás em Nm <sup>3</sup> /dia (N é unidade de vazão Normal Metro Cúbico por Hora (Nm <sup>3</sup> /h))
<b>E</b>	Eficiência (percentual) de remoção de DQO do processo (considerado 70%)
<b>F</b>	Fator de conversão de biogás por DQO removido, considerado 0,45 N.m <sup>3</sup> /kg DQO removido
<b>GEB</b>	Quantidade de energia do biogás em kcal/dia
<b>PCIB</b>	Poder calorífico inferior do biogás em kcal/Nm <sup>3</sup>
<b>PEEB</b>	Quantidade média de energia elétrica gerada a partir da combustão do biogás em kcal/dia
<b>E1</b>	Eficiência média da turbina a gás (considerada 35%)

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o Anexo 3, a capacidade instalada de processamento de cana-de-açúcar no Estado corresponde ao total de 320.736 toneladas de cana/dia, sendo expurgadas as duas unidades que produzem somente açúcar. Utilizando a modelagem proposta e as fórmulas desenvolvidas no Capítulo 4, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 7, referentes aos potenciais mínimo e máximo de geração de energia elétrica/dia a partir do biogás da vinhaça, considerando-se os mix de produção de etanol de 44% e 61% respectivamente:

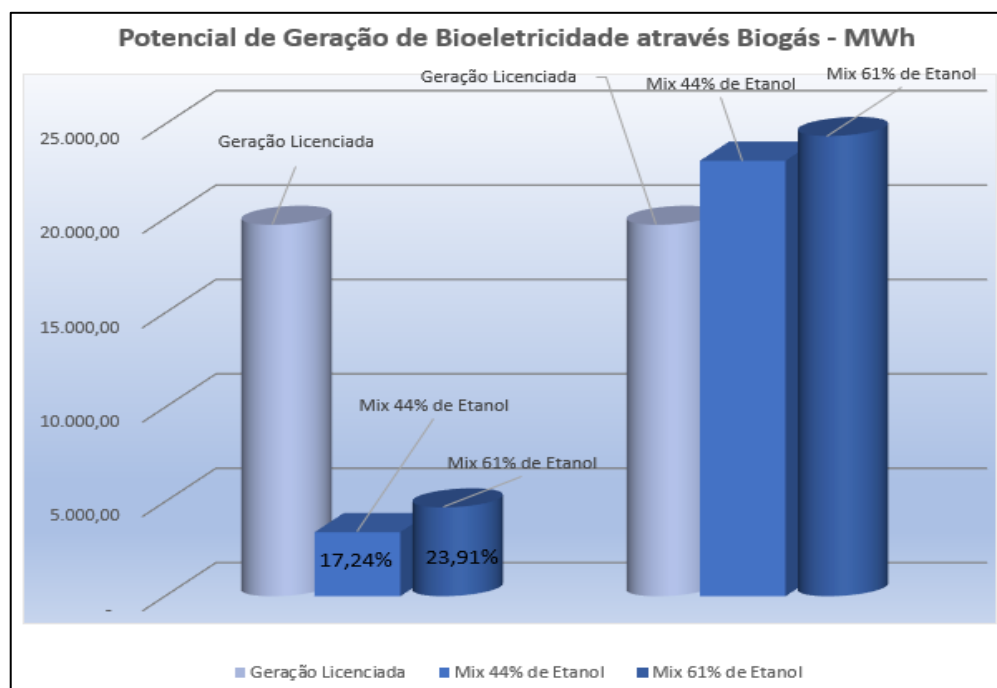
**TABELA 7 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DE BIOGÁS**

<b>Mix de produção 44% de etanol</b>	<b>Mix de produção 61% de etanol</b>
<b>VVG</b> = 129.833,9 m <sup>3</sup> /dia	<b>VVG</b> = 179.997 m <sup>3</sup> /dia
<b>CO</b> = 5.193.357,312 kg.DQO/dia	<b>CO</b> = 7.199.881,7 kg.DQO/dia
<b>PB</b> = 1.635.907,6 Nm <sup>3</sup> /dia	<b>PB</b> = 2.267.962,7 Nm <sup>3</sup> /dia
<b>GEB</b> = 8.343.128.521,7 kcal/dia	<b>GEB</b> = 11.566.609.996 kcal/dia
<b>PEEB</b> = 3.393,8 MWh/dia	<b>PEEB</b> = 4.705 MWh/dia

Fonte: Elaborado pelo autor

A capacidade total instalada/licenciada de cogeração de energia elétrica a partir do bagaço de cana das usinas sucroenergéticas corresponde a 19.675,200 MWh, considerando o fator de carga unitário das usinas atualmente em atividade no Estado, constantes no Anexo 2. Portanto, se acrescentarmos os montantes dos potenciais mínimos e máximos calculados para os dois cenários propostos, ao volume de energia de cogeração já licenciada, obtém-se, respectivamente, 17,24% e 23,91% de aumento na capacidade de geração de energia elétrica no setor, conforme mostrado no Gráfico 5.

**GRÁFICO 5 - POTENCIAL DE ACRÉSCIMO DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DO BIOGÁS DE VINHAÇA EM RELAÇÃO AO POTENCIAL LICENCIADO**



Fonte: Elaborado pelo autor

Como forma de exercitar a metodologia desenvolvida por este trabalho, foi calculado o montante de energia elétrica adicional que poderia ter sido gerada a partir do biogás de vinhaça, considerando o volume de etanol produzido na safra 2016/17. Segundo os dados publicados pela CCE e pela SIAMIG, as produções de etanol e bioeletricidade ocorridas em Minas Gerais na safra de 2016/17 (CCE, SIAMIG, 2017), corresponderam a 2.640.450 m<sup>3</sup> e 2.433.830 MWh, respectivamente, conforme Anexos 4 e 5. A produção de bioeletricidade correspondeu a 9.014,185 MWh/dia, considerando o período de 270 dias de safra. Para a elaboração destes cálculos foi necessário a modificação da planilha inicial constante no Apêndice 1, dando origem a planilha constante no Apêndice 2, uma vez que o volume de etanol produzido no período já é conhecido e publicado pela SIAMIG (SIAMIG, 2017). Tomando como base estes montantes, obtivemos os resultados expostos na Tabela 8 e conseqüentemente o potencial mínimo de produção de bioeletricidade relativo à produção de etanol da safra 2016/17.

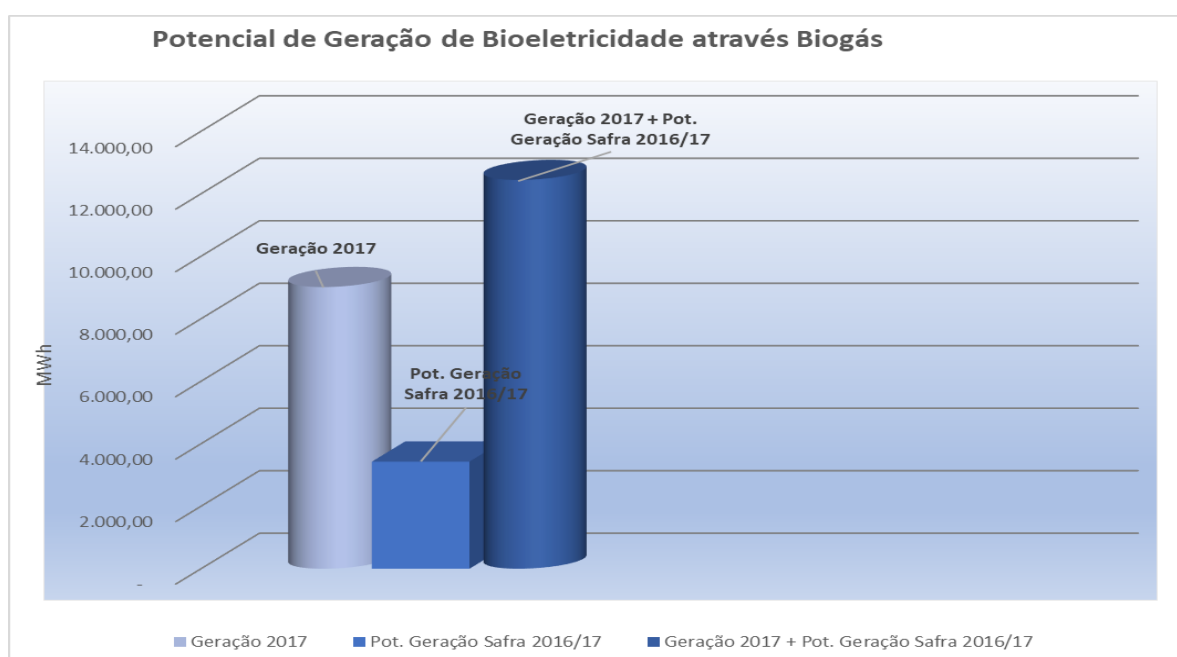
**TABELA 8 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DE BIOGÁS DE VINHAÇA – SAFRA 2016/2017**

Potencial mínimo de produção de bioeletricidade/dia Safra 2016/17
<b>VVG</b> = 131.014 m <sup>3</sup> /dia
<b>CO</b> = 5.240.592,6 kg.DQO/dia
<b>PB</b> = 1.650.786,7 Nm <sup>3</sup> /dia
<b>GEB</b> = 8.419.012.000 kcal/dia
<b>PEEB</b> = 3.426 MWh/dia

Fonte: Elaborado pelo autor

Isso significa dizer que, conforme observado no Gráfico 6, poderíamos ter um incremento de 38,02% de geração de bioeletricidade no setor, caso o aproveitamento do potencial teórico de produção de eletricidade a partir do biogás de vinhaça já estivesse sido implementado. Como o potencial energético do bagaço de cana permite às usinas a autossuficiência em energia térmica e elétrica (SEABRA, 2008), este excedente de bioeletricidade estimado poderia ser exportado para a rede de distribuição, gerando mais ganhos econômicos e ambientais, possibilitando o aumento da sustentabilidade do setor.

**GRÁFICO 6 - POTENCIAL DE ACRÉSCIMO DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DO BIOGÁS DE VINHAÇA – SAFRA 2016/2017**





## 6 CONCLUSÕES

Apesar de sua grande importância para a economia nacional, o setor sucroenergético enfrenta grande dificuldade financeira devido à crise que atingiu o seguimento ao final da década de 2010 e ainda mantém seus reflexos nos últimos anos. Em Minas Gerais a situação não é diferente, sendo que o setor representa em torno de 12,5% do produto interno bruto do Estado, e é responsável pela geração de aproximadamente 54 mil empregos diretos de acordo com dados da Relação Anual de Informações Sociais – RAIS. No entanto, nos últimos anos, 11 unidades sucroenergéticas encerraram suas atividades no Estado (RAIS, 2015; SIAMIG, 2018).

A crescente demanda orgânica por etanol associada à pressão por consumo de energias renováveis propiciam um cenário mais favorável para os produtores em médio prazo. Um fator muito positivo ao setor foram os ousados compromissos assumidos pelo Brasil por ocasião da assinatura do “Acordo de Paris”. Esta condição pode representar ótimas oportunidades para o setor devido ao aumento da produção/consumo de etanol que serão necessários para que o país cumpra suas metas assumidas durante a COP21.

Atrelado ao aumento da produção de etanol esperado para os próximos anos, está o conseqüente aumento da geração de vinhaça. A utilização da vinhaça no processo de fertirrigação das lavouras de cana, apesar de propiciar significativas economias com fertilizantes, podem causar danos ao meio ambiente quando utilizado em excesso e já tem seu uso restringido por questões ambientais.

A biodigestão da vinhaça para produção de biogás vem se mostrando como importante alternativa para uma melhor destinação deste resíduo. Além de equacionar um problema ambiental, esta técnica pode representar uma ótima alternativa econômica para aumento da sustentabilidade do setor com a geração de bioeletricidade através do biogás gerado por este processo. A geração do biogás da vinhaça utiliza uma tecnologia relativamente simples e abre uma nova vertente para novos investimentos no setor. Como exemplo, temos a utilização de reatores UASB, que são muito comuns no tratamento de esgoto e, apesar de ainda pouco utilizados para o tratamento da vinhaça, têm se mostrado como uma alternativa muito viável e com grande eficiência.

O biogás gerado por este processo, devido à sua alta carga energética, pode ainda ter várias finalidades como o uso automotivo ou sua queima direta para produção de vapor a ser utilizado no processo industrial da própria usina.

O objetivo principal deste trabalho foi realizar uma avaliação teórica do potencial do Estado de Minas Gerais para a geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente da biodigestão de vinhaça da destilação do etanol. No entanto, de forma indireta foi possível também avaliar a metodologia utilizada por alguns autores para a determinação deste potencial com base na produção de etanol.

Esta metodologia mostrou-se muito eficiente nos casos em que se tem conhecimento de todas as características da vinhaça que está sendo produzida, uma vez que a quantidade e a qualidade do biogás gerado dependem diretamente destas características. Resguardada algumas considerações, ficou demonstrado que esta metodologia pode ser uma boa ferramenta para uma análise quantitativa do potencial teórico de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente da vinhaça.

Ao final, podemos concluir que o setor sucroenergético mineiro, apesar das imensas dificuldades enfrentadas nos últimos anos, possui um importante potencial para produção de bioeletricidade a partir do biogás da vinhaça, que pode variar de 17,24% e 23,91% de acordo com cálculos baseados nos dados de licenciamento ambiental. Se considerarmos a produção de etanol da safra 2016/17 este potencial poderia alcançar 38,2%. Estes valores ainda podem ser maiores se levarmos em consideração as necessidades futuras de produção de etanol para o Brasil cumprir as metas assumidas na COP21. Uma grande vantagem das usinas sucroenergéticas mineiras em atividade é que, todas as unidades mineiras já produzem energia elétrica a partir da queima do bagaço da cana e, portanto, já possuem suas instalações preparadas para o processo de cogeração.

O somatório da geração de energia elétrica a partir do biogás de vinhaça com a energia que já é gerada pela queima do bagaço de cana poderá ocasionar um excedente de energia em cada unidade. Sobre essa questão, em específico, o excedente de energia elétrica gerado pelo aproveitamento energético da vinhaça, poderá encontrar dificuldades em seu escoamento através do sistema de transmissão existente atualmente. Desta forma, é recomendado como estudo futuro, uma análise mais apurada sobre o parque de geração de bioeletricidade do setor sucroenergético

mineiro e as condições de exportação desta energia, na busca de alternativas para equacionar este problema.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL]. Banco de Informações de Geração – BIG. Capacidade de geração do Brasil. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 28 nov. 2017.

ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS SUCROENERGÉTICAS DE MINAS GERAIS [SIAMG]. Perfil da Produção. Belo Horizonte: SIAMG, 2017. Disponível em: <<http://www.siamig.com.br/uploads/a418bac3776db7435b16f6b1dc11afe5.pdf>>. Acesso em 20 nov. 2017.

ANDRADE, Lenadro Florentino. Produção de Etanol de Segunda Geração. 2014. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas da UFMG, 2015 (Monografia de Especialização). Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUBD-9K5KBG>>. Acesso em 01/10/2018.

BALDACIN, Ana C. Stocco; PINTO, Gláucia Maria Ferreira. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás. Revista Eletrônica FACP, São Paulo, ano 03, n. 7, Jan. 2015. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2016/07/Biodigest%C3%A3o-Anaer%C3%B3bia-da-Vinha%C3%A7a-Aproveitamento-Energ%C3%A9tico-do-Biog%C3%A1s.pdf>>. Acesso em 15/12/2018.

BAPTISTA, Antônio Sampaio - Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria sucroenergética. Universidade de São Paulo, 2017. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3368683/mod\\_resource/content/1/Aula%20%2020-04-2017.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3368683/mod_resource/content/1/Aula%20%2020-04-2017.pdf)>. Acesso em 18/12/2017.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Bioetanol de cana-de-açúcar : energia para o desenvolvimento sustentável / organização BNDES e CGEE. – Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA [CCEE]. Fontes. Notícias. Disponível: < [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/noticias-opinioao/noticias/noticialeitura?contentid=CCEE\\_380438&\\_afLoop=425518789253753#%40%3Fcontentid%3DCCEE\\_380438%26\\_afLoop%3D425518789253753%26\\_a df.ctrl-state%3Dakpeu8l0s\\_49](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opinioao/noticias/noticialeitura?contentid=CCEE_380438&_afLoop=425518789253753#%40%3Fcontentid%3DCCEE_380438%26_afLoop%3D425518789253753%26_a df.ctrl-state%3Dakpeu8l0s_49)>. Acesso em: 19 set. 2016.

CAMPOS, Natália Lorena. Políticas de estado no setor sucroenergético. Geo UERJ 26 (2015): 301-328. Disponível em: <<http://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/12696>>. Acesso em: 26 jul. 2017.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil. – v. 1(2017- ) – Brasília : CONAB, 2017- v. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_01\\_05\\_15\\_02\\_45\\_perfil\\_su\\_croalcoool2012e13.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_01_05_15_02_45_perfil_su_croalcoool2012e13.pdf)>. Acesso em: 05 jan. 2018.

CONSTANT, M.; NAVEAU, Henry; FERRERO, Gian Luca; NYNS, Edmond-Jacques. Biogas End-Use in the European Community. Elsevier Science Publisher, London and New York (1989).

COSTA, David Freire da. Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento de Esgoto. 2006. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006 (Dissertação de Mestrado)

COSTA, Marco Aurélio; SILVA, Pedro S. C.; VALLE, Pedro W. P. A. do. BIOENERGIA cadeia produtiva e co-produtos em Minas Gerais. Belo Horizonte: Instituto de Estudos Pró-Cidadania/SECTES, 2009.

CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa, coordenador. Bioetanol de cana-de-açúcar P&D para produtividade e sustentabilidade, São Paulo : Blucher, 2010.

COLTURATO, Luis Felipe de Dornfeld Braga. Dessulfuração de biogás da metanização da vinhaça: uma nova abordagem para remoção de altas concentrações de H<sub>2</sub>S. 2015. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, 2015 (Tese de Doutorado).

Estado da Arte da Vinhaça. 2º Workshop "Resíduos urbanos e agrícolas: energia, reciclagem de nutrientes e produção de fertilizantes" Local: Anfiteatro "Otávio Tisselli Filho" - Campinas, SP, 30/08/2016. Disponível em: <file:///C:/Users/c040904/Documents/Jo%C3%A3o%20Marcos/JM%20PARTICULAR/Mestrado/Outros/Lvros%20para%20tese/7f4722414b789dfa4ca3522709fd6cd7.pdf> Acesso em 31 out. 2016.

ELIA NETO, André. Estado da Arte da Vinhaça. Artigo publicado pela UNICA. Piracicaba, SP, 31 de ago. 2016. Disponível em: <www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=35414851>. Acesso em 31 out. 2016.

FLAUSINO, Bruna de Fátima Pedrosa Guedes. Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de Minas. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, 2015 (Tese de Doutorado).

GARLIPP, Ana Alice. A evolucao da cana-de-acucar no Triangulo Mineiro e Alto Paranaiba. Recife. V Encontro de Economistas De Língua Portuguesa, 5 - 7 de novembro de 2003.

Fundação Estadual do Meio Ambiente [FEAM]. Potencial de energias renováveis. Volume II - Biomassa, resíduos, hidroeletricidade. v.2. Plano de Energia e Mudanças do Clima de Minas Gerais (PEMC). Belo Horizonte: FEAM, 2014d. 11p.

GASPAR, Patrícia Martins Ferreira. Pós-tratamento de efluente de reator UASB em sistema de lodos ativados visando a remoção biológica do nitrogênio associada à remoção físico-química do fósforo. 2003. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. (Dissertação de Mestrado).

GERMANO, Bruna Nobrega. Produção de biogás da vinhaça: uma análise de bem-estar social usando modelagem econômico-hidrológica integrada. Dissertação. Recife. Universidade Federal de Pernambuco (PIMES/UFPE), 2011.

GOLDEMBERG, José; COELHO, Suani Teixeira; NASTARI, Plínio Mário; LUCON, Oswaldo. Ethanol learning curve—the Brazilian experience. *Biomass and Bioenergy* v. 26, p. 301-304, 2004.

GRANATO, Eder Fonzar. Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça. 2003. - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, SP, 2003. (Dissertação de Mestrado) Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/90820>>. Acesso em 22 nov. 2016.

Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria / Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ). --- [Belo Horizonte]: Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ), p. 84-86, [2015 ].

LAMO, Paulo de. Sistema produtor de Gás Metano Através de Tratamento de Efluentes Industriais – METHAX/BIOPAQ – CODISTIL – Piracicaba, 1991.

LAMONICA, Helcio Martins. Potencial de geração de excedentes de energia elétrica com o biogás produzido a partir da biodigestão da vinhaça na indústria sucroalcooleira brasileira. In *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural, 2006, Campinas (SP, Brazil) [online]. 2006 [cited 24 July 2017]. Available from: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022006000200027&lng=en&nrm=iso](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200027&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 02 mai. 2017.*

LAMOUNIER, Wagner Moura; FILHO, Mário Ferreira Campos; BRESSAN, Aureliano Angel. Análise do trade-off na produção de açúcar e álcool nas usinas da região Centro-Sul do Brasil. XLIV CONGRESSO DA SOBER “Questões Agrárias, Educação no Campo e Desenvolvimento, 2006, Fortaleza, CE. <<https://ageconsearch.umn.edu/bitstream/147839/2/513.pdf>> Acesso em 10 jun. 2017.

MATEUS, Liliana Adriana Nappi. Análise dos aspectos energéticos do setor sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais. 2010. - Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2010. (Dissertação de Mestrado).

MANOCHIO, Carolina. A Integração energética da produção de biogás em biorrefinarias de cana-de-açúcar integradas de 1ª e 2ª geração. Poços de Caldas: Universidade Federal de Alfenas – Campus Poços de Caldas, 2015. (Tese de Mestrado). Disponível em: <[https://www.unifal-mg.edu.br/ppgcea/files/file/disserta%C3%A7%C3%B5es/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Carolina\\_Final.pdf](https://www.unifal-mg.edu.br/ppgcea/files/file/disserta%C3%A7%C3%B5es/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Carolina_Final.pdf)>. Acessado em 15 ago 2017.

MENDONÇA, Maria Luisa; PITTA, Fábio T; XAVIER, Carlos Vinícius. A agroindústria canieira e a crise econômica mundial. 1. ed.Sao Paulo: Outras Expressões, 2012. v. 1.

MORAES, Bruna S. Morais; ZAIAT, Marcelo; BONOMI, Antônio. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 44, p. 888–903, 2015.

MORAES, Bruna S. Morais; JUNQUEIRA, Tássia L.; PAVARELLO, Lucas G.; CAVALETTI, Otávio; BONOMI, Antônio; ZAIAT, Marcelo. "Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense?." Applied Energy 113 (2014): 825-835.

PINTO, Cláudio Piazza. Tecnologia da Disetão Anaeróbica da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável. 1999. – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1999. (Dissertação de Mestrado).

PREVITALI, Fabiane Santana; FAGIANI Cílon César. Trabalho e reestruturação produtiva no meio rural brasileiro: um estudo sobre o setor agroindustrial. Recife. 35º Encontro Anual da ANPOCS GT20, Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ciências Sociais, 2011. Disponível: <[http://portal.anpocs.org/portal/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=184&Itemid=217#](http://portal.anpocs.org/portal/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=184&Itemid=217#)>. Acesso em 07 de out. 2016.

Portal Brasil. Conferência do Clima: Com proposta mais ambiciosa, Brasil chega à COP21 como importante negociador do clima. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/editoria/meio-ambiente/2015/11/com-proposta-mais-ambiciosa-Brasil-chega-a-COP21-como-importante-negociador-mundial-do-clima>> Acesso em 05 fev. 2016.

REIS SILVA, Matheus Ribeiro dos. Quantificação da produção de açúcar, álcool e energia excedente em uma usina sucroalcooleira através da ferramenta Quantifica/ Matheus Ribeiro dos Reis Silva - Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2013.

RICO, Julieta A. Puerto; MERCEDES, Sônia S. P.; SAUER, Ildo L. Genesis and consolidation of the Brazilian bioethanol: A review of policies and incentive mechanisms Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, p. 1974–1887, 2010.

ROSSETTO, Raffaella. Planejamento da Colheita. Agência de Informação Embrapa. Cana-de-Açúcar. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_97\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_97_22122006154841.html)>. Acesso em: 04 mar. 2018.

SALOMON, Karina Ribeiro. Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, Faculdade de engenharia Mecânica, 2007 (Tese de Doutorado).

SALOMON, Karina Ribeiro. Avaliação tecnico-economica da biodigestão anaeróbia das vinhaças. Universidade de São Paulo. Trabalho apresentado no II GERA: Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindústria Sucroalcooleira. Pirassununga: [s.n.], 2007.

SANTOS, Fernando; BORÉM, Aluizio; CALDAS, Celso. CANA-DE-AÇÚCAR Bioenergia, Açúcar e etanol - Tecnologias e Perspectivas, 2ª ed. Viçosa, 2012. p. 379-536.

SEABRA, Joaquim Eugênio Abel. Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2008 (Tese de Doutorado).

Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerias [SEAPA]. - Projeções do Agronegócios – Minas Gerias 2017 a 2027 Projeções de Longo Prazo, 3ª Edição. Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <[http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq\\_Relatorios/Publicacoes/projecoes\\_2017\\_a\\_2027.pdf](http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Publicacoes/projecoes_2017_a_2027.pdf)>. Acesso em: 08 dezembro 2018.

SHIKIDA, Pery Francisco Assis; GUILHOTO, Joaquim. Um panorama das indústrias do açúcar e do álcool em 1980: Minas Gerais e Brasil comparados. Revista de Economia e Sociologia Rural, Brasília, v.34, n.1/2, p.253-284, jan./jun. 1996.

SHIKIDA, Pery Francisco Assis; BACHA, Carlos José Caetano. Evolução da agroindústria canavieira brasileira de 1975 a 1995. Revista Brasileira de Economia, Rio de Janeiro, v. 53, n.1, p. 69-89, jan/mar.1999.

SILVA, Cláudio Alexandre Batista Velso e. Limpeza e purificação de Biogás. 2009. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2009. (Dissertação de Mestrado).

SILVEIRA, Evanildo. Vinhaça para gerar energia. Revista Pesquisa FAPESP, São Paulo, ed. 238, p.68-71, dez.2015.

SIQUEIRA, Paulo Henrique de Lima. Análise das estratégias de crescimento e de localização da agroindústria canavieira no Brasil e suas externalidades. 2013. Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2013. (Tese de Doutorado).

SIQUEIRA, Paulo Henrique de Lima; CASTRO JUNIOR, Luiz Gonzaga de. Determinantes da Localização da Agroindústria Canavieira nos Municípios de Minas Gerais. 2013. RESR, Piracicaba-SP, Vol. 51, Nº 2, p. 309-330, Abr/Jun 2013 – Impressa em Julho de 2013.

SIQUEIRA, Paulo Henrique de Lima. Determinantes da competitividade da agroindústria processadora de cana-de-açúcar das regiões do Triângulo Mineiro e Alto do Paranaíba. 2004. Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2004. (Tese "Magister Scientiae")



SOUZA, Andrêza Gomes de; JÚNIOR, João Cleps. O Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro no Triângulo Mineiro e seus efeitos sobre a Produção de Alimentos e Trabalho Rural, V Encontro Nacional de Grupos de Pesquisa: "agricultura, desenvolvimento e transformações socioespaciais", 25, 26 e 27 de novembro de 2009, UFSM, Santa Maria, Minas Gerais, 2009.

SOUZA, Gustavo Ferreira de. Avaliação Termodinâmica e Econômica de Alternativas de Diversificação da Produção no Setor Sucroalcooleiro Brasileiro. 2013. – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 2013. (Dissertação de Mestrado)

SZYMANSKI, Mariani Silva Ester; BALBINOT, Rafaelo; NAGEL, Waldir. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono - estudo de caso. Revista Semina: Ciências agrárias, v. 31, n. 4, p. 901-912, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2010v31n4p901>>. Acesso em 10 fev 2017.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR [UNICA]. ÚNICA celebra acordo para o clima na COP21. São Paulo. 2015. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/22757742920320153336/unica-celebra-acordo-para-o-clima-na-cop21/>>. Acesso em 10 dez. 2016.

VIDAL, Maria de Fátima; SANTOS José A. N.; SANTOS, Marcos Antônio; SILVA, Pedro S. C.; VALLE, Pedro W. P. A. SETOR SUCROALCOOLEIRO NO NORDESTE BRASILEIRO: ESTRUTURAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA, Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, Fortaleza, Julho 2006. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cadeia\\_produtiva\\_cana\\_Nordeste\\_000fizv2wfh02wyiv802hvm3jme55p60.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cadeia_produtiva_cana_Nordeste_000fizv2wfh02wyiv802hvm3jme55p60.pdf)>. Acesso em: 08 set. 2016.

WILKINSON, John. O setor sucroalcooleiro brasileiro na atual conjuntura nacional e internacional, 2015, ActionAid. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/21752512-O-setor-sucroalcooleiro-brasileiro-na-atual-conjuntura-nacional-e-internacional-john-wilkinson.html>>. Acesso em 04 abr. 2017.

ZAGO, E. A. Métodos Analíticos para o Controle da Produção de Álcool e Açúcar – 2ª Edição - FERMENTEC – CENTRO DE BIOTECNOLOGIA AGRÍCOLA – ESALQ/USP– Piracicaba, 1996.

## APÊNDICE 1

### Cálculos e parâmetros de entrada

<b>VED = (TD x MIX) x TPE</b>		
Parâmetro	Valor	Descrição
TD		Capacidade de moagem de cana t/dia (licenciado pela SEMAD)
Cana para Etanol		% de etanol produzido pelo MIX
Cana para Açúcar		% de açúcar produzido pelo MIX
TPE		Taxa de produção de etanol produzido (litro) por Ton de cana (cálculo CONAB)
VED		Volume de produção de etanol m <sup>3</sup> /dia
VEM		Volume de produção de etanol m <sup>3</sup> /mês
VES		Volume de produção de etanol m <sup>3</sup> /safra
<b>VVG = VED x TPV</b>		
Parâmetro	Valor	Descrição
VVG		Volume de vinhaça gerada (11,5 m <sup>3</sup> de vinhaça/m <sup>3</sup> de álcool) em m <sup>3</sup> /dia
TPV	11,5	Taxa de produção de m <sup>3</sup> de vinhaça por m <sup>3</sup> de etanol produzido (Elina Neto, 2016)
<b>CO = VVG X DQO</b>		
Parâmetro	Valor	Descrição
CO		Carga orgânica (kg.DQO/dia)
DQO	40.000	40.000mg/l (Lamo, 1991)
<b>PB = CO X E X F</b>		
Parâmetro	Valor	Descrição
PB		Produção de Biogás pela biodigestão anaeróbica em Nm <sup>3</sup> /dia
E	0,7	Eficiência de remoção de DQO do processo, considerado de 70%
F	0,45	Fator de conversão de biogás por DQO removido, considerado 0,45 m <sup>3</sup> /kg
<b>GEB = PB X PCIB</b>		
Parâmetro	Valor	Descrição
GEB		Quantidade de energia do biogás em kcal/dia
PCIB	5.100	Poder calorífico inferior do biogás, considerado 5.100 kcal/Nm <sup>3</sup> (Lamo,1991)
<b>PEEB = GEB X E1</b>		
Parâmetro	Valor	Descrição
PEEB		Quantidade de energia elétrica produzida pela combustão do biogás em kWh/dia
E1	0,35	Eficiência da turbina a gás, considerada 35% (Lamo, 1991)
FC	0,001163	Fator de conversão kWh/kcal

Entrada de dados
  Resultados

Fonte: Elaboração própria

Terminologia	Descrição
VED	Volume de produção de etanol em m <sup>3</sup> /dia
TD	Capacidade de moagem de cana em t/dia (licenciado pela SEMAD)
Mix	Percentual de etanol que será produzido
TEP	Taxa de produção de etanol produzido (litro/Ton de cana), cálculo Conab
VVG	Volume de Vinhaça Gerada em m <sup>3</sup> /dia
TPV	Taxa de produção de m <sup>3</sup> de vinhaça por m <sup>3</sup> de etanol produzido (considerado 11,5 li
CO	Carga orgânica (kg.DQO/dia)
DQO	Demanda Bioquímica de Oxigênio em mg/l. (considerado 40.000 mg/l)
PB	Produção de biogás em Nm <sup>3</sup> /dia (N é unidade de vazão Normal Metro Cúbico por Hd
E	Eficiência (percentual) de remoção de DQO do processo (considerado 70%)
F	Fator de conversão de biogás por DQO removido, considerado 0,45 N.m <sup>3</sup> /kg DQO re
GEB	Quantidade de energia do biogás em kcal/dia
PCIB	Poder calorífico inferior do biogás em kcal/Nm <sup>3</sup>
PEEB	Quantidade média de energia elétrica gerada a partir da combustão do biogás em k
E1	Eficiência média da turbina a gás (considerada 35%)

## APÊNDICE 2

## Cálculos e parâmetros de entrada com volume de etanol já conhecido

VED= (VS/DS)		
Parâmetro	Valor	Descrição
VS		Volume de etanol produzido na safra em m <sup>3</sup>
DS		Dias safra
VED		Volume de produção de etanol m <sup>3</sup> /dia
VVG = VED x TPV		
Parâmetro	Valor	Descrição
VVG	-	Volume de vinhaça gerada (11,5 m <sup>3</sup> de vinhaça/m <sup>3</sup> de álcool) em m <sup>3</sup> /dia
TPV	11,5	Taxa de produção de m <sup>3</sup> de vinhaça por m <sup>3</sup> de etanol produzido (Elina Neto, 2016)
CO = VVG X DQO		
Parâmetro	Valor	Descrição
CO	-	Carga orgânica (kg.DQO/dia)
DQO	40.000	40.000mg/l (Lamo, 1991)
PB = CO X E X F		
Parâmetro	Valor	Descrição
PB		Produção de Biogás pela biodigestão anaeróbia em Nm <sup>3</sup> /dia
E	0,7	Eficiência de remoção de DQO do processo, considerado de 70%
F	0,45	Fator de conversão de biogás por DQO removido, considerado 0,45 m <sup>3</sup> /kg
GEB = PB X PCIB		
Parâmetro	Valor	Descrição
GEB	-	Quantidade de energia do biogás em kcal/dia
PCIB	5.100	Poder calorífico inferior do biogás, considerado 5.100 kcal/Nm <sup>3</sup> (Lamo,1991)
PEEB = GEB X E1		
Parâmetro	Valor	Descrição
PEEB	-	Quantidade de energia elétrica produzida pela combustão do biogás em KWh/dia
E1	0,35	Eficiência da turbina a gás, considerada 35% (Lamo, 1991)
FC	0,001163	Fator de conversão kWh/kcal

Entrada de dados     Resultados

Fonte: Elaboração própria

Terminologia	Descrição
VED	Volume de produção de etanol em m <sup>3</sup> /dia
TD	Capacidade de moagem de cana em t/dia (licenciado pela SEMAD)
Mix	Percentual de etanol que será produzido
TEP	Taxa de produção de etanol produzido (litro/Ton de cana), cálculo Conab
VVG	Volume de Vinhaça Gerada em m <sup>3</sup> /dia
TPV	Taxa de produção de m <sup>3</sup> de vinhaça por m <sup>3</sup> de etanol produzido (considerado 11,5 litro)
CO	Carga orgânica (kg.DQO/dia)
DQO	Demanda Bioquímica de Oxigênio em mg/l. (considerado 40.000 mg/l)
PB	Produção de biogás em Nm <sup>3</sup> /dia (N é unidade de vazão Normal Metro Cúbico por Hora)
E	Eficiência (percentual) de remoção de DQO do processo (considerado 70%)
F	Fator de conversão de biogás por DQO removido, considerado 0,45 N.m <sup>3</sup> /kg DQO removido
GEB	Quantidade de energia do biogás em kcal/dia
PCIB	Poder calorífico inferior do biogás em kcal/Nm <sup>3</sup>
PEEB	Quantidade média de energia elétrica gerada a partir da combustão do biogás em kWh/dia
E1	Eficiência média da turbina a gás (considerada 35%)

## ANEXO 1

## Relação das usinas licenciadas no estado de Minas Gerais/2007

	Razão social	Nº Processo COPAM	Equipamento para Moagem da cana	Capacidade Instalada de Moagem de Cana (t/d)
1	Agroindustrial Santa Juliana S/A	1047/2003	m oenda	22.500
2	Agropéu – Agroindustrial de Pompeu S/A	071/1981	m oenda	6.000
3	Alcana Destilária de Alcool de Nanaque S/A.	062/1983	m oenda	4.008
4	Cabrera Central Energética Açúcar e Alcool	10314/2006	difusor	12.000
5	Central Energética Paraíso S/A – Marcelo Pimenta	14465/2005	m oenda	2.073
6	Cia Agrícola Pontenovense	012/1979	m oenda	6.000
7	Cia Energética Vale do São Simão	4978/2007	m oenda	10.800
8	Cia Energética Vale do Tijuco Ltda.	2327/2007	m oenda	12.000
9	DAMFI – Destilária Antônio Monti Filho Ltda	6215/2004	m oenda	1.000
10	Destilária Alpha	018/1984	m oenda	1.200
11	Destilária Alvorada do Bebedouro S/A - Açúcar e Alcool	008/1981	m oenda	7.680
12	Destilária Atenas Ltda.	063/1985	m oenda	2.075
13	Destilária Cachoeira Ltda.	013/1985	m oenda	1.680
14	Destilária de Alcool Serra dos Aimorés S/A .	063/1983	m oenda	4.008
15	Destilária Junivan S/A	107/1981	m oenda	864
16	Destilária Rio do Cachimbo Ltda.	002/1980	m oenda	768
17	Destilária Vale do Paracatu Agroenergia Ltda.	10268/2006	m oenda	4.800
18	Destilária Veredas Indústria de Açúcar e Alcool Ltda.	383/2004	m oenda	3.600
19	Ituiutaba Bioenergia Ltda.	10201/2006	m oenda	12.000
20	Laginha Agro-industrial S/A - Triálcool	076/1980	m oenda	9.600
21	Laginha Agro-industrial S/A - Vale do Paranaíba	581/2001	m oenda	4.000
22	LDC Bioenergética.	009/1979	m oenda	14.400
23	Planalto Agroindutrial Ltda.	990/2003	m oenda	3.960
24	S/A Cameirinho Agroindustrial	1842/2006	m oenda	8.000
25	S/A Usina Coruripe Açúcar e Alcool - Campo Florido	178/2000	m oenda	22.500
26	S/A Usina Coruripe Açúcar e Alcool - Iturama	060/1983	m oenda	18.000
27	S/A Usina Coruripe Açúcar e Alcool - Limeira do Oeste	1650/2003	m oenda	9.000
28	SADA Bioenergia e Agricultura Ltda.	10397/2006	m oenda	8.000
29	Total Agroindústria Canaveira S/A	10336/2006	m oenda	9.120
30	USA Usina Santo Ângelo Ltda.	055/1985	m oenda	18.000
31	Usina Alvorada Açúcar e Alcool Ltda.	021/1981	m oenda	8.400
32	Usina Caeté S/A – Filial Delta	030/1980	m oenda	19.440
33	Usina Caeté S/A – Filial Volta Grande	201/1995	m oenda	20.400
34	Usina Cerradão Ltda.	10203/2006	m oenda	11.040
35	Usina Frutal Açúcar e Alcool S/A	14212/2005	difusor	10.500
36	Usina Itaquara de Açúcar e Alcool S/A	016/1981	m oenda	10.800
37	Usina Itapagipe Açúcar e Alcool Ltda.	1855/2003	m oenda	8.100
38	Usina Mendonça Agroindustrial e Comercial Ltda.	010/1979	m oenda	5.520
39	Usina Monte Alegre	017/1981	m oenda	6.000
40	Usina Senhora da Glória Ltda.	098/2005	m oenda	1.200
41	Usina Uberaba S/A	1962/2003	m oenda	8.000
42	Vale do Ivaí S/A - Açúcar e Alcool	022/1981	m oenda	3.120
43	WD Agroindustrial Ltda.	320/1996	m oenda	4.020
44	Central Energética de Veríssimo	3437/2006	m oenda	7.600
45	Bioenergética Vale do Paracatu S/A	10808/2007	m oenda	15.000
46	Campina Verde Bioenergia Ltda.	10202/2006	difusor	12.000
47	Crystalev Comércio e Responsabilidade Ltda.	3940/2006	difusor	11.280
48	Destilária R & M Ltda.	4036/2006	m oenda	1.680
49	Destilária Senhora do Bonfim	269/1998	m oenda	600
50	Destilária Visconde Ltda.	1739/2004	m oenda	840
51	Paulo Roberto Nascimento Filho	1114/2007	m oenda	3.000
52	Usina Araguari Ltda.	15925/2006	m oenda	12.000
53	Usina Zanin Açúcar e Alcool Ltda.	11508/2006	m oenda	6.000
54	Agroerg das Minas Gerais	18690/2007	m oenda	12.000
55	Agroindustrial Patos de Minas Ltda.	10575/2006	m oenda	3.000
56	Bioenergética Aroeira Ltda	11341/2007	difusor	3.000
57	Cia Energética de Açúcar e Alcool Triângulo Mineiro	10389/2006	m oenda	12.000
58	COCRED - Cooperativa de Crédito dos Plantadores de Cana de Sertãozinho	3347/2007	m oenda	1.800
59	Destilária Cristais Ltda	18016/2007	m oenda	550
60	FLE Empreendimentos Ltda	12914/2006	difusor	8.000
61	ICAL Energética Ltda	1467/2007	m oenda	12.000
62	Prata Agroindustrial Açúcar e Alcool	10894/2007	difusor	20.000
63	União de Minas Agroindustrial Açúcar e Alcol Ltda.	4778/2006	difusor	12.500
64	Usina Caeté S/A	4718/2006	m oenda	8.400
65	Usina de Açúcar e Alcool do Vale do Uruçuia Ltda.	14730/2006	m oenda	10.000
66	Usina Tupaciguara Ltda.	12616/2006	m oenda	6.700

Fonte: Adaptado de Mateus (2010)

## ANEXO 2

**Descrição das capacidades instaladas de produção de açúcar, etanol e cogeração das usinas em atividade em Minas Gerais/2017**

Razão social	Capacidade Instalada			
	Fabricação de açúcar (sacas/d)	Destilação de álcool (m³/d)	Cogeração de energia elétrica	
			kWh	MW
Agroindustrial Santa Juliana S/A	20.900	1.364	1.920.000	80,0
Agropéu – Agroindustrial de Pompeu S/A	*	520	168.000	7,0
Cabrera Central Energética Açúcar e Álcool	20.000	600	408.000	17,0
Cia Agrícola Pontenovense	10.000	240	129.600	5,4
Cia Energética Vale do Tijuco Ltda.	20.000	700	1.560.000	65,0
DAMFI – Destilaria Antônio Monti Filho Ltda	*	90	24.000	1,0
Destilaria Cachoeira Ltda.	*	110	19.200	0,8
Destilaria de Álcool Serra dos Aimorés S/A .	*	500	100.800	4,2
Destilaria Rio do Cachimbo Ltda.	*	90	48.000	2,0
Destilaria Vale do Paracatu Agroenergia Ltda.	*	400	672.000	28,0
Destilaria Veredas Indústria de Açúcar e Álcool Ltda.	*	500	86.400	3,6
Ituiutaba Bioenergia Ltda.	15.000	600	1.344.000	56,0
LDC Bioenergética.	30.000	1.000	1.080.000	45,0
S/A Carneirinho Agroindustrial	18.000	*	576.000	24,0
S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool - Campo Florido	50.000	950	1.440.000	60,0
S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool - Iturama	25.000	600	720.000	30,0
S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool - Limeira do Oeste	*	800	120.000	5,0
SADA Bioenergia e Agricultura Ltda.	*	824	192.000	8,0
Total Agroindústria Canaveira S/A	*	800	600.000	25,0
USA Usina Santo Ângelo Ltda.	30.000	380	240.000	10,0
Usina Alvorada Açúcar e Álcool Ltda.	12.500	400	81.600	3,4
Usina Caeté S/A – Filial Delta	40.000	600	768.000	32,0
Usina Caeté S/A – Filial Volta Grande	26.000	1.000	1.296.000	54,0
Usina Cerradão Ltda.	25.000	600	600.000	25,0
Usina Frutal Açúcar e Álcool S/A	15.000	500	360.000	15,0
Usina Itaquara de Açúcar e Álcool S/A	20.000	350	240.000	10,0
Usina Itapagipe Açúcar e Álcool Ltda.	12.000	400	1.104.000	46,0
Usina Mendonça Agroindustrial e Comercial Ltda.	12.000	*	57.600	2,4
Usina Monte Alegre	8.500	163	384.000	16,0
Usina Uberaba S/A	*	700	288.000	12,0
WD Agroindustrial Ltda.	7.500	400	168.000	7,0
Bioenergética Vale do Paracatu S/A	*	1.000	1.920.000	80
Bioenergética Aroeira Ltda	*	260	240.000	10
Usina Tupaciguara Ltda.	9.375	262	720.000	30
<b>Total Geral - usinas ativas</b>	<b>426.775</b>	<b>17.702</b>	<b>19.675.200</b>	<b>819,8</b>
<b>Total Cogeração das usinas que produzem etanol</b>			<b>19.041.600</b>	<b>793,4</b>

Obs.: kWh calculado considerando Fator de Carga 100%

(\*) Unidade não fabrica este produto

Fonte: Adaptado de Mateus (2010)

## ANEXO 3

**Descrição das capacidades de moagem instaladas das usinas em atividade em  
Minas Gerais/2017**

<b>Razão social</b>	<b>Capacidade Instalada de Moagem de Cana (t/d)</b>
Agroindustrial Santa Juliana S/A	22.500
Agropéu – Agroindustrial de Pompeu S/A	6.000
Cabrera Central Energética Açúcar e Álcool	12.000
Cia Agrícola Pontenovense	6.000
Cia Energética Vale do Tijuco Ltda.	12.000
DAMFI – Destilaria Antônio Monti Filho Ltda	1.000
Destilaria Cachoeira Ltda.	1.680
Destilaria de Álcool Serra dos Aimorés S/A.	4.008
Destilaria Rio do Cachimbo Ltda.	768
Destilaria Vale do Paracatu Agroenergia Ltda.	4.800
Destilaria Veredas Indústria de Açúcar e Álcool Ltda.	3.600
Ituiutaba Bioenergia Ltda.	12.000
LDC Bioenergética.	14.400
Planalto Agroindustrial Ltda.	3.960
S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool - Campo Florido	22.500
S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool - Iturama	18.000
S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool - Limeira do Oeste	9.000
SADA Bioenergia e Agricultura Ltda.	8.000
Total Agroindústria Canaveira S/A	9.120
USA Usina Santo Ângelo Ltda.	18.000
Usina Alvorada Açúcar e Álcool Ltda.	8.400
Usina Caeté S/A – Filial Delta	19.440
Usina Caeté S/A – Filial Volta Grande	20.400
Usina Cerradão Ltda.	11.040
Usina Frutal Açúcar e Álcool S/A	10.500
Usina Itaiquara de Açúcar e Álcool S/A	10.800
Usina Itapagipe Açúcar e Álcool Ltda.	8.100
Usina Monte Alegre	6.000
Usina Uberaba S/A	8.000
WD Agroindustrial Ltda.	4.020
Bioenergética Vale do Paracatu S/A	15.000
Bioenergética Aroeira Ltda	3.000
Usina Tupaciguara Ltda.	6.700
<b>Total</b>	<b>320.736</b>

Fonte: Adaptado de Mateus (2010)

## ANEXO 4

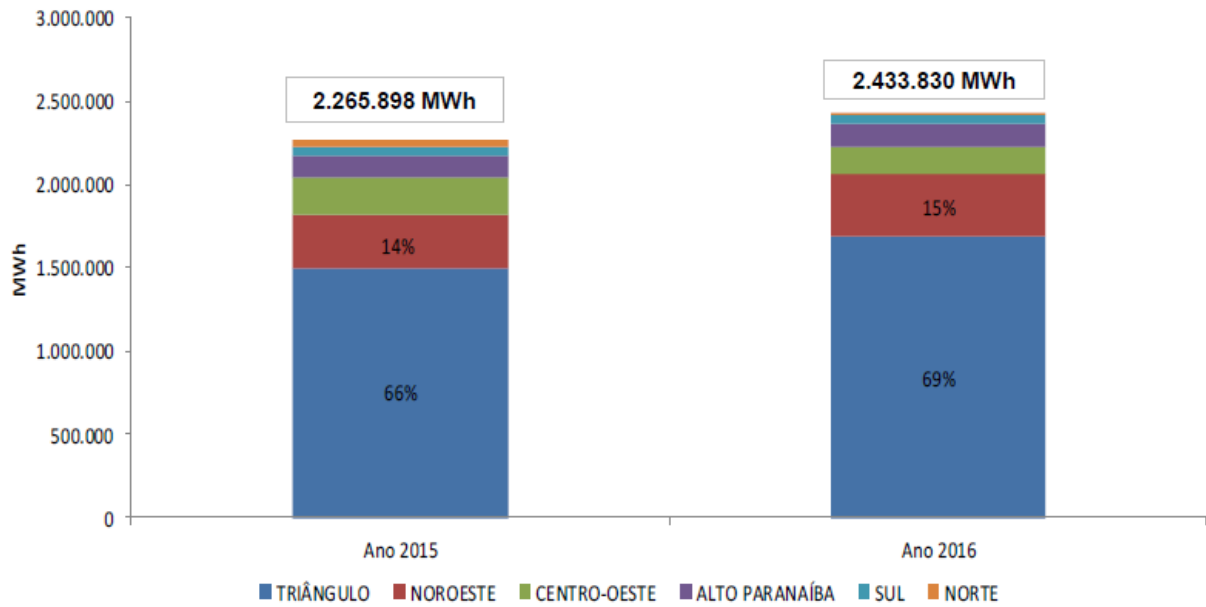
## Quadro comparativo das safras 2016/2017 de Minas Gerais

1ª ESTIMATIVA DE SAFRA			
MINAS GERAIS	SAFRA		%VARIACÃO
	2016/2017	2017/2018	
<b>MOAGEM DE CANA</b>			
CANA (toneladas)	63.505.105	61.000.000	-4%
<b>PRODUÇÃO</b>			
AÇÚCAR (toneladas)	3.980.924	4.110.000	3%
ETANOL ANIDRO (m3)	1.192.442	948.500	-20%
ETANOL HIDRATADO (m3)	1.448.008	1.386.000	-4%
ETANOL TOTAL (m3)	2.640.450	2.334.500	-12%
<b>QUALIDADE DA CANA</b>			
ATR (toneladas)	8.690.805	8.295.636	-5%
ATR / TC	136,85	135,99	-1%
Litros de etanol / tonelada de cana	42	38	-8%
Quilos de açúcar / tonelada de cana	63	67	7%
<b>MIX DE PRODUÇÃO</b>			
% de cana para açúcar	48%	52%	
% de cana para anidro	24%	20%	
% de cana para hidratado	28%	28%	

Fonte: SIAMIG, 2017

## ANEXO 5

## Quadro comparativo da produção de bioeletricidade das safras 2015 e 2016 por região de Minas Gerais



Fonte: SIAMIG, 2017