

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
UNIVERSIDADE ABERTA DO BRASIL  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
APLICADA AOS PROCESSOS PRODUTIVOS

**Milena Yuri Hilahata Cruz**

**ANÁLISE ENERGÉTICA E ECONÔMICA DO POTENCIAL DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO BIOGÁS PROVENIENTE DA  
VINHAÇA: ESTUDO DE CASO**

Foz do Iguaçu, PR  
2017

**Milena Yuri Hilahata Cruz**

**Análise energética e econômica do potencial de geração de energia elétrica do biogás proveniente da vinhaça: estudo de caso**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos (EaD), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial da obtenção do título de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos.**

Orientador: Prof. Dr. Cesar Addis Valverde Salvador

Foz do Iguaçu, PR  
2017

**Milena Yuri Hilahata Cruz**

**ANÁLISE ENERGÉTICA E ECONÔMICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO  
DE ENERGIA ELÉTRICA DO BIOGÁS PROVENIENTE DA VINHAÇA: ESTUDO  
DE CASO**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos (EaD), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial da obtenção do título de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos.**

**Aprovado em 14 de julho de 2017:**

---

**Geomar Machado Martins, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Co-Orientador)

---

**Natanael Rodrigues Gomes, Dr. (UFSM)**

---

**José Abílio Lima de Freitas, Me. (UFSM)**

Foz do Iguaçu, PR  
2017

## **AGRADECIMENTOS**

*A concretização deste trabalho ocorreu, principalmente, pelo auxílio, compreensão e dedicação de várias pessoas. Agradeço a todos que, de alguma forma contribuíram para a conclusão deste estudo e, de uma maneira especial, agradeço:*

- Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.*
- Aos amigos de curso e de viagem, Mateus, Juliana e Gabriel que compartilharam as alegrias e dificuldades encontradas durante todo o curso.*
- Ao amigo e colega de profissão Luiz Paulo que auxiliou e deu todo o apoio para a realização deste trabalho.*

*Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos aqueles de alguma forma participaram para que este trabalho fosse possível.*

## RESUMO

### ANÁLISE ENERGÉTICA E ECONÔMICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO BIOGÁS PROVENIENTE DA VINHAÇA: ESTUDO DE CASO

AUTORA: Milena Yuri Hilahata Cruz  
ORIENTADOR: Cesar Addis Valverde Salvador

A indústria sucroenergética é marcada pela grande geração de resíduos que podem ser utilizados como fontes limpas e renováveis de energia. A vinhaça, principal resíduo da produção de álcool, possui em sua composição características altamente nutritivas, e ao mesmo tempo, poluentes. Por meio do processo de biodigestão anaeróbia é possível diminuir estas características poluentes e concomitantemente, obter um biogás rico em metano, com alto potencial energético. Apesar da atual crise no setor sucroenergético, onde diversas usinas sofrem com enormes dívidas financeiras, o investimento nessa tecnologia pode vir a reestruturar o setor em decorrência dos ganhos econômicos. Para auxiliar o investimento, a iniciativa deve estar vinculada aos incentivos e políticas públicas, pois o setor é de suma importância em três segmentos para o Brasil: ambiental, social e econômico. Este trabalho faz a avaliação da implantação desta tecnologia em uma usina sucroenergética da região de Dourados, no estado de Mato Grosso do Sul. Através da análise energética, constatou-se que a usina em questão é capaz de gerar 26% de toda a energia elétrica consumida, por meio do aproveitamento do biogás da vinhaça. A análise econômica confirma a viabilidade do projeto, resultando em um retorno positivo para comercialização de energia elétrica, mesmo com a grande instabilidade do mercado no último ano, e os altos tributos incididos na venda. Uma segunda análise é realizada com a isenção de ICMS, resultando em um retorno quase quatro vezes maior, considerando o valor médio de mercado. Assim, reforça-se a importância de incentivos governamentais para o aproveitamento eficiente de energia na indústria sucroenergética.

**Palavras-chave:** Vinhaça. Bioenergia. Cana-de-açúcar.

## **ABSTRACT**

### **ENERGETIC AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE POTENTIAL ELETRIC POWER GENERATION FROM VINASSE BIOGAS: A CASE STUDY.**

AUTHOR: Milena Yuri Hilahata Cruz  
ADVISOR: Cesar Addis Valverde Salvador

The sugarcane industry is marked by the large generation of waste that can be used as clean and renewable sources of energy. Stillage, the main waste of alcohol production, contains in its composition highly nutritious characteristics, and at the same time, pollutants. Through the process of anaerobic biodigestion it is possible to reduce these pollutant characteristics and at the same time, to obtain a biogas rich in methane, with high energetic potential. Despite the current crisis in the sugarcane sector, where several plants suffer from huge financial debts, investment in this technology may restructure the sector as a result of economic earning. To support the investment, the initiative must be linked to incentives and public policies, because the sector is extreme important in three segments for Brazil: environmental, social and economic. This work evaluates the implantation of this technology in a sugarcane plant in the region of Dourados, state of Mato Grosso do Sul. Through the energy analysis, it was verified that the plant in question is capable of generating 26% of all electric energy consumed, using the biogas from stillage. The economic analysis validates the feasibility of the project, resulting in a positive return for electric energy commercialization, even with the great instability of the market in the last year, and the high taxes from the sale. A second analysis is performed with the exemption of ICMS, resulting in a return almost five times higher, considering the market average value. Thus, the importance of governmental incentives for the efficient use of energy in the sugarcane industry is reinforced.

**Keywords:** Vinasse. Bioenergy. Sugarcane.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Matriz de energia elétrica brasileira. ....	12
Figura 2 - Fontes de biomassa da matriz de energia elétrica brasileira. ....	12
Figura 3 - Mapa da Bioenergia do Estado do Mato Grosso do Sul. ....	18
Figura 4 - Produção das sucroenergéticas do Mato Grosso do Sul (Safra 2016/2017) .....	19
Figura 5 - Fluxograma do processo de produção da vinhaça nas usinas sucroenergéticas. ....	21
Figura 6 - Estimativa da produção média de vinhaça na região Centro-Sul do país. ....	22
Figura 7 - Características físico-químicas da vinhaça. ....	23
Figura 8 - Processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica. ....	25
Figura 9 - Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos. ....	27
Figura 10 - Característica do funcionamento do reator UASB. ....	28
Figura 11 - Reator anaeróbico de circulação interna. ....	30
Figura 12 - Fluxograma do cenário atual. ....	33
Figura 13 – Fluxograma do cenário proposto. ....	34
Figura 14 - Gráfico de produção e consumo de energia elétrica (MWh) no período de Julho/2016 a Junho/2017. ....	48
Figura 15 - Fluxograma de conversões energéticas. ....	48
Figura 16 - Gráfico do cálculo do VPL (R\$) considerando os valores de venda de energia elétrica no PLD no período de Julho/2016 a Junho/2017. ....	53
Figura 17 - Gráfico do cálculo do VPL considerando os valores de venda de energia elétrica no PLD no período de Julho/2016 a Junho/2017 com isenção do ICMS. ....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempo de detenção hidráulica em reatores UASB.....	35
Tabela 2 - Características da Vinhaça produzida na Usina.....	41
Tabela 3 - Características de Produção Anual de Julho/2016 a Junho/2017.....	42
Tabela 4 - Parâmetros de dimensionamento do reator.....	42
Tabela 5 - Dimensionamento e características do reator obtidos por meio das equações 1, 2, 3, 4 e 5. ....	43
Tabela 6 - Produção de vinhaça do período de Julho/2016 a Junho/2017. ....	44
Tabela 7 - Produção de metano do período de Julho/2016 a Junho/2017.....	45
Tabela 8 - Produção de Biogás do período de Julho/2016 a Junho/2017.....	46
Tabela 9 - Potência Instalada do sistema de geração de energia elétrica. ....	47
Tabela 10 - Produção de energia elétrica do período de Julho/2016 a Junho/2017.....	47
Tabela 11 - Custos de Investimento do projeto.....	50
Tabela 12 – Custos de Operação e Manutenção considerados.....	50
Tabela 13 - Valores de venda do MWh no PLD para os meses do período considerado de Julho/2016 a Junho/2017.....	51
Tabela 14 - VPL para as médias mensais de venda de energia elétrica no PLD para o período considerado de Julho/2016 a Junho/2017.....	52
Tabela 15 - VPL para as médias mensais de venda de energia elétrica no PLD para o período de Julho/2016 a Junho/2017 com isenção do ICMS.....	54
Tabela 16 - Taxa interna de retorno obtidas na análise.....	55



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACR	Ambiente de Contratação Regulado
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
BEN	Balçoço Energético Nacional
BIOSUL	Associação de Produtores de Bioenergia de Mato Grosso do Sul)
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
COP	<i>Conference of the Parties</i>
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FGV	Fundação Getúlio Vargas
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IGP-M	Índice de Geral de Preços do Mercado
PCI	Poder Calorífico Inferior
PIS	Programa de Integração Social
PROALCOOL	Programa Nacional do Álcool
PROBIODIESEL	Programa Nacional de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SP	São Paulo
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
VPL	Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.2	<b>Objetivos Gerais</b>	11
1.1.3	<b>Objetivos Específicos</b>	11
1.2	JUSTIFICATIVA	11
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	15
2.1	A INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR	15
2.1.2	<b>A indústria sucroenergética no Mato Grosso do Sul</b>	17
2.1.3	<b>Crise no setor</b>	19
2.1.4	<b>Perspectivas energéticas</b>	20
2.2	VINHAÇA	20
2.2.1	<b>Características da vinhaça</b>	22
2.2.2	<b>Fertirrigação da vinhaça</b>	24
2.3	BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA	24
2.3.1	<b>O Biogás</b>	26
2.3.2	<b>Tipos de Reatores</b>	27
2.4	O MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	32
3.2	CENÁRIO ATUAL	32
3.3	CENÁRIO PROPOSTO	33
3.4	ANÁLISE ENERGÉTICA	34
3.4.1	<b>Dimensionamento do sistema de digestão anaeróbia</b>	34
3.4.2	<b>Produção de biogás</b>	36
3.4.3	<b>Geração de energia elétrica</b>	38
3.5	ANÁLISE ECONÔMICA	38
3.5.1	<b>Valor presente líquido – VPL</b>	39
3.5.2	<b>Taxa interna de retorno – TIR</b>	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	41
4.2	ANÁLISE ENERGÉTICA	41
4.2.1	<b>Características da produção de Vinhaça</b>	41
4.3	ANÁLISE ECONÔMICA	49
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	56
	REFERÊNCIAS	59
	ANEXO A – MEMORIAL DE CÁLCULO	62

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm sido um assunto de grande importância e preocupação em todo o mundo. A conferência das Partes (COP 21 – *Conference of the Parties*), no final do ano de 2015, foi o último grande e ambicioso acordo entre nações em relação ao destino ambiental do planeta. Aliado a isso, está o crescente aumento do consumo de energia global, colocando em foco o grande desafio que é a geração de energia com baixa emissão de carbono (MARCOVITCH, 2016). Para a mitigação destas mudanças, cada vez mais os países e governos desenvolvem programas e incentivos para o desenvolvimento de energias mais limpas.

Desde o ano de 1975, foram introduzidas diversas políticas públicas a fim de estimular o consumo e produção de bioenergia em larga escala, tornando o Brasil em um dos países pioneiros em desenvolvimento de incentivos. Dentre os principais programas, é possível citar o PROÁLCOOL (Programa Nacional do Álcool), PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) e PROBIODIESEL (Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel), todos desenvolvidos pelo governo brasileiro, que tiveram como consequência o aumento da participação da biomassa na matriz energética brasileira e a significativa redução de emissão de gases poluentes no decorrer dos anos (POVEDA, 2014).

A matriz energética brasileira é predominantemente hídrica, e a utilização da biomassa sempre esteve presente na busca de novas fontes alternativas de energia. Atualmente, com a importância econômica, energética e social que tem o setor sucroalcooleiro em todo o país, a atenção volta-se ao potencial deste grande setor. Pesquisadores da área apontam que o Brasil é um “plantador de energia”, pois possui clima, solo e áreas para cultivo de cana-de-açúcar. Além disso, o período de safra e de geração de insumos energéticos da indústria coincide com os períodos mais secos do ano, complementando assim, a energia hídrica (UNICA, 2016).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.2 Objetivos Gerais

Este trabalho visa a busca da utilização de uma fonte de energia alternativa, para aumentar a eficiência energética em uma usina sucroenergética da região da cidade de Dourados - Mato Grosso do Sul, através do aproveitamento de um resíduo, também considerado subproduto da indústria: a vinhaça.

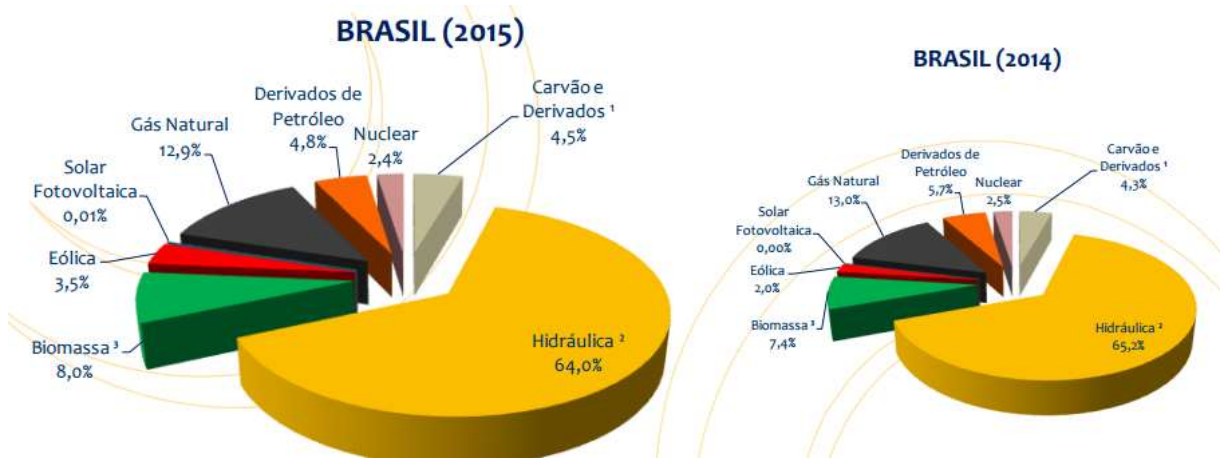
### 1.1.3 Objetivos Específicos

Por meio de análise energética, pretende-se: dimensionar o sistema de biodigestão anaeróbia; quantificar o potencial de produção de biogás da usina; e quantificar o potencial de produção de energia elétrica; por fim, analisar a viabilidade econômica do investimento para o aproveitamento da vinhaça como fonte de geração de energia elétrica, para a venda e exportação para o SIN (Sistema Interligado Internacional).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com o relatório elaborado pelo BEN (Balanço Energético Nacional) de 2016, com ano base 2015 (BEN, 2016), a oferta interna de energia elétrica é composta por 75,5% de energias renováveis, dos quais 64% provêm da energia hídrica, observados na figura 1. Nota-se que a energia hídrica é a principal fonte da matriz de energia elétrica brasileira, mas que nos últimos anos apresentou uma queda significativa na produção, decorrente da crise hídrica que afetou os reservatórios no país. A crise não só aumentou o custo de geração de energia elétrica para o consumidor, mas também mostrou que o país não pode depender de apenas uma fonte de energia com o grande aumento de consumo, que se torna evidente a cada ano.

Figura 1 – Matriz de energia elétrica brasileira.



Fonte: (BEN, 2016).

A produção de energia elétrica proveniente da fonte hídrica sofreu uma queda de 3,7% em relação ao ano anterior (2014), enquanto a proveniente da biomassa sofreu um aumento de 5,4% no mesmo período.

Quando segmentamos a biomassa, podemos observar a importância do setor sucroenergético, pois 75,91% de toda potência instalada da bioeletricidade do país é oriunda da biomassa da cana de açúcar como mostra a figura 2.

Figura 2 - Fontes de biomassa da matriz de energia elétrica brasileira.

Fontes de biomassa utilizadas no Brasil - Fase: Operação		
Origem	Potência Outorgada (MW)	%
<b>Biomassa da Cana de Açúcar</b>	<b>11.135</b>	<b>75,91</b>
Casca de Arroz	45	0,31
Biogás-AGR	2	0,01
Capim Elefante	66	0,45
Floresta	3.294	22,45
Resíduos sólidos urbanos	120	0,82
Resíduos animais	2	0,01
Biocombustíveis líquidos	5	0,03
<b>Total</b>	<b>14.669</b>	<b>100</b>

Fonte: (UNICA, 2017).

A indústria da cana-de-açúcar tem durante todo o seu processo industrial, grande quantidade de geração de resíduos como o bagaço, a palha, a vinhaça, dentre outros. Um dos principais desafios é o aumento da eficiência energética do setor, com o melhor aproveitamento desses resíduos na própria linha de produção. Atualmente, o bagaço e a palha da cana-de-açúcar são amplamente utilizados para a geração de energia térmica e/ou elétrica, consumidos dentro da indústria. A produção de energia tornou-se abundante, sendo que de acordo com UNICA (2017), desde 2013 as usinas estão gerando mais energia para o SIN do que para o consumo das próprias unidades fabris, resultando em uma relação 60% e 40% respectivamente. A energia elétrica é considerada, hoje, como o terceiro produto (além do açúcar e álcool) desta indústria, que modificou a terminologia das usinas, substituindo o termo “sucroalcooleiras” para “sucroenergéticas”.

Segundo Lamo (1991), para cada litro de etanol produzido, são gerados de 10 a 15 litros de vinhaça, destacando-se como um dos principais subprodutos desta indústria. A utilização da vinhaça como fonte de energia ainda é muito pouco aplicada. Seu principal destino são os campos como biofertilizante devido à sua rica composição de elementos como o nitrogênio, fósforo e potássio. Porém, o elevado teor de orgânicos faz com que a vinhaça tenha um significativo poder poluente quando despejado em sua forma *in natura* nos solos, devendo assim, ser tratada previamente. Em contrapartida, o elevado teor de orgânicos pode resultar em um biogás rico em metano, obtido por meio do processo de biogidestão anaeróbia. Assim, a vinhaça também pode ser uma importante matéria-prima, considerada como fonte de biomassa, para geração de energia renovável, por meio de um biogás com alto poder energético.

De acordo com a EPE (2016) - Empresa de Pesquisa Energética – dentre as metas estabelecidas no COP 21 a participação das fontes renováveis para geração de eletricidade, além da energia hidrelétrica, precisa aumentar de 9% em 2014, para 24% em 2030 conforme estabelecido no seguinte compromisso:

“Expandir o uso doméstico de fontes de energia não fóssil, aumentando a parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica para ao menos 23% até 2030, inclusive pelo aumento da participação de eólica, biomassa e solar.” (EPE, 2016, p. 14).

Dentre as metas brasileiras também está em pauta manter alta proporção de renováveis na matriz de combustíveis, dando enfoque ao aumento na produção de etanol, como pode ser observado a seguir:

“Aumento da oferta de etanol em 25 bilhões de litros: considera-se que o teor de anidro na Gasolina C será mantido em 27% por todo período de estudo. Como resultado o consumo de combustíveis no ciclo Otto apresenta aumento de participação do etanol total, que em 2014 era de 40%, alcançando 45%, em 2030.”

“Aumento da parcela de biocombustíveis avançados (segunda geração). Estima-se que a produção de etanol de primeira geração crescerá de 29 bilhões de litros em 2014 para 51 bilhões de litros em 2030, enquanto o etanol de segunda geração começará a aparecer em volumes consideráveis a partir de 2023, atingindo 2,5 bilhões de litros no final do período. Assim, o total de etanol disponível será de 54 bilhões de litros em 2030.” (EPE, 2016, p. 30).

Diante disso, nota-se o importante papel que o setor sucroenergético tem a desempenhar para o cumprimento dessas metas visando o desenvolvimento sustentável, e a grande oportunidade de recuperação estrutural e econômica da indústria da cana-de-açúcar, que hoje sofre com uma severa crise.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A chegada da cana-de-açúcar no Brasil foi datada do ano de 1532, trazida pelo colonizador português Martim Afonso de Souza, quem construiu o primeiro engenho brasileiro na cidade de São Vicente, no litoral do estado de São Paulo (UNICA, 2016). Dava-se início à primeira atividade econômica organizada no Brasil, que no decorrer dos anos se consolidou no país como grande produtor e exportador de açúcar, principal produto da indústria.

Segundo Machado (2003), em 1929 ocorreu uma crise no mercado de açúcar, quando o país perdeu o mercado externo e poderia sofrer com uma superprodução. O governo, por meio do decreto nº 19.717 (BRASIL, 1931), assinado em 1931 pelo então presidente Getúlio Vargas, estabelecia uma mistura de 5% de álcool nacional adicionados à gasolina importada. Nos automóveis que eram de propriedade ou que estavam a serviço da União, dos Estados e dos Municípios, a porcentagem estabelecida era de 10% de álcool. Este decreto também previa a isenção de impostos e de taxas de importação para o investimento em instrumentos e maquinários necessários para a fabricação e redestilação do álcool anidro, como forma de estimular as usinas na produção de álcool. Portanto, o álcool como combustível foi resultado de uma busca alternativa para a crise econômica açucareira.

No ano de 1973, deu-se início à crise do petróleo, ocasionada por conflitos no Oriente Médio, afetando significativamente a economia do país que era extremamente dependente da importação desta matéria-prima. A crise afetou todo o mercado mundial, elevando os preços a taxas de 300% em pouco mais de cinco meses, entre outubro de 1973 e março de 1974. Em apenas um ano, o gasto do Brasil com importação de petróleo quadruplicou, subindo de US\$ 600 milhões para US\$ 2,5 bilhões em 1974 (UNICA, 2016).

A alternativa mais eficaz para esta crise foi a implementação do PROALCOOL – Programa Nacional do Álcool - instituído pelo governo em 1975 com o principal objetivo de incentivar a substituição de combustíveis derivados do petróleo pelo etanol. Na primeira fase do programa, o objetivo era utilizar o etanol anidro como um aditivo à gasolina. Em decorrência da segunda crise do petróleo em 1979, notou-se a importância de reduzir a dependência que o país tinha em relação à importação de



petróleo. Assim, a segunda fase do programa foi marcada pelo desenvolvimento de tecnologias e fabricação de veículos movidos a etanol, por meio de subsídios do governo, redução de impostos sobre a venda e de licenciamento desses novos carros, além do preço competitivo à gasolina. Surgia, então, o novo modelo brasileiro de usina com a produção simultânea de açúcar e álcool com processos cada vez mais integrados (PIRES, 2014).

A partir de 1986, o etanol começou a sofrer com a crise econômica que afetava o país, quando os incentivos governamentais foram cessados. Além disso, a cotação internacional do açúcar estava em alta, fato que levou os produtores a darem preferência à produção e exportação de açúcar, acarretando em uma crise de abastecimento de etanol. Para finalizar, houve uma significativa queda nos preços do petróleo, dando espaço novamente para a gasolina, gerando um grande declínio das vendas dos automóveis movidos a etanol, de 85% em 1985 para 11% em 1990 (PEREIRA, 2014). Assim, o PROALCOOL foi extinto na década de 1990, mas foi de suma importância para o crescimento do setor sucroalcooleiro, mostrando o potencial energético do álcool como combustível e trazendo uma nova modelagem de usina para a indústria.

Em 1987, pela primeira vez no Brasil, foi assinado um contrato de venda de energia elétrica excedente da Usina São Francisco, localizada na cidade de Sertãozinho (SP), para a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). Em todo o processo da cana-de-açúcar, a demanda por energia térmica, mecânica e elétrica é muito alta. Por meio do sistema de cogeração (produção e utilização de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível) foi possível a comercialização da bioeletricidade através do bagaço, resíduo do processamento da cana-de-açúcar (UNICA, 2016).

Uma nova oportunidade para o etanol brasileiro começou no ano de 2003, com a introdução dos automóveis com motores bicomcombustíveis, movidos à gasolina, etanol hidratado ou qualquer mistura dos dois combustíveis. Com essa nova tecnologia, o consumidor poderia optar pelo combustível ao abastecer, e não no ato da compra do automóvel. Segundo dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores – ANFAVEA – (2017) após o lançamento, os carros bicomcombustíveis representavam 3,5% das vendas de veículos novos no país, passando para um percentual de 95% no ano de 2010.

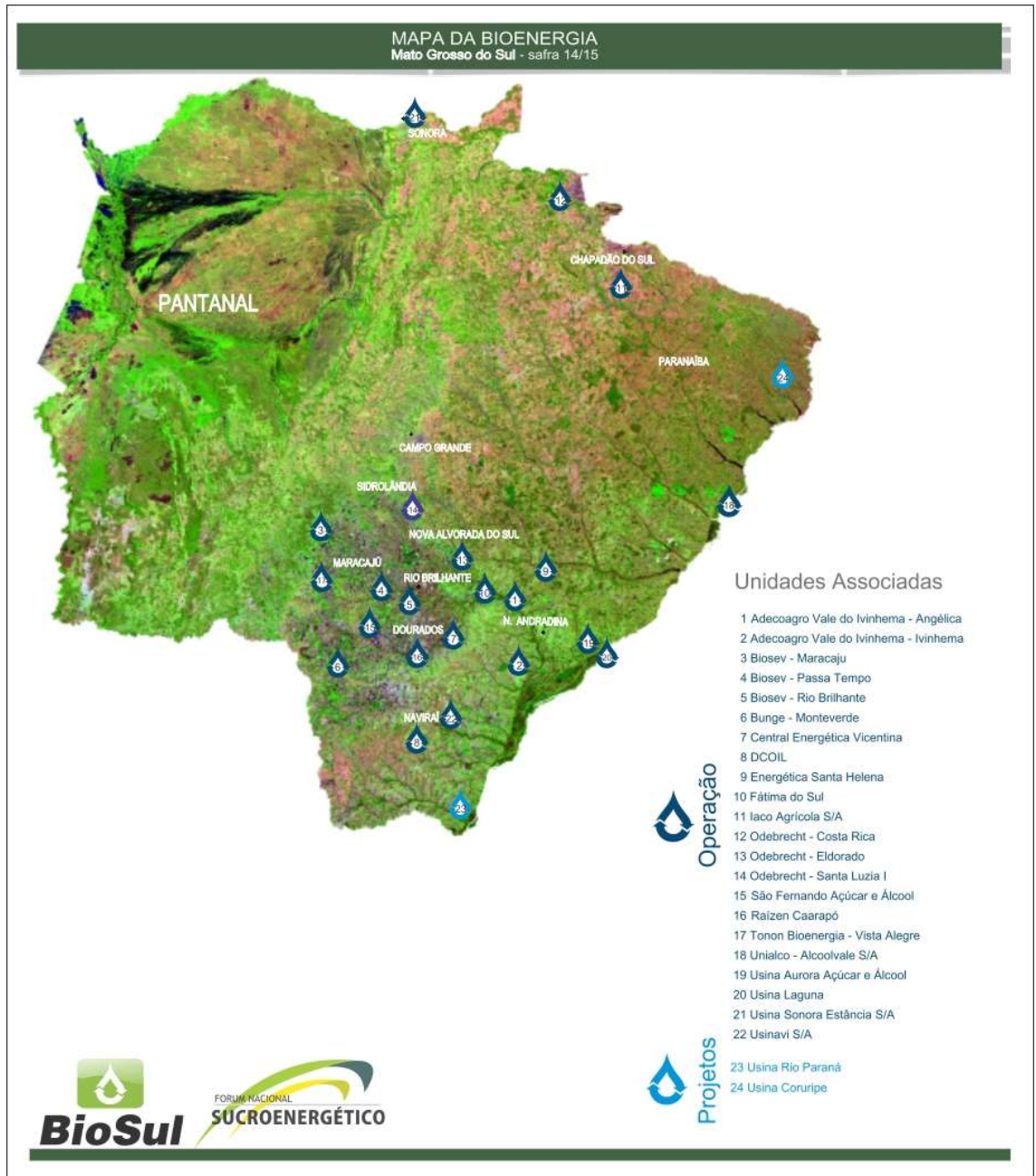
O álcool ganhou espaço não só no setor automobilístico. Em 2004, a Embraer lançou o primeiro avião do mundo movido à etanol, produzido em escala comercial. Além das vantagens econômicas e no desempenho do motor, os ganhos ambientais são significativos, com redução em 90% da emissão de CO<sub>2</sub>. Já em 2011, foi a vez da inserção da frota de ônibus movidos à etanol, pela primeira vez, na cidade de São Paulo (UNICA, 2016).

Com o aquecimento do mercado de etanol aliado à programas e incentivos fiscais do governo, diversos grupos começaram a investir no setor, resultando em uma grande expansão de novas unidades e de área plantada, principalmente nos estados de Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul. Entre os anos de 2002 a 2007, pelo menos 120 novas usinas foram instaladas no país, que dobrou a produção de cana-de-açúcar, ultrapassando a marca de 600 milhões de toneladas (NOVACANA, 2016).

### **2.1.2 A indústria sucroenergética no Mato Grosso do Sul**

No ano de 2003, a crise agropecuária afetou significativamente o estado de Mato Grosso do Sul, onde a indústria sucroenergética apresentou-se como ótima alternativa para reparar os danos desta crise. O setor consolidou-se na região, encontrando condições econômicas, ambientais e sociais favoráveis ao desenvolvimento da indústria. Segundo a BIOSUL (Associação de Produtores de Bioenergia de Mato Grosso do Sul), atualmente, o estado possui 24 usinas sucroenergéticas em funcionamento mapeadas na figura 3.

Figura 3 - Mapa da Bioenergia do Estado do Mato Grosso do Sul.



Fonte: (BIOSUL, 2017).

De acordo com os dados da UNICA (2017) da safra 2016/2017, o Mato Grosso do Sul foi o quarto estado que mais produziu, resultando em 50.292 mil toneladas de cana de açúcar, 1.735 mil toneladas de açúcar e 2.709 mil litros de etanol, como pode ser observado na figura 4. Assim, o estado representou na safra 2016/2017, 7,7% da

produção nacional de cana-de-açúcar, 4,4% e 9,9% da produção de açúcar e etanol, respectivamente.

Em relação à safra anterior houve um crescimento de cerca de 5% da produção de cana, um aumento de 33% na produção de açúcar e uma queda de quase 3% na produção de etanol.

Figura 4 - Produção das sucroenergéticas do Mato Grosso do Sul (Safra 2016/2017)

Estados	Cana-de-açúcar (mil toneladas)	Açúcar (mil toneladas)	Etanol Anidro (mil m <sup>3</sup> )	Etanol Hidratado (mil m <sup>3</sup> )	Etanol Total (mil m <sup>3</sup> )
Mato Grosso do Sul	50.292	1.735	807	1.902	2.709
Região Centro-Sul	607.137	35.628	10.655	14.996	25.651
Região Norte-Nordeste	44.704	3.107	934	669	1.603
Brasil	651.841	38.734	11.589	15.665	27.254

Fonte: (UNICA, 2017).

### 2.1.3 Crise no setor

A indústria da cana-de-açúcar vem enfrentando uma crise financeira no setor há pelo menos oito anos. Logo após a grande expansão, e de viver um dos melhores momentos da história para a indústria, o setor entrou em uma profunda crise da qual ainda não se recuperou. O início deu-se com a recessão na economia dos Estados Unidos em 2008 que teve consequências no mundo todo. Ao mesmo tempo, houve uma superprodução do açúcar no mercado internacional, juntamente com o congelamento do preço do etanol, e a escassez do crédito bancário (NOVACANA, 2016).

Hoje, as usinas ainda sofrem com as grandes dívidas adquiridas, mercado instável, condições climáticas não favoráveis (muitas chuvas e geadas) e falta de financiamento para investimento nos canaviais (NOVACANA, 2016). Estes fatores afetam significativamente a produção no campo, retardando a recuperação financeira e estrutural da indústria canavieira.

#### 2.1.4 Perspectivas energéticas

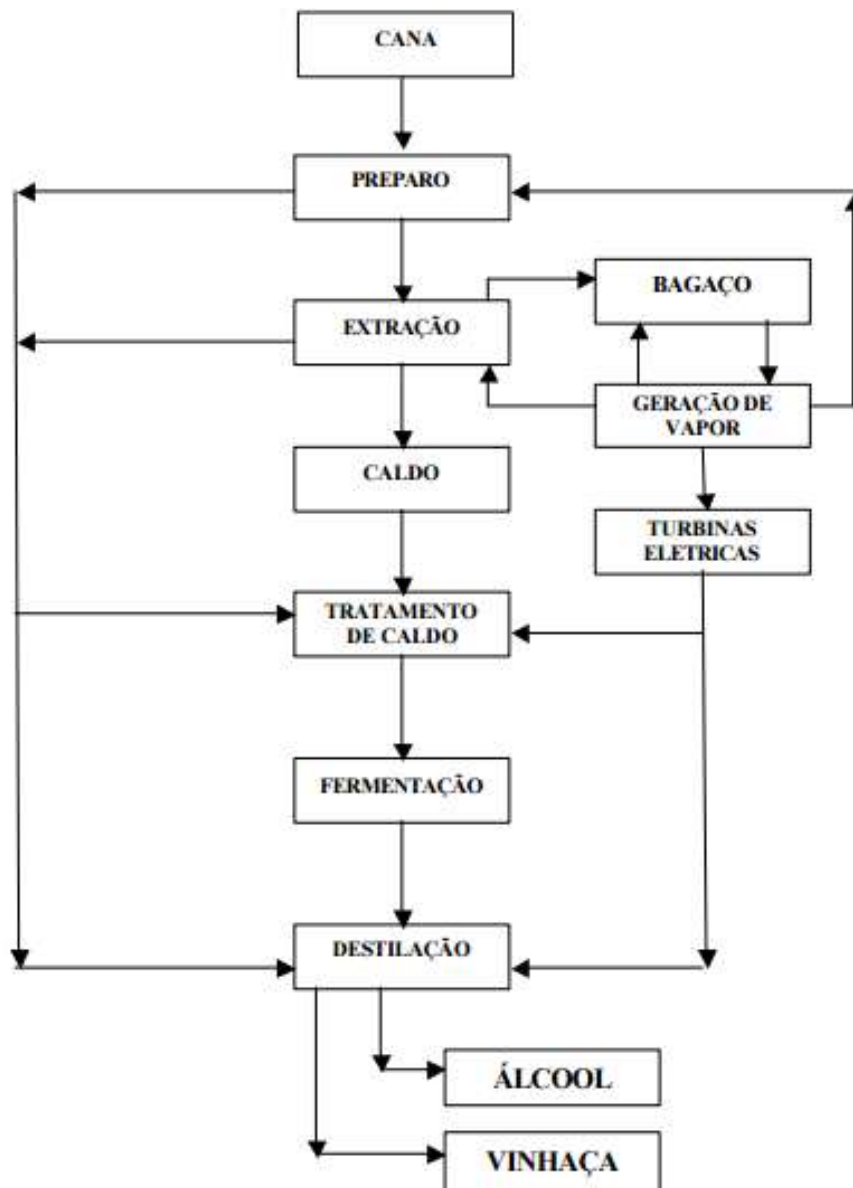
Com os novos desafios de controle do aquecimento global, estabelecidos no COP-21, o setor sucroenergético pode representar um importante aliado para atingir as metas estabelecidas, com geração de energia renovável de baixa emissão de carbono. Os resíduos gerados pela indústria são ricas fontes energéticas e importantes geradores de bioeletricidade, através do bagaço e da palha que são amplamente utilizados. Já o etanol, é uma tecnologia dominada, economicamente viável e prontamente disponível para utilização do consumidor. Por outro lado, a vinhaça, principal resíduo obtido da produção do etanol, ainda é uma potencial fonte de energia não utilizada. Por meio do processo de biodigestão anaeróbia do produto, pode-se obter um biogás com alto valor energético, pronto para ser utilizado na geração de energia elétrica em motores estacionários, em caldeiras, ou como combustível na frota de caminhões e tratores, substituindo o diesel (CHERUBIN, 2016).

Assim, espera-se a revitalização do setor, com incentivos do governo por meio de políticas públicas, e programas estratégicos de incentivo à geração de energia renovável e limpa, que já vem sendo desenvolvidos.

## 2.2 VINHAÇA

Vinhaça é o nome designado para o resíduo gerado no processo de destilação de uma solução alcoólica chamada vinho. Na indústria sucroenergética, o vinho é obtido por meio do processo de fermentação alcoólica do mosto, que pode ser do caldo da cana, do melaço, ou então da mistura desses dois produtos oriundos da cana-de-açúcar. De acordo com a região, a vinhaça pode ser chamada de vinhoto, garapão, restilo, entre outros (NETO, 2016). A figura 5 apresenta um fluxograma genérico do processo de produção da vinhaça em uma usina sucroenergética.

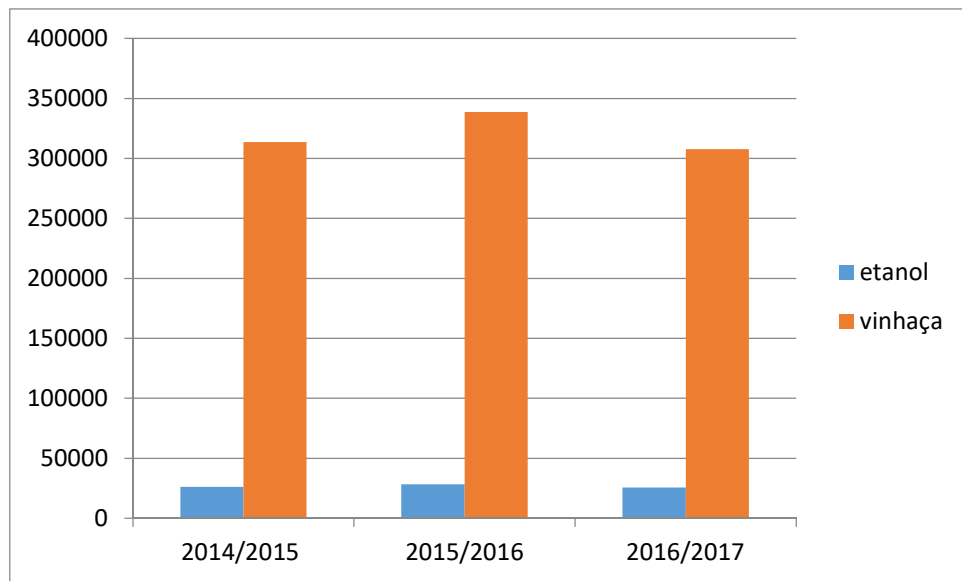
Figura 5 - Fluxograma do processo de produção da vinhaça nas usinas sucroenergéticas.



Fonte: (GRANATO, 2006).

O volume de produção da vinhaça varia conforme o teor alcoólico do vinho, a qual, segundo Neto (2016), pode variar de 7 a 16 litros por litro de etanol produzido, com a média situada entre 11 a 12 litros. De acordo com os dados da UNICA (2017) de produção de etanol para as safras 2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017, podemos estimar o volume de vinhaça produzido na região centro-sul do país, resultando em valores de 313.752 milhões, 338.700 milhões e 307.812 milhões de litros, respectivamente. Os dados estimados podem ser observados na figura 6.

Figura 6 - Estimativa da produção média de vinhaça na região Centro-Sul do país.



Fonte: Próprio autor (adaptado de UNICA, 2017).

### 2.2.1 Características da vinhaça

As características da vinhaça, variam de acordo com diversos fatores. Dentre eles, podemos citar a composição do solo, clima, matéria-prima utilizada, processo industrial aplicado na produção de etanol, e as características do mosto. Segundo Granato (2006), as maiores concentrações de matéria orgânica, cálcio, potássio e magnésio, são encontradas na vinhaça oriunda do melaço, enquanto esses elementos diminuem consideravelmente quando se trata do mosto do caldo da cana. Em geral, este efluente é constituído principalmente por água, sólidos suspensos, solúveis, e quantidades significativas de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda biológica de oxigênio (DBO), possuindo elevada carga poluidora (POVEDA, 2014).

Devido às suas características nutritivas, a vinhaça é utilizada como biofertilizante nos campos de produção de cana-de-açúcar. A figura 7 apresenta as características físico-químicas com os intervalos de valores encontrados na vinhaça para os diferentes tipos de mosto utilizados.

Figura 7 - Características físico-químicas da vinhaça.

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
DBO <sub>5</sub> (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: (CETESB, 1982).

Através dos dados da figura, pode-se notar os altos índices de DBO e DQO da vinhaça, que conferem-lhe a característica de resíduo altamente poluente, porém, com grande potencial produtivo de metano ao mesmo tempo. A riqueza de compostos como o nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio são os que atribuem-lhe a característica nutritiva (GEHRING, 2014).

A solução para o seu descarte foi a sua disposição na lavoura nas denominadas áreas de sacrifício, onde deixava-se de plantar para poder rejeitar o resíduo. Durante a década de 60, a vinhaça era lançada diretamente nos cursos d'água, causando problemas de abastecimento de água potável em cidades, mau odor, contaminação de rios e conseqüente morte de peixes, resultando em enormes prejuízos ambientais, sociais e econômicos (NETO, 2016). Segundo Gehring (2014), na época, diversas leis foram criadas com o objetivo de proibir o descarte direto ou indireto da vinhaça em qualquer coleção hidráulica.



### 2.2.2 Fertirrigação da vinhaça

Atualmente, a principal alternativa encontrada, e mais utilizada pela indústria canavieira, é a aplicação da vinhaça nos canaviais por meio da fertirrigação, que é a fertilização e irrigação dos solos. Essa prática além de dar um destino para um dos principais resíduos da indústria, em termos de volume e potencial poluidor, também aumenta a produtividade e manejo do solo, substituindo a adubação mineral (NETO, 2016). Em contrapartida, o abuso da concentração e distribuição de forma inadequada deste resíduo pode causar danos ao meio ambiente com a contaminação dos lençóis freáticos, o desequilíbrio dos nutrientes nos campos e emissões de gases poluentes à atmosfera.

Segundo Poveda (2014), uma prática comum nas indústrias sucroenergéticas, é o recalque da vinhaça para lagoas de armazenamento que funcionam como reservatórios de segurança, onde se pode controlar o volume de aplicação do resíduo nos canaviais, equilibrando os níveis de produção e distribuição para que não haja excessos ou descarte em áreas impróprias. A distribuição é comumente realizada através de caminhões-tanque e de sistemas de tubulação.

## 2.3 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA

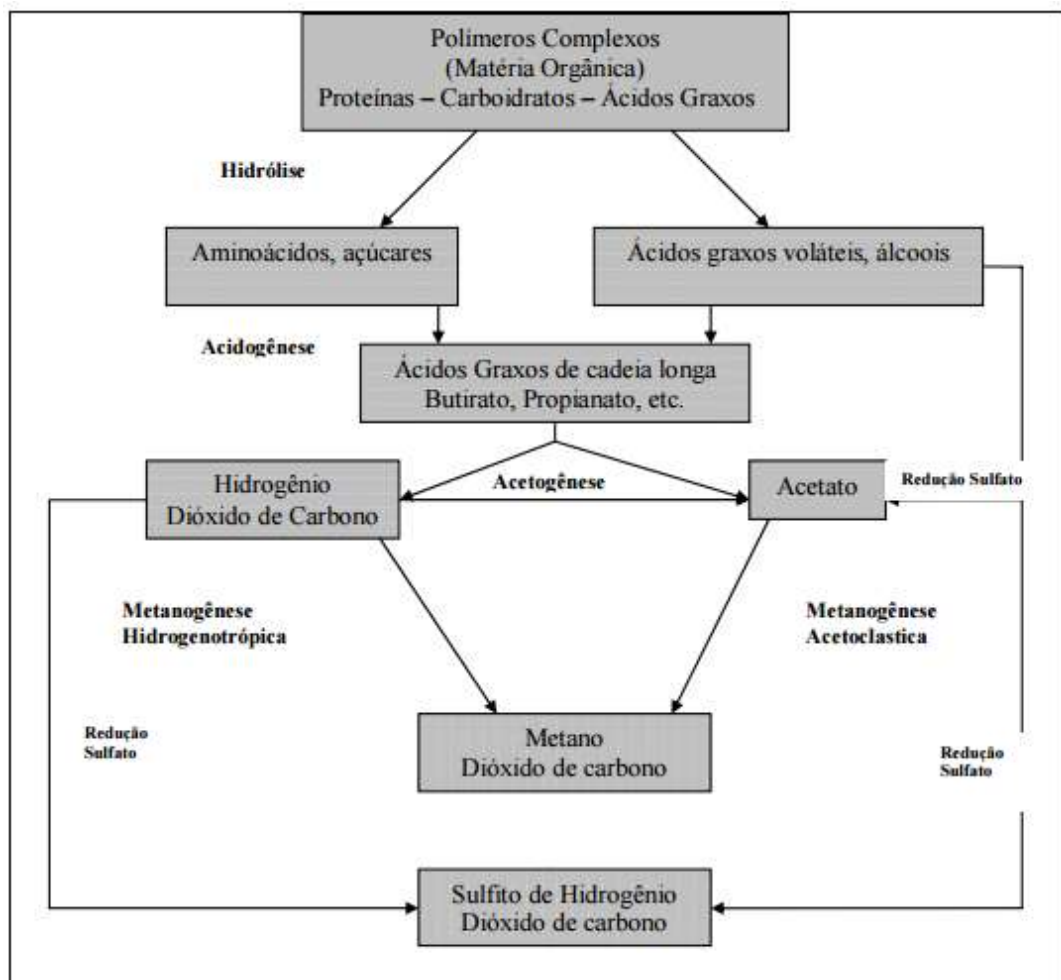
A digestão anaeróbia é o processo em que diversos grupos de microorganismos convertem a matéria orgânica do efluente tratado em um biogás rico em metano (POVEDA, 2014). As principais etapas em que ocorrem o processo são apresentadas na figura 8.

Segundo Salomon (2007) as principais etapas do processo são:

- Hidrólise: é a primeira etapa do processo, a qual é realizada por enzimas extracelulares que transformam os compostos orgânicos complexos em compostos mais simples (açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, etc.) que possam ser assimilados pelos microorganismos;
- Acidogênese: é realizada por bactérias heterogêneas que biodegradam o composto anteriormente obtido em ácidos graxos voláteis, hidrogênio, dióxido de carbono e álcoois.

- Acetogênese: é a etapa em que os produtos formados são oxidados em acetato, hidrogênio e gás carbônico, com a finalidade de fornecer substrato apropriado aos microrganismos metanogênicos. Dentre os compostos formados, apenas o acetato e o hidrogênio são capazes de ser assimilados pelas bactérias metanogênicas.
- Metanogênese: é o processo final de degradação do substrato, no qual, os produtos formados na etapa anterior são convertidos em metano e dióxido de carbono.

Figura 8 - Processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica.



Fonte: SALOMON (2007, adaptado de Lettinga, 1985).

Os principais fatores que influenciam a biodigestão anaeróbia são a temperatura do processo, o pH do meio, a composição e concentrações do efluente e

o tempo de retenção no reator utilizado (SALOMON, 2007). Portanto, no processo de biodigestão anaeróbia, apenas a matéria orgânica é degradada, resultando em um efluente com, praticamente, as mesmas características nutritivas, que ainda pode ser utilizado para aplicação nos campos para a fertirrigação do canavial.

De acordo com Passos (2009), podemos citar como benefícios da biodigestão anaeróbia da vinhaça, a produção de um biogás combustível, o controle dos odores e de poluição, a preservação das características fertilizantes do efluente e elevada remoção da matéria orgânica.

### **2.3.1 O Biogás**

Segundo Salomon (2007), o biogás constitui uma fonte de energia alternativa e contribui para a solução dos problemas ambientais, reduzindo potencialmente os impactos da fonte poluidora.

A principal característica do biogás é a sua obtenção por meio da decomposição natural da matéria orgânica, através de microorganismos, encontrada nos mais diversos resíduos gerados. Podemos citar como fontes de resíduos para sua geração a indústria, o agronegócio, os aterros sanitários, dentre outros. Os tratamentos utilizados para estabilizar estes resíduos, antes de retorná-los ao meio ambiente, também são fontes de geração deste gás. (GEHRING, 2014).

É formado por uma mistura de gases, dos quais, o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) se destacam, devido às maiores proporções nele encontradas. A composição do biogás varia de acordo com diversos fatores, mas, principalmente, de acordo com a fonte orgânica do resíduo a ser utilizado e o tipo de biodigestor. Segundo Salomon (2007), seu potencial energético é proporcional à concentração de metano em sua composição, a qual varia de 40 a 75% dependendo da fonte geradora. A figura 9 apresenta a composição média do biogás.

Assim, devido às diferentes composições que o biogás pode ter, o seu poder calorífico também varia de acordo com os fatores já citados. Em termos de comparação, Salomon (2007) cita que o poder calorífico do biogás pode chegar a 60% do poder calorífico do gás natural.

Figura 9 - Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos.

Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	40 – 75
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25 – 40
Nitrogênio (N)	0,5 – 2,5
Oxigênio (O)	0,1 – 1
Acido sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	0,1 – 0,5
Amônia (NH <sub>3</sub> )	0,1 – 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 – 0,1
Hidrogênio (H)	1 - 3

Fonte: SALOMON (2007 apud CASTANON 2002).

Dentre as características do biogás obtido por meio da digestão anaeróbia, estão a presença de compostos não combustíveis, como a água e o dióxido de carbono que acabam tornando-o menos eficiente no processo de queima. Outro problema que acarreta na perda de rendimento é a presença de gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), conferindo-lhe uma característica corrosiva, que diminui a vida útil das máquinas de conversão de energia, como os motores. Portanto, se faz necessária a limpeza do biogás, para purificá-lo para o processo de combustão e transformação de energia. Esse processo de limpeza inclui a remoção da umidade, do dióxido de carbono, do ácido sulfídrico e de partículas presentes no biogás (SALOMON, 2007).

### 2.3.2 Tipos de Reatores

Os reatores e biodigestores são as câmaras onde ocorre o processo de biodigestão anaeróbia dos resíduos orgânicos nas condições necessárias para que o procedimento aconteça de maneira controlada. São diversos os tipos de reatores com as mais variadas tecnologias disponíveis no mercado, que podem ser classificados de acordo com o tipo de alimentação: bateladas ou de fluxo contínuo (GEHRING, 2014). Para a aplicação em indústrias, como as sucoenergéticas, o ideal seria o uso de reatores de fluxo contínuo, devido à grande produção de vinhaça.

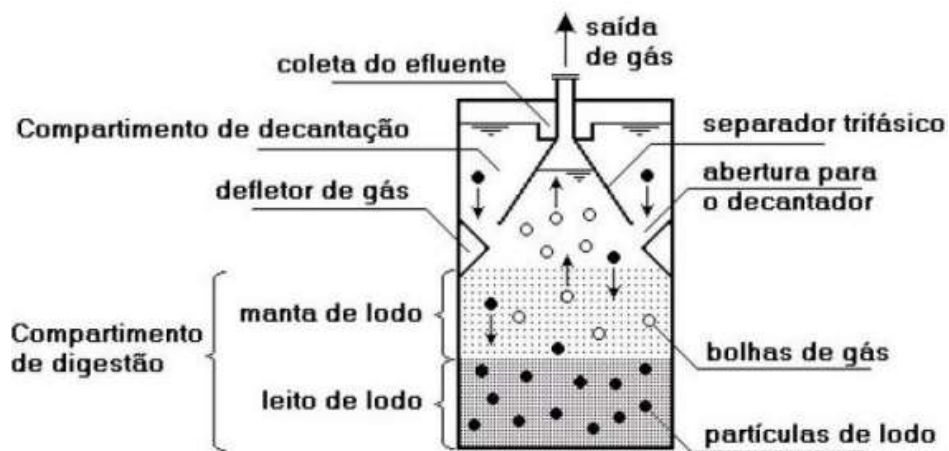
De acordo com Poveda (2014), os reatores do tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) são os que apresentam tecnologia adequada para o tratamento da vinhaça. Estes reatores são comumente aplicados para o tratamento de efluentes

urbanos, esgotos sanitários e industriais. Se destacam no mercado por sua capacidade de reter grandes cargas orgânicas volumétricas em curto tempo de detenção, obtendo melhores eficiências de remoção de DQO.

Segundo Chernicharo (1997), as principais vantagens dos reatores UABS são: baixo custo de implantação e operação; eficiência de remoção de DBO e DQO (entre 65% a 75%); sistema compacto; baixos níveis de produção de lodo e de consumo de energia; e elevada concentração do lodo excedente e desidratabilidade do mesmo. Em contrapartida, dentre as desvantagens cita-se: a baixa capacidade de tolerar cargas tóxicas; possibilidade de odores; necessidade de pós-tratamento do efluente, apenas se não for utilizado como biofertilizante.

A alimentação do resíduo orgânico é realizada por uma entrada na base do reator onde está localizada uma camada denominada, leito do lodo, onde existe a maior concentração de matéria orgânica, ocorrendo o processo de maior remoção da mesma. Em contrapartida, logo acima do leito, está localizada a manta de lodo, local onde se dá a menor concentração de matéria orgânica. Como o fluxo do resíduo é ascendente, o sistema se auto mistura, com o auxílio da ascensão das bolhas de biogás (GEHRING, 2014). A última fase do processo é onde ocorre a transformação final e captura do biogás, através do separador trifásico, como pode ser visto na figura 10.

Figura 10 - Característica do funcionamento do reator UASB.



Fonte: (GEHRING, 2014).

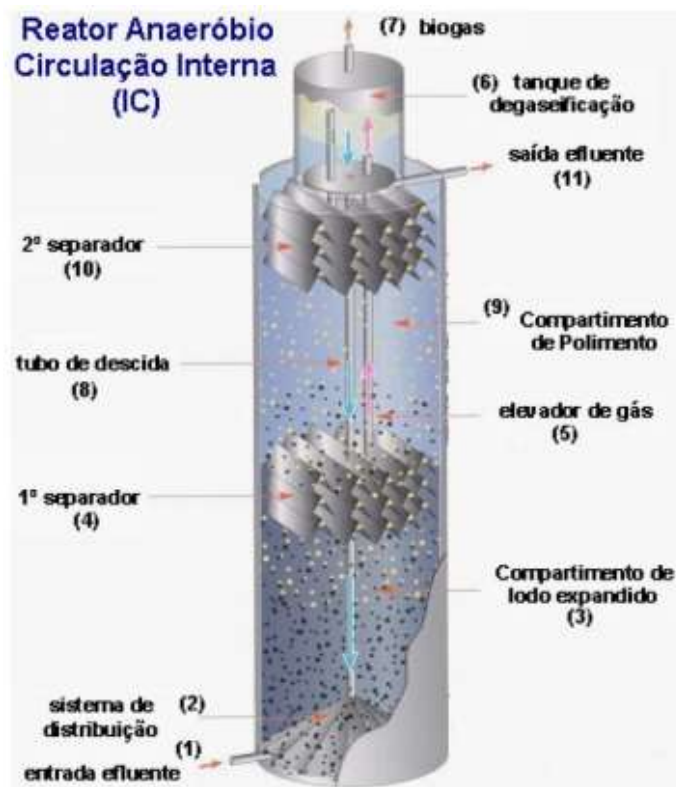
A função do separador trifásico é filtrar todo o sedimento que é carregado ao topo, garantindo que ele volte ao manto e ao leito do lodo. Logo após o separador trifásico, encontra-se uma câmara de captura do biogás e a saída para coleta do efluente.

De acordo com Granato (2003), a empresa holandesa PAQUES BV, desenvolveu uma nova tecnologia de circulação de reatores, os chamados reatores anaeróbicos de circulação interna. Podemos resumir esta tecnologia, como dois reatores UASB sobrepostos, onde o processo ocorre em quatro etapas. Na primeira etapa, o resíduo é misturado e distribuído dentro do tanque, enquanto na segunda etapa ocorre no leito expandido de lodo, onde a maior parte da carga orgânica é convertida em biogás. A terceira etapa caracteriza-se pelo tratamento do restante do resíduo da carga orgânica, na seção de polimento. Por fim, a última etapa ocorre no separador de líquido e gás, onde são separados o biogás e o efluente.

Assim, obtém-se a captura do biogás em dois estágios, onde o gás do primeiro estágio é utilizado para realizar uma pressão ascendente, auxiliando na mistura do resíduo orgânico e lodo bacteriano sejam carregadas pelo primeiro duto de fluxo ascendente, até o separador de gás. Enquanto o gás é capturado, o efluente sofre um pós tratamento na seção de polimento, onde o que restou de DQO é removida. O biogás produzido a partir desta etapa é coletado no separador superior, enquanto o efluente é direcionado para a tubulação de saída (GRANATO, 2003). A figura 11 apresenta o reator anaeróbico de circulação interna em sua forma construtiva.

De acordo com Cherubin (2016), esta tecnologia já é aplicada em algumas usinas sucroenergéticas no Brasil em fases de testes, mas já apresentam resultados promissores para o tratamento da vinhaça. Dentre as inovações deste modelo, apresentam elevada taxa de aplicação devido à alta concentração de biomassa e alto nível de biomassa no reator; ausência de odores; elevada retenção de biomassa em dois estágios, sem perdas; bicos para limpeza e separador de biomassa resultando em poucas manutenções no sistema; dimensões mais compactas do que os reatores UASB convencionais.

Figura 11 - Reator anaeróbico de circulação interna.



Fonte: GRANATO (2003).

## 2.4 O MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA

Segundo a ABRACEEL (2016), o ONS (Operador Nacional do Sistema) é o órgão que coordena todo o intercâmbio entre consumidores e produtores de energia elétrica do país por meio do SIN, combinando os melhores custos e condições de segurança para todo o sistema. A operação encontra-se no ambiente físico, e a contratação está no ambiente apenas financeiro, dos quais não se confundem.

O mercado de energia elétrica brasileira pode ser dividido em dois ambientes distintos: o ACR (Ambiente de Contratação Regulada) e o ACL (Ambiente de contratação Livre). O ACR é composto pelos consumidores cativos, enquanto o ACL é formado pelos consumidores livres.

A comercialização de energia elétrica no ACR é realizada por meio de leilões organizados pela CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica), nos quais são realizados contratos registrados entre os vendedores e consumidores de energia. O preço-teto é determinado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica),

chamado de valor de referência, e por meio de chamadas públicas, os produtores são convidados a apresentarem suas propostas de venda e seus termos comerciais. Após a realização dos leilões, os contratos são realizados e registrados, onde os produtores assumem a obrigação legal de ofertar a quantidade de energia elétrica negociada ao preço leilado (GEHRING, 2014).

O ACL é caracterizado pela livre negociação e comercialização entre o produtor de energia elétrica diretamente com o consumidor final, por meio de contratos registrados na CCEE. Nesta modalidade, a energia contratada pode ser de fonte convencional ou incentivada, a qual o comprador recebe descontos para que as fontes se tornem mais competitivas perante às convencionais. Dentre as fontes incentivadas estão a biomassa, PCH (Pequenas Centrais hidrelétricas), eólica e solar, enquanto as convencionais são representadas pelas térmicas a gás natural e as grandes hidrelétricas.

De acordo com o mercado livre de energia elétrica (2017), existem dois tipos de consumidores nesta modalidade: o consumidor livre e o consumidor especial. O consumidor especial é aquele que pode contratar apenas das fontes de energia incentivadas, e que possui carga maior ou igual a 500 kW e tensão mínima de 2,3 kV. Por outro lado, o consumidor livre pode contratar das fontes incentivadas ou convencionais, apresentando uma demanda contratada de no mínimo 3000 kW e tensão mínima de 69kV, para conexões elétricas anteriores a julho/1995 ou de 2,3kV, para conexões após julho de 1995.



### 3 METODOLOGIA

#### 3.2 CENÁRIO ATUAL

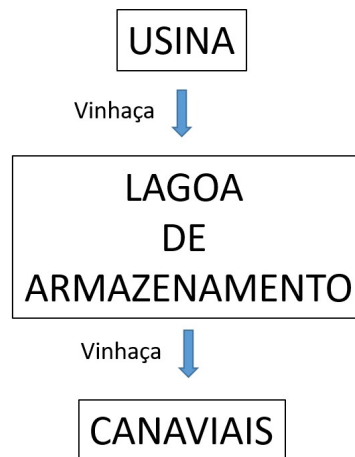
A usina a ser analisada, está localizada na região da cidade de Dourados, no estado do Mato Grosso do Sul, e é produtora de açúcar, álcool e energia elétrica.

A energia elétrica gerada pela indústria é utilizada para o próprio consumo, e exporta-se o excedente para o SIN. A produção é feita através da tecnologia da cogeração, utilizando o bagaço da cana-de-açúcar como combustível nas caldeiras. Quando o bagaço produzido no processo de moagem não é suficiente para a produção de energia elétrica, a indústria realiza a compra do resíduo.

A produção de álcool é feita através do caldo obtido da moagem da cana-de-açúcar. O caldo é tratado e fermentado, processo no qual é obtido o vinho, uma mistura de leveduras, álcool e resíduos. Após o processo de retirada das leveduras, o vinho é encaminhado para a destilaria. É no processo de destilação do vinho que a vinhaça é produzida e destinada para uma lagoa de armazenamento. Através de um sistema de tubulação, a vinhaça é distribuída para ser utilizada em sua totalidade na fertirrigação dos campos de cana-de-açúcar.

As características da vinhaça produzida e armazenada na lagoa são analisadas em laboratório, periodicamente, e distribuída de maneira a evitar seu excesso nos campos, considerando sua composição físico-química para o tratamento do solo. A figura 12 apresenta um fluxograma do cenário atual.

Figura 12 - Fluxograma do cenário atual.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3 CENÁRIO PROPOSTO

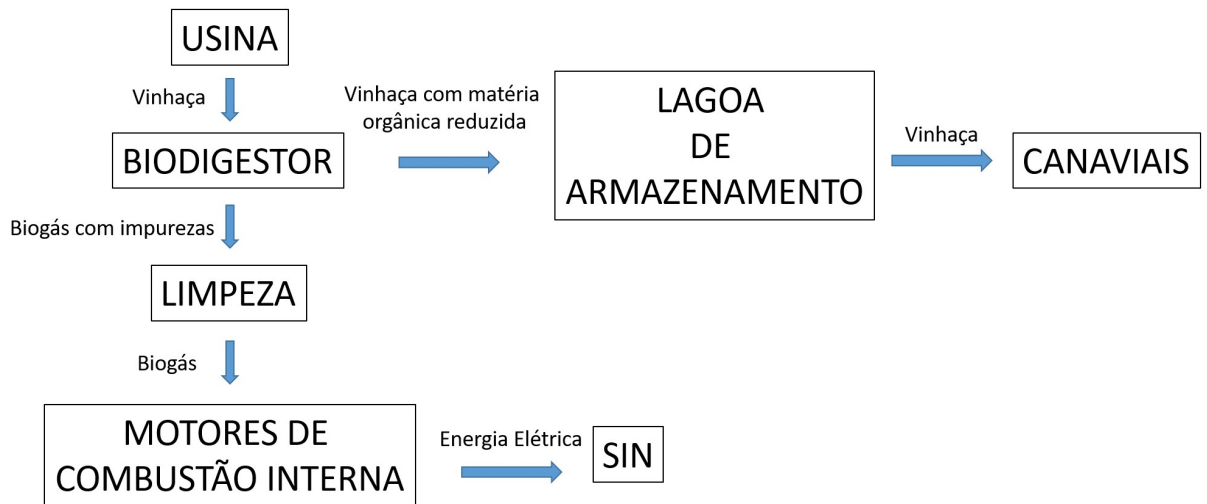
No cenário proposto será analisada a viabilidade da produção e captura do biogás proveniente da vinhaça por meio do processo de biodigestão anaeróbia com o auxílio de um biodigestor, para a geração adicional de energia elétrica.

Assim, será realizado o dimensionamento de um reator UASB para tratamento da vinhaça, estimando o potencial de remoção de matéria orgânica do efluente, produção de metano e de biogás, e o potencial de geração de energia elétrica da usina por meio da queima do biogás em motores de combustão interna.

O efluente resultante do biodigestor será aplicado nos campos como biofertilizante, assim como já é realizado no cenário atual, visto que a biodigestão não provoca a redução do volume do efluente. O biogás obtido será encaminhado para tratamento de redução da umidade e de  $H_2S$ , para poder ser utilizado como combustível em motogeradores termelétricos de combustão interna.

A energia elétrica produzida será exportada para a rede e comercializada no mercado livre, modalidade em que a usina já comercializa o seu excedente de energia elétrica gerado por meio da queima do bagaço da cana-de-açúcar. A figura 13 apresenta o fluxograma do cenário proposto. Todos os resultados serão obtidos utilizando o software Excel como ferramenta para o desenvolvimento dos cálculos, tendo como base os dados do período de um ano, de Julho/2016 a Junho/2017.

Figura 13 – Fluxograma do cenário proposto.



Fonte: Próprio autor.

### 3.4 ANÁLISE ENERGÉTICA

#### 3.4.1 Dimensionamento do sistema de digestão anaeróbia

Os parâmetros de relevância para a determinação do volume do reator são a carga hidráulica volumétrica, o tempo de detenção e a carga orgânica volumétrica. Neste caso, a carga hidráulica volumétrica é o volume de vinhaça aplicado diariamente ao reator, por unidade de volume do mesmo (Chernicharo, 2007), e é dada pela equação 1. A carga orgânica volumétrica é definida como a quantidade de matéria orgânica (massa) que é aplicada diariamente no reator, por unidade de volume do mesmo, apresentada na equação 2.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

Onde:

$CHV$  – Carga hidráulica volumétrica ( $m^3/m^3.d$ );

$Q$  – Vazão diária de Vinhaça ( $m^3/dia$ );

$V$  – Volume do reator ( $m^3$ );

$$COV = \frac{Q \cdot S_0}{V} \quad (2)$$

Onde:

$COV$  – Carga orgânica volumétrica ( $\text{Kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$ );

$S_0$  – Carga orgânica inicial ( $\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3$ ).

Segundo Gehring (2014), a aplicação de reatores UASB para fins industriais, onde a temperatura é alta ou pode ser controlada, adota-se uma carga orgânica volumétrica máxima de  $30\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$  para o projeto.

O tempo de detenção hidráulica refere-se ao tempo em que a vinhaça deve ficar retida no reator para que ocorram as reações biológicas pretendidas na unidade de tratamento. Este parâmetro é dado pela equação 3:

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Onde:

$TDH$  – tempo de detenção hidráulica (dia);

Um dos principais fatores que influenciam o tempo de detenção hidráulica é a temperatura do resíduo a ser tratado. A tabela 4 apresenta o tempo médio para cada intervalo de temperatura do resíduo a ser considerado, segundo Gehring (2014, apud Chernicharo, 1997, p. 165).

Tabela 1 – Tempo de detenção hidráulica em reatores UASB

Temperatura do resíduo ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tempo de detenção hidráulica (h)	
	Média diária	Mínimo (4h a 6h)
16 - 19	> 10 - 14	> 7 - 9
20 - 26	> 6 - 9	> 4 - 6
>26	> 6	> 4

Fonte: Gehring (2014, apud, Chernicharo, 1997, p.165).

A eficiência do reator UASB nada mais é do que a eficiência de remoção da matéria orgânica do efluente. Por meio de diversos estudos realizados e encontrados na literatura para reatores operando com elevadas cargas orgânicas volumétricas (superiores a 15kg.DQO/m<sup>3</sup>) e temperaturas (superiores a 50°C), Gerhring (2014) desenvolveu a equação 4 para estimar a eficiência para este tipo específico de aplicação:

$$E_{DQO} = 66,229 \cdot TDH^{0.1288} \quad (4)$$

Onde:

$E_{DQO}$  – Eficiência em termos de redução de DQO (%).

Assim, estima-se a concentração de DQO final na vinhaça, através da equação 5:

$$S = 1 - \frac{E_{DQO} \cdot S_0}{100} \quad (5)$$

Onde:

$S$  – concentração final de DQO do efluente (mg/l);

$S_0$  – concentração inicial de DQO do efluente (mg/l).

### 3.4.2 Produção de biogás

Para a determinação de produção de biogás por meio do processo de bidigestão anaeróbia, deve-se levar em consideração a redução da matéria orgânica na vinhaça, realizada pelo reator, e a produção de sólidos no sistema. Por meio da equação 6, pode-se obter a carga orgânica convertida em metano:

$$DQO_{CH_4} = Q \cdot (S_0 - S) - Y_{obs} \cdot Q \cdot S_0 \quad (6)$$

Onde:

$DQO_{CH_4}$  – Carga orgânica convertida em metano (kg.DQO<sub>CH4</sub>/d);

$Y_{obs}$  – coeficiente de produção de sólidos no sistema (0,23 kg.DQO<sub>lodo</sub>/kg.DQO<sub>apl</sub>) (Gehring, 2014).

Assim, o volume de produção de metano é calculado através das equações 7 e 8.

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (7)$$

Onde:

$Q_{CH_4}$  – produção volumétrica de metano (m<sup>3</sup>/dia);

$K$  – Fator de correção da temperatura operacional do reator (kg.DQO/m<sup>3</sup>);

$t$  – temperatura operacional do reator.

$$K(t) = \frac{P \cdot K_{DQO}}{R \cdot (273 + t)} \quad (8)$$

Onde:

$P$  - Pressão atmosférica (1 atm);

$R$  –Constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.°K);

$K_{DQO}$  – DQO correspondente a um mol CH<sub>4</sub> (64 gDQO/mol).

A partir do valor obtido de produção de metano, é possível realizar a estimativa da produção total de biogás, considerando a taxa de metano que o biogás é composto, resultando na equação 9:

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (9)$$

Onde:

$C_{CH_4}$  – Teor de produção de metano no biogás

$Q_{biogás}$  – Produção volumétrica de biogás (m<sup>3</sup>/dia).

### 3.4.3 Geração de energia elétrica

A partir da produção de biogás estimada por meio das equações já apresentadas, faz-se necessário definir a capacidade de potência instalada de energia elétrica, a ser produzida pelo grupo de geradores. Para a determinação da potência elétrica, deve-se considerar a vazão de biogás produzido pelo reator, o poder calorífico inferior desse combustível e, por fim, a eficiência elétrica de transformação de energia do gerador a ser utilizado, como mostra a equação 10.

$$PE = Q_{biogás} \cdot PCI_{biogás} \cdot \eta_{gerador} \cdot \frac{4,1868}{86400} \quad (10)$$

$PE$  – Potência elétrica (kW);

$Q_{biogás}$  – Vazão de biogás (m<sup>3</sup>/dia)

$PCI_{biogás}$  – Poder calorífico inferior do biogás (kcal/m<sup>3</sup>);

$\eta_{gerador}$  – Eficiência do motor do gerador (%);

4,1868 – Fator de conversão de kcal para kJ;

86400 – Fator de conversão de dias para segundos.

Assim, é possível determinar a produção de energia elétrica anual do biogás obtido por meio do processo de biodigestão anaeróbia da vinhaça, apresentada na equação 11.

$$E = Q_{biogás} \cdot PCI_{biogás} \cdot \eta_{gerador} \cdot \frac{4,1868}{3600} \quad (11)$$

Onde:

3600 – Fator de conversão para horas.

## 3.5 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica do projeto proposto, visa avaliar a implantação do sistema de geração de biogás proveniente da vinhaça por meio do processo de biodigestão. O fluxo de caixa irá avaliar o investimento necessário para a implantação de todo o

sistema, considerando os custos operacionais e os lucros líquidos anuais durante toda a vida útil do projeto obtido por meio da venda ao mercado de energia elétrica. Assim, será realizada uma projeção dos futuros movimentos de capitais esperados para o tempo de operação do projeto.

A análise financeira será realizada a partir de dois métodos distintos para a avaliação da viabilidade do projeto: valor presente líquido e taxa interna de retorno.

### 3.5.1 Valor presente líquido – VPL

O valor presente líquido é definido como o somatório dos valores presente dos fluxos estimados de um projeto, considerando o período de operação e uma taxa mínima de atratividade (TMA), onde os fluxos negativos representam as saídas de caixa no período, e os fluxos positivos, as entradas de caixa. A taxa mínima de atratividade é a taxa de juros mínima em que o investidor se propõe a ganhar perante ao investimento realizado. O valor encontrado para o VPL, representa o montante esperado da aplicação até o fim do período estimado, representado em valores atuais (MARQUEZAN, 2006).

Se o VPL obtido for superior a 0, significa que o investimento do projeto é viável com um retorno positivo, e rentabilidade superior à taxa mínima de atratividade. Se o VPL obtido for inferior a 0, significa que o investimento do projeto não é viável com um retorno negativo, e rentabilidade inferior à taxa mínima de atratividade. Se o VPL for igual a 0, significa que o investimento do projeto é indiferente, com rentabilidade igual à taxa mínima de atratividade (CURY, 2011).

O cálculo do VPL é definido pela equação 12.

$$VPL(i) = \sum_{j=0}^n FC_j(1+i)^j \quad (12)$$

Onde:

$i$  – taxa de desconto;

$j$  – período de tempo do fluxo de caixa;

$VPL(i)$  – Valor presente líquido descontado a uma taxa  $i$ ;

$n$ - número de períodos do fluxo



Em análises de projetos distintos, o VPL permite a tomada de decisão segundo o maior valor obtido.

### **3.5.2 Taxa interna de retorno – TIR**

A taxa interna de retorno é definida como a taxa de juros em que torna o VPL de determinado fluxo de caixa, nulo. É um índice que determina a rentabilidade de um investimento quando comparado à sua taxa mínima de atratividade (PUCCINI, 2011).

Assim, se a TIR for superior ao TMA, o projeto apresenta-se como viável com retorno maior do que o mínimo esperado. Se a TIR for menor do que a TMA, o investimento não é atrativo, enquanto um valor de TIR igual à TMA, implicará na rentabilidade igual a TMA. (MARQUEZAN, 2006).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através das equações apresentadas na metodologia foram realizados os cálculos para análise energética e para a análise econômica, por meio da ferramenta Excel, cujos valores obtidos são apresentados a seguir.

### 4.2 ANÁLISE ENERGÉTICA

#### 4.2.1 Características da produção de Vinhaça

De acordo com os dados laboratoriais disponibilizados pela usina, a tabela 1 apresenta as características da vinhaça produzida. O valor de DQO obtido nas análises foi de 19.700 mg/l, ou seja, dentro dos valores estimados na literatura de referência para a vinhaça proveniente do caldo da cana-de-açúcar, que está entre 15.000 mg/l e 33.000 mg/l.

Tabela 2 - Características da Vinhaça produzida na Usina

Parâmetros	Unidade	Resultados Analíticos
pH (a 25°C)	-	4,4
Sólidos Suspensos Totais	mg/l	1040
Dureza Total	mg/l	2090
Condutividade	µS/cm	7330
Nitrogênio Amoniacal	mg/l	1,16
Nitrogênio Total Kjeldahl	mg/l	280
Sódio	mg/l	14,4
Cálcio	mg/l	532
Potássio	mg/l	1590
Magnésio	mg/l	185
Sulfato	mg/l	1430
Fósforo Total	µg/l	17900
DBO	mg/l	9160
DQO	mg/l	19700
Nitrito (como N)	mg/l	< 2
Nitrato (como N)	mg/l	< 10

Fonte: Próprio autor, adaptado de dados disponibilizados pela usina (2017).

A tabela 2 apresenta os dados de produção de vinhaça na indústria, de acordo com dados disponibilizados pela usina, para o período de Julho/2016 a Junho/2017. Pode-se notar que a produção mensal média de vinhaça é de 170.258,25 m<sup>3</sup>, sendo que o maior valor registrado foi no mês de janeiro, com a produção de 231.540 m<sup>3</sup>. A produção total de vinhaça no período de referência foi de 2.043.099 m<sup>3</sup>.

Tabela 3 - Características de Produção Anual de Julho/2016 a Junho/2017.

Parâmetros	Unidade	Valores
Vazão Média de Vinhaça	m <sup>3</sup> /h	7.078,29
Produção média de vinhaça	m <sup>3</sup> /mês	170.258,25
Produção máxima de vinhaça	m <sup>3</sup> /mês	231.540,00
Produção Total de Vinhaça	m <sup>3</sup> /ano	2.043.099,00

Fonte: Próprio autor, adaptado de dados disponibilizados pela usina (2017).

Toda a análise energética do potencial de geração de energia foi realizada com base na metodologia desenvolvida por Chernicharo (2007), para um reator UASB, com adaptações para o caso da usina e tratamento da vinhaça.

O reator foi dimensionado considerando a vazão máxima de vinhaça obtida no período de referência. A tabela 3 traz os valores dos parâmetros utilizados no dimensionamento do reator.

Tabela 4 - Parâmetros de dimensionamento do reator.

Parâmetros	Unidade	Valor
Concentração de DQO inicial (S <sub>0</sub> )	kg/m <sup>3</sup> DQO	19,70 <sup>a</sup>
Carga orgânica volumétrica (COV)	kg.DQO/m <sup>3</sup> dia	30,00 <sup>b</sup>
Produção de vinhaça média (Q <sub>média</sub> )	m <sup>3</sup> /dia	5.675,27 <sup>a</sup>
Produção máxima de vinhaça (Q <sub>máx</sub> )	m <sup>3</sup> /dia	7.800,00 <sup>a</sup>

Fonte: Próprio autor, adaptado de a) Dados disponibilizados pela usina (2017). b) Gehring (2014).

Para a determinação do volume do reator, um dos fatores considerados foi o tempo de detenção hidráulica da vinhaça no seu interior. Na tabela 4, foram apresentados valores mínimos, considerando a temperatura do efluente utilizado. Por meio da equação 3, o valor calculado para o tempo de detenção hidráulica foi de 0,67

dias, o que equivale à 16,08 horas, dentro dos limites estabelecidos por Chernicharo (1997).

Considerando o valor máximo para a carga orgânica volumétrica de 30kg.DQO/m<sup>3</sup>.dia, o valor de 19,7kg.DQO/m<sup>3</sup> referente à concentração inicial de DQO da vinhaça, e a vazão máxima de vinhaça obtida durante o período, cerca de 7.800m<sup>3</sup>/dia, obteve-se o volume do reator através da equação 2, que foi adaptado para 5.200m<sup>3</sup>.

Para a eficiência do reator, foi considerado o tempo de detenção hidráulica obtido, resultando em 62,86% por meio da equação 4. De acordo com Gehring (2014), os valores de eficiência para este tipo de reator encontram-se na faixa de 69 a 80%. Porém, deve-se haver um equilíbrio entre o volume do reator, a carga orgânica e o tempo de detenção hidráulica. Outro fator que também influencia, é a concentração da matéria orgânica do efluente, que por ser originário do caldo da cana, possui uma concentração menor quando comparado ao do melaço ou de outras misturas. Assim, acredita-se que o valor da eficiência energética obtida é aceitável.

Com a eficiência de remoção de DQO do reator, foi possível estimar a concentração final de DQO do efluente após o processo de biodigestão através da equação 5, que foi de 7,32mg/l. Os parâmetros calculados estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Dimensionamento e características do reator obtidos por meio das equações 1, 2, 3, 4 e 5.

Parâmetro	Unidade	Valor
Volume do reator (V)	m <sup>3</sup>	5.200
Tempo de detenção hidráulica (TDH)	dia	0,67
Carga hidráulica volumétrica (CHV)	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> .dia	1,50
Eficiência do reator (E <sub>DQO</sub> )	%	62,86
Concentração de DQO final (S)	mg/l	7,32

Fonte: Próprio autor.

Os dados de referência utilizados são de Julho/2016 a Junho/2017 que estão apresentados na tabela 6. A produção média de vinhaça mensal é de 170.258,25 m<sup>3</sup>, sendo que o mês de maior produção foi em janeiro, alcançando a marca de

231.540m<sup>3</sup>, enquanto o mês de menor produção foi em abril, com 109.322m<sup>3</sup>. A produção acumulada de toda o período foi de 2.043.099m<sup>3</sup>, representando uma média de 13 litros de geração de vinhaça para cada litro produzido de álcool, segundo dados disponibilizados pela usina.

Tabela 6 - Produção de vinhaça do período de Julho/2016 a Junho/2017.

Mês	Produção de Vinhaça (m <sup>3</sup> )
Julho	183.161
Agosto	162.913
Setembro	180.166
Outubro	151.423
Novembro	209.095
Dezembro	162.301
Janeiro	231.540
Fevereiro	139.412
Março	194.011
Abril	109.322
Maio	137.438
Junho	182.317
Acumulado	2.043.099

Fonte: Próprio autor, adaptado de dados disponibilizados da usina.

Como já visto anteriormente, diversos são os fatores que influenciam a eficiência de remoção da matéria orgânica e a produção de biogás, como temperatura, controle de pH, o tempo de detenção, as características da composição e concentrações do efluente. Assim, considerando a produção de sólidos no sistema e a taxa de remoção de DQO do efluente durante o processo de biodigestão anaeróbia, pode-se calcular a carga orgânica convertida em metano com a equação 6. A média mensal obtida de carga orgânica convertida em metano, para a período considerado, foi de 1.336.906,60kg.DQO<sub>CH<sub>4</sub></sub>, e de 1.818.104,87kg.DQO<sub>CH<sub>4</sub></sub> para a máxima mensal. A produção do gás metano pode ser quantificada, considerando os aspectos químicos da composição da vinhaça e de temperatura por meio da equação 7 e 8. A média mensal de produção de metano foi de 562.246,10m<sup>3</sup> e de 764.617,64m<sup>3</sup> para a máxima produção mensal durante o ano. A produção da carga orgânica convertida

em metano, e da produção volumétrica de gás metano estão apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 - Produção de metano do período de Julho/2016 a Junho/2017.

Mês	$DQO_{CH_4}$ (kg.DQO <sub>CH4</sub> )	$Q_{CH_4}$ (m <sup>3</sup> )
Julho	1.438.221,93	604.855,02
Agosto	1.279.230,02	537.989,78
Setembro	1.414.704,51	594.964,59
Outubro	1.189.007,92	500.046,20
Novembro	1.641.861,62	690.497,22
Dezembro	1.274.424,46	535.968,76
Janeiro	1.818.104,87	764.617,64
Fevereiro	1.094.694,81	460.382,11
Março	1.523.418,61	640.685,12
Abril	858.421,27	361.015,50
Maiο	1.079.194,51	453.863,35
Junho	1.431.594,65	602.067,87
Acumulado	16.042.879,20	6.746.953,17

Fonte: Próprio autor.

De acordo com Souza (1991), a composição média do biogás é de 60% de metano, 39% de dióxido de carbono e menos de 1% de outros elementos. Portanto, para determinar a produção total de biogás, utilizaram-se os valores de produção de metano, considerando a taxa de composição deste gás, de 60% através da equação 9, apresentados na tabela 8. A maior produção de biogás foi em janeiro com 1.274362,73m<sup>3</sup>, enquanto a média mensal durante o ano foi de 937.076,83m<sup>3</sup>.

Tabela 8 - Produção de Biogás do período de Julho/2016 a Junho/2017.

Mês	$Q_{biogás}$ (m <sup>3</sup> )
Julho	1.008.091,70
Agosto	896.649,63
Setembro	991.607,65
Outubro	833.410,33
Novembro	1.150.828,69
Dezembro	893.281,27
Janeiro	1.274.362,73
Fevereiro	767.303,52
Março	1.067.808,54
Abril	601.692,51
Mai	756.438,91
Junho	1.003.446,45
Acumulado	11.244.921,95

Fonte: Próprio autor.

Segundo Lamo (1991), o poder calorífico do biogás (PCI) é de 5.100kcal/Nm<sup>3</sup>. Para a determinação da potência instalada do sistema de geração de energia elétrica, deve-se considerar o PCI do biogás, a vazão máxima de biogás e a eficiência de conversão do gerador de energia elétrica, calculada através da equação 10. Para o sistema, considerou-se a utilização de um motor ciclo otto, de 1.000 kW de potência, que de acordo com Gehring (2014), possui uma eficiência de 42,20%. Portanto, serão necessários cinco motores para obter-se a capacidade instalada de 5.000 kW, como mostra a tabela 9.

A opção por geradores com potência menor do que a necessária, se deu pela possibilidade de modular o sistema, facilitando a manutenção preventiva dos grupos geradores, e que possíveis avarias nos módulos não causem tanto impacto na geração de energia elétrica na planta instalada.

Tabela 9 - Potência Instalada do sistema de geração de energia elétrica.

Potencial energia elétrica	kW
Potência instalada	5.000

Fonte: Próprio autor.

Com o sistema de geração de energia elétrica já definido, pode-se calcular, por meio da equação 11, a produção de energia elétrica, através dos mesmos dados considerados para a definição da potência instalada. A tabela 10 traz os valores obtidos e mostra que a geração de energia elétrica anual, chega à produção de 28.146.136,34 kWh.

Tabela 10 - Produção de energia elétrica do período de Julho/2016 a Junho/2017.

Mês	<i>E</i> (kWh)
Julho	2.523.262,20
Agosto	2.244.321,74
Setembro	2.482.002,49
Outubro	2.086.033,23
Novembro	2.880.534,12
Dezembro	2.235.890,71
Janeiro	3.189.740,88
Fevereiro	1.920.567,31
Março	2.672.733,95
Abril	1.506.041,52
Maiο	1.893.373,10
Junho	2.511.635,09
Acumulado	28.146.136,34

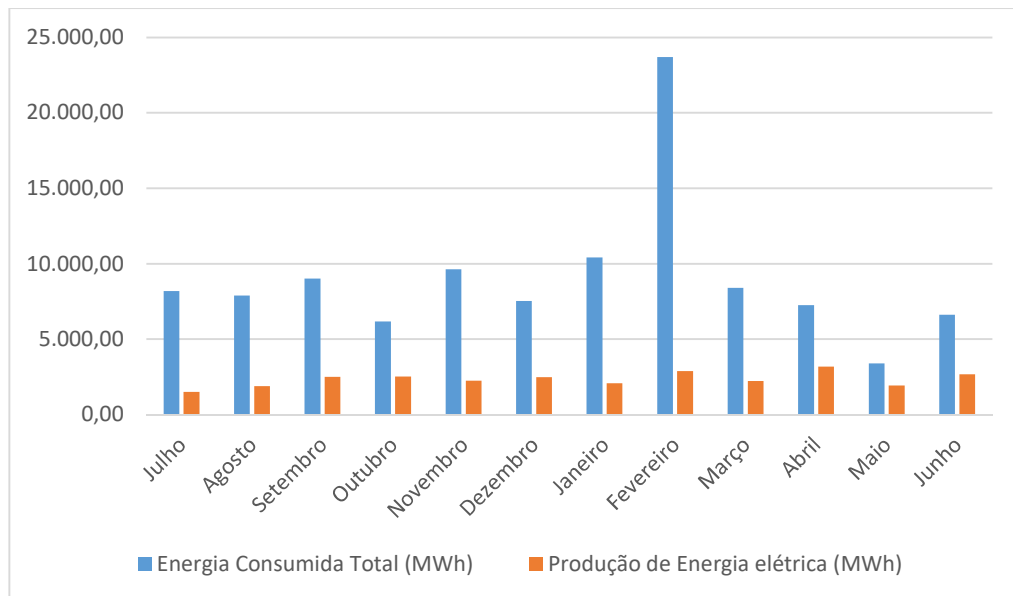
Fonte: Próprio autor.

A figura 14 mostra a produção de energia elétrica no período de Julho/2016 a Junho/2017, e o consumo de energia elétrica da indústria durante o ano. A produção



de bioeletricidade proveniente do biogás da vinhaça, representa cerca de 26% de toda a energia elétrica consumida pela indústria.

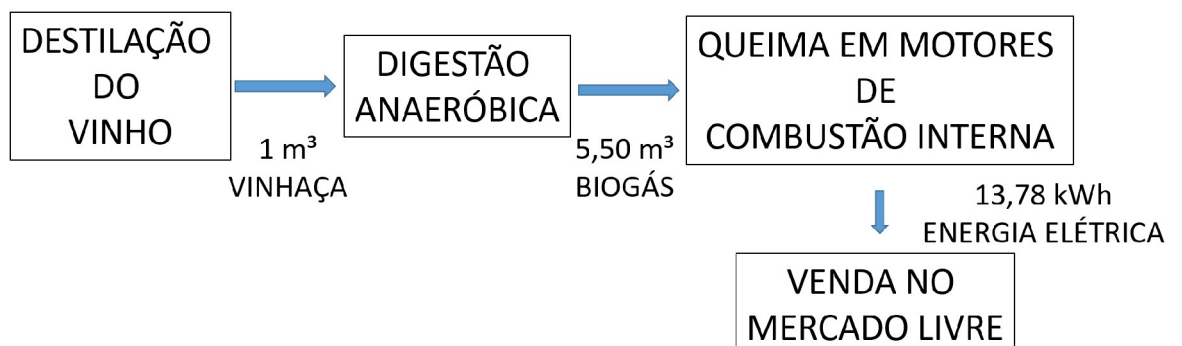
Figura 14 - Gráfico de produção e consumo de energia elétrica (MWh) no período de Julho/2016 a Junho/2017.



Fonte: Próprio autor.

A figura 15 apresenta um fluxograma com o processo de conversão energética e as relações do balanço energético em cada etapa.

Figura 15 - Fluxograma de conversões energéticas.



Fonte: Próprio Autor.

Para cada m<sup>3</sup> de vinhaça, nesta análise, foi possível obter 5,50m<sup>3</sup> de biogás através da digestão anaeróbia em reatores UASB, e 13,78 kWh de energia elétrica por meio da queima em motores de combustão interna.

### 4.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Para a análise de viabilidade econômica é necessário considerar os custos do investimento do sistema, os custos de operação e manutenção e os custos de venda da energia elétrica gerada (receita). Toda a energia elétrica produzida a partir do biogás será vendida para a rede, pois a produção de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar já gera excedente de energia na indústria, ou seja, a usina consome menos do que já produz.

Nos custos de investimento do projeto estão inseridos:

- Construção do reator UASB;
- Sistema de tubulações;
- Sistema de lavagem de gases;
- Construção de um barracão para os geradores;
- Grupo moto geradores e painéis elétricos; e
- Serviços de projeto, instalação e comissionamento.

Na construção de reator UASB deve-se considerar a aquisição de materiais construtivos como armação e concreto, com equipamentos, como o separador de gases e tubulações de distribuição, assim como a mão de obra.

O sistema de tubulações é referente às linhas de distribuição do biogás e do efluente, considerando os custos com a montagem mecânica, acessórios como válvulas e flanges, e sistema de bombeamento.

O sistema de lavagem de gases inclui os equipamentos necessários como o secador, a torre de adsorção e exaustor, e a instalação elétrica e mecânica.

O barracão para os geradores foi estimado de acordo com os materiais construtivos e custos de mão de obra.

Os custos do grupo de moto geradores foram obtidos por meio dos fabricantes com as devidas taxas de transporte e impostos aplicadas nos equipamentos, juntamente com toda a instalação elétrica necessária.

Considerando como premissa todos estes fatores, Gehring (2014) desenvolveu um estudo que obteve uma média de 1.991,08 R\$/kW de potência instalada, que foi

utilizada neste trabalho, com as devidas atualizações e correções monetárias de acordo com o índice IGP-M (Índice Geral de Preços do Mercado) (FGV) para o mês de junho de 2017. A tabela 11 apresenta os índices utilizados e o valor corrigido.

Tabela 11 - Custos de Investimento do projeto.

Custo de Investimento	Unidade	Valor	Valor Corrigido
Construção do reator UASB			
Sistema de tubulações			
Sistema de lavagem de gases			
Barracão para os geradores	R\$/kW	1.991,08 <sup>a</sup>	2.394,83 <sup>b</sup>
Grupo moto geradores			
Serviços de projeto, instalação e comissionamento			

Fonte: Próprio autor, adaptado de: a) Gehring (2014). b) atualização e correção - FGV (2017).

Nos custos com operação e manutenção, considerou-se:

- Custos com produtos químicos utilizados para a estabilização dos reatores UASB;
- Custo de operação e manutenção nos reatores UASB;
- Manutenção nos sistemas de tubulações;
- Manutenção do lavador de gases;
- Custos de operação dos moto geradores;

A tabela 12 traz os valores utilizados para os custos de operação e manutenção.

Tabela 12 – Custos de Operação e Manutenção considerados.

Operação e Manutenção	Unidade	Parâmetro de referência	Valor	Valor Corrigido
Produtos químicos utilizados nos reatores	R\$/m <sup>3</sup>	Produção de efluente	0,05 <sup>a</sup>	0,06
Reatores UASB	R\$/m <sup>3</sup>	Produção de efluente	0,55 <sup>a</sup>	0,70
Moto geradores	R\$/kWh	Geração de energia elétrica	0,02 <sup>b</sup>	0,02
Sistema de tubulações	%	Investimento em bombas do sistema	5 <sup>b</sup>	-
Lavador de gases	%	Investimento no sistema	5 <sup>b</sup>	-
Subestações	%	Investimento no sistema	2 <sup>b</sup>	-

Fonte: Próprio autor, adaptado de: a) Sperling (2013). b) Gehring (2014).

A usina em questão, comercializa a energia elétrica no mercado livre, que é baseado no Preço de Liquidação das Diferenças. Nessa modalidade, os valores de venda são muito instáveis e variam de acordo com a oferta e procura por energia no mercado. Ou seja, quando há crises de energia hídrica, os preços de venda para fontes como a biomassa são valorizados. Para a análise econômica, foram considerados os valores médios de venda de energia elétrica no PLD no último ano, como mostra a tabela 13.

Tabela 13 - Valores de venda do MWh no PLD para os meses do período considerado de Julho/2016 a Junho/2017.

Mês	R\$/MWh
Junho	124,74
Maio	411,49
Abril	371,47
Março	216,24
Fevereiro	128,43
Janeiro	121,44
Dezembro	122,19
Novembro	166,05
Outubro	200,21
Setembro	149,02
Agosto	115,58
Julho	83,43
Média	184,19

Fonte: Próprio autor, adaptado de CCEE (2017).

Na comercialização de energia elétrica, incidem alguns tributos que geram descontos significativos nas receitas. Segundo a CCEE (2017), os tributos incidentes são o ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) que com alíquota de 17% para o estado do Mato Grosso do SUL, PIS (Programa de Integração Social), com alíquota de 0,65% e o COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social) com alíquota de 3%.

Assim, o VPL foi calculado tomando como referência os valores médios do mercado livre, baseado no PLD (Preço de Liquidação das Diferenças) com os devidos

descontos dos tributos e dos custos de operação e manutenção. Segundo Gehring (2014), o tempo de vida útil do sistema considerado foi de 20 anos e uma taxa mínima de atratividade do projeto de 10,12%

Os resultados para a análise do VPL são apresentadas na tabela 14.

Tabela 14 - VPL para as médias mensais de venda de energia elétrica no PLD para o período considerado de Julho/2016 a Junho/2017.

Mês	R\$/MWh	VPL (R\$)
Junho	124,74	-8.629.281,34
Maio	411,49	45.450.202,87
Abril	371,47	37.902.649,39
Março	216,24	8.550.572,20
Fevereiro	128,43	-7.973.025,86
Janeiro	121,44	-9.288.365,23
Dezembro	122,19	-9.147.234,40
Novembro	166,05	-893.903,22
Outubro	200,21	5.534.135,84
Setembro	149,02	-4.098.514,03
Agosto	115,58	-10.391.067,48
Julho	83,43	-16.440.875,90
Média	184,19	2.582.821,19

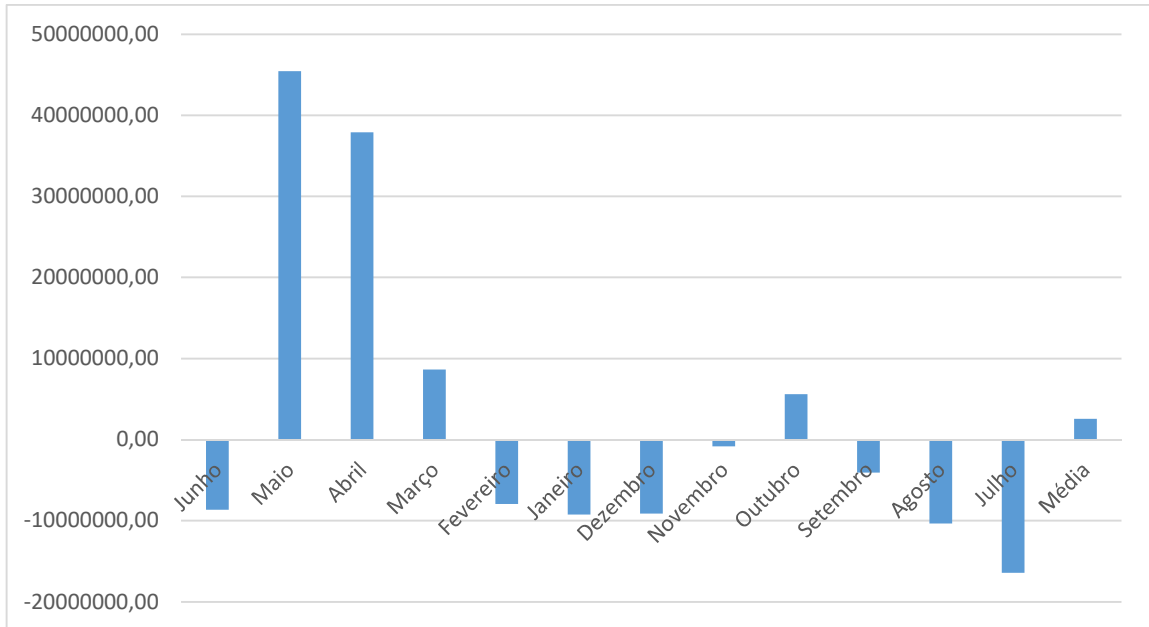
Fonte: Próprio autor.

A grande variabilidade de valores de venda de energia elétrica resulta em VPLs muito diferentes. O menor valor obtido foi de R\$ -16.440.875,90 resultado da venda a R\$83,43/MWh. Em contrapartida, o maior valor obtido foi de R\$ 45.450.202,87 resultado da venda a R\$ 411,49/MWh. O valor médio de venda durante o último ano foi de R\$184,19/MWh que resultou em um VPL positivo de R\$2.582.821,19, confirmando a viabilidade do projeto.

A figura 16 mostra o quão variável é o mercado de energia elétrica no sistema PLD, podendo verificar que os meses em que foram menos chuvosos, são os meses em que o valor da energia elétrica obteve melhor resultado para a venda. Nota-se,

através da média dos valores, que o projeto proposto é viável, resultando em um VPL positivo para o período considerado.

Figura 16 - Gráfico do cálculo do VPL (R\$) considerando os valores de venda de energia elétrica no PLD no período de Julho/2016 a Junho/2017.



Fonte: Próprio autor.

Mais de 20% do resultado da comercialização da energia elétrica é destinada ao pagamento de impostos. Uma segunda análise foi realizada, considerando incentivos do governo por meio da isenção da incidência do ICMS na venda de energia elétrica. A tabela 15 mostra os novos valores de VPLs obtidos.

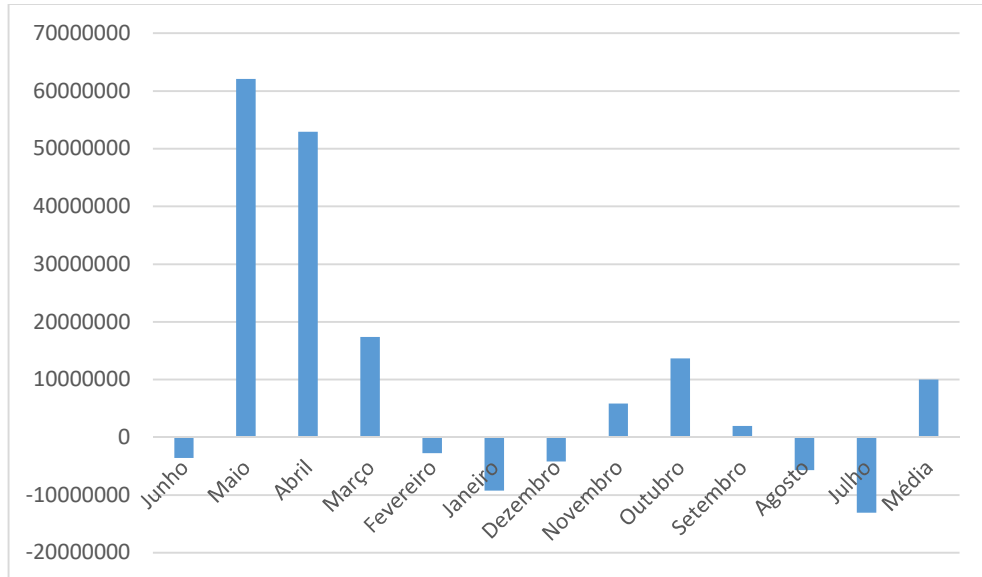
Tabela 15 - VPL para as médias mensais de venda de energia elétrica no PLD para o período de Julho/2016 a Junho/2017 com isenção do ICMS.

Mês	R\$/MWh	VPL (R\$)
Junho	124,74	-3.589.208,14
Maio	411,49	62.076.302,93
Abril	371,47	52.911.756,28
Março	216,24	17.268.206,92
Fevereiro	128,43	-2.795.418,44
Janeiro	121,44	-9.288.365,23
Dezembro	122,19	-4.221.190,25
Novembro	166,05	5.800.340,426
Outubro	200,21	13.605.527,11
Setembro	149,02	1.909.171,54
Agosto	115,58	-5.731.503,01
Julho	83,43	-13.077.426,7
Média	184,19	10.024.983,16

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que para o valor médio de venda de R\$184,19/MWh o VPL obtido foi de R\$10.024.983,16. Este valor representa um aumento de quase quatro vezes o valor obtido anteriormente, que considerava a incidência do ICMS. As altas taxas de impostos, por vezes, acabam inviabilizando projetos ou investimentos pois influenciam significativamente no retorno final. Neste caso, o projeto que já se apresentava viável, pode trazer benefícios financeiros mais significativos com a isenção do ICMS, que é a maior alíquota incidente nos valores de venda de energia elétrica. Portanto, enfatiza-se a importância dos incentivos governamentais para o desenvolvimento de projetos de eficiência energética. Na figura 17, os dados obtidos podem ser melhor visualizados por meio do gráfico.

Figura 17 - Gráfico do cálculo do VPL considerando os valores de venda de energia elétrica no PLD no período de Julho/2016 a Junho/2017 com isenção do ICMS.



Fonte: Próprio autor.

O segundo método de análise econômica utilizado foi da taxa interna de retorno. Neste método a taxa calculada é comparada e avaliada em relação à taxa mínima de atratividade do investimento. A tabela 16 mostra os valores para as taxas internas de retorno obtidas por meio dos cálculos.

Tabela 16 - Taxa interna de retorno obtidas na análise.

Análise	TIR
Sem isenção de impostos	13%
Com isenção de impostos	21%

Fonte: Próprio Autor.

Os valores de 13% e 21% representam as taxas de juros em que irá retornar o VPL do investimento igual a zero para os cálculos com impostos e com isenção de impostos, respectivamente. Ou seja, nas duas análises a TIR obtida foi superior à TMA considerada, resultando em um retorno do investimento maior do que o esperado, confirmando a viabilidade do investimento no projeto.



## 5 CONCLUSÃO

A matriz de energia elétrica brasileira é predominantemente composta por fontes renováveis, da qual 64% é representada pela energia hidráulica. A dependência que o país possui da fonte hídrica, por diversas vezes, provocou crises de abastecimento de energia elétrica na rede, ocasionada por longos períodos de estiagem. Isso mostra que o Brasil precisa de uma gestão energética eficiente com a diversificação da matriz que possui diversas fontes em potencial, dentre elas, a biomassa.

Firmando o compromisso ambiental e energético, o país apresentou diversas metas de redução nas emissões de gases de efeito estufa e de aumento da participação da bioenergia, apresentadas no acordo internacional, COP 21. Dentre as metas estão: o aumento da participação das energias renováveis, além da hídrica, para 23% da matriz de energia elétrica; a redução de emissões de gases poluentes de 43% em relação aos níveis de 2005; e o aumento da participação dos biocombustíveis, com destaque para o etanol. Nota-se a grande importância da biomassa para o cumprimento destas metas e para uma gestão energética mais eficiente.

As usinas sucroenergéticas têm função relevante no setor energético, através da produção do biocombustível etanol, e do aproveitamento de resíduos, utilizados como fontes da biomassa para geração de energia térmica e/ou elétrica aproveitados nos processos industriais, além de gerar eletricidade excedente para a rede. Atualmente, o setor passa por diversas dificuldades financeiras, decorrente de uma crise que desestabilizou a indústria da cana-de-açúcar, a qual possui relevante participação nos segmentos ambiental, social e econômico do país.

O principal resíduo da produção do etanol é a vinhaça, caracterizada por seu grande volume gerado, pois para cada litro de etanol produzido são gerados, em média, 13 litros de vinhaça. A alternativa encontrada pelas usinas é a aplicação da vinhaça nos campos como biofertilizante, devido à sua rica composição em nutrientes. Porém, em consequência da sua alta carga orgânica, quando aplicada de forma inadequada, pode causar impactos ambientais no solo, água e também com emissões de gases poluentes.

Os reatores UASB são mais comumente utilizados em estações de tratamento de esgoto, mas com pequenas adaptações podem ser utilizadas para tratamento da

vinhaça, obtendo elevados valores de eficiência de remoção da carga orgânica. No Brasil, algumas unidades sucroenergéticas já aplicam a tecnologia em período experimental e têm obtido resultados significativos.

A tecnologia de biodigestão anaeróbia da vinhaça não só diminui o potencial poluente, removendo grande parte da matéria orgânica, como também produz um biogás com elevado nível de metano. Portanto, o efluente resultante do processo de biodigestão ainda pode ser usado como biofertilizante, enquanto o biogás pode ser aproveitado energeticamente para queima e geração de energia elétrica.

Através das análises energéticas é possível perceber que a geração de energia por meio do biogás da vinhaça é expressiva e, por não ser utilizada, torna-se uma energia desperdiçada. Na usina estudada, a análise do período entre Julho/2016 a Junho/2017 mostrou que o potencial de geração de energia elétrica foi de 28.146.136,34 kWh, o que representa em torno de 26% de todo o consumo de energia elétrica da indústria. As análises econômicas demonstraram, por meio do VPL e da TIR, que o projeto é viável. O VPL traz um retorno positivo de R\$2.582.821,19 do investimento, com taxa de retorno superior ao esperado, de 13% para a venda de energia elétrica para a rede, considerando valores médios de venda através do PLD.

Em uma análise geral, o balanço energético resultou em 5,50 m<sup>3</sup> de biogás produzidos através da biodigestão anaeróbia em reatores UASB para cada m<sup>3</sup> de vinhaça aproveitada, e 13,78 kWh de energia elétrica produzida por meio de motores de combustão interna.

O mercado de venda de energia elétrica é muito instável e, durante o período, o preço oscilou mais de R\$ 300,00 entre o maior e menor valor pago pelo MWh. O risco financeiro é alto, devido às muitas variáveis que envolvem este mercado, sendo necessários incentivos governamentais para trazer mais equilíbrio e tornar a biomassa competitiva em meio às outras fontes. Os cálculos realizados com isenção do ICMS, por exemplo, apresentam retorno de R\$10.024.983,16 para o VPL, valor quase quatro vezes maior para o investimento, e taxa de interna de retorno de 21%.

A geração de energia elétrica através de motores de combustão interna é apenas uma das diversas formas que o biogás da vinhaça pode ser aproveitado. Outras propostas que podem ser também altamente vantajosas são a injeção de biometano na rede de gás natural ou a sua concentração e utilização veicular, sendo necessárias análises e estudos para determinação da sua viabilidade.

Por fim, ressalta-se o incentivo governamental para o investimento na eficiência energética nos processos da indústria sucroenergética, visto a situação econômica e estrutural que se encontra o setor atualmente. Os benefícios desta tecnologia se estendem não somente ao setor energético, como aos ganhos ambientais, sociais e tecnológicos para todo o país.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS COMERCIALIZADORE DE ENERGIA. **Cartilha Mercado Livre de Energia Elétrica: Um guia básico para consumidores potencialmente livres e especiais**. Brasília, 2016. Disponível em: <[http://www.abraceel.com.br/archives/files/Abraceel\\_Cartilha\\_MercadoLivre\\_V9.pdf](http://www.abraceel.com.br/archives/files/Abraceel_Cartilha_MercadoLivre_V9.pdf)> . Acesso em: 30 de junho de 2017.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - ANFAVEA. **Produção, vendas e exportação de veículos**. 2017. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/estatisticas.html>>. Acesso em 24 de junho de 2017.
- ASSOCIAÇÃO DE PRODUTORES DE BIOENERGIA DE MATO GROSSO DO SUL - BIOSUL. **Mapa da Bioenergia**. Disponível em: < <http://www.biosulms.com.br/institucional/associados.html>>. Acesso em 02 de abril de 2017.
- BRASIL. **Decreto nº. 19.717, de 20 de fevereiro de 1931**. Estabelece a aquisição obrigatória de álcool, na proporção de 5% da gasolina importada, e dá outras providências. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1930-1949/D19717.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1930-1949/D19717.htm)>. Acesso em: 20 de junho de 2017.
- BRITO et al, **A dialética da segurança energética e a interdependência das nações: reflexões focadas no papel do petróleo e na dimensão brasileira**. In: MONIÉ, F; BINSZTOK, J. (Orgs). Geografia e Geopolítica do Petróleo. Rio de Janeiro: Mauad X, 2012.
- CHERUBIN, N. **Novidades tecnológicas para a produção do biogás**. Disponível em: <<http://revistarpanews.com.br/edicoes/178/ed178web.pdf>>. Acesso em 22 de junho de 2017.
- CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE. **Obrigações Fiscais na Comercialização de energia Elétrica – Consumidores Livres e Especiais**. Versão 2. Janeiro, 2017.
- CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE. **Preço Médio da CCEE**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/precos\\_medios?\\_afLoop=48654741719228#%40%3F\\_afLoop%3D48654741719228%26\\_adf.ctrl-state%3Dtzn3t03c0\\_62](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afLoop=48654741719228#%40%3F_afLoop%3D48654741719228%26_adf.ctrl-state%3Dtzn3t03c0_62)>. Acesso em 27 de junho de 2017.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Utilização De Restilo como Fertilizante em Solo Cultivado com Cana-de-açúcar – Relatório Final**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, 292p. 1982.
- CURY, M. R. **Matemática Financeira** – Edição 2, 2011. Disponível em: <<http://www.mauriciocury.com/Apostilas/Matem%C3%A1tica%20Financeira.pdf>>. Acesso em 27 de junho de 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2014**. Maio, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia**. Junho, 2016.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Editora: Agropecuária, 203p. Campinas, 2000.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Nacional Energético - 2016**. Disponível em:

< [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2016.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf)>. Acesso em 02 de abril de 2017.

LAMO, P. **Sistema produtor de gás metano através de tratamento de efluentes industriais**. Piracicaba. Codistil, 1991.

MACHADO, F. B. P. **Brasil, a doce terra – História do setor**. Disponível em: <<http://jornaldacana.com.br/Conteudo/HistoriadoSetor.asp>>. Acesso em 01 de abril de 2017.

MARCOVITCH, J. **Os Compromissos de Paris e os ODS 2030: Energia, Florestas e Redução de GEE**. São Paulo: FEA/USP, 2016. Disponível em: <<https://www.usp.br/mudarfuturo/cms/>>. Acesso em 05 de abril de 2017.

MARQUEZAN, L. H. F. **Análise de Investimentos**. Revista eletrônica contabilidade – Curso de Ciências Contábeis. UFSM, vol. III, 2006. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/contabilidade/article/viewFile/21/3644vpl>>. Acesso em 22 de junho de 2017.

MERCADO LIVRE DE ENERGIA ELÉTRICA. **Visão Geral: Mercado Livre (ACL) x Mercado Catixto (ACR)**. Disponível em: <http://www.mercadolivredeenergia.com.br/>>. Acesso em: 30 de junho de 2017.

NOVACANA – **Globo Rural faz balanço da crise do setor de cana-de-açúcar**. Junho, 2016. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/cana/safra/globo-rural-balanco-crise-setor-cana-de-acucar-060616/>>. Acesso em 24 de junho de 2017.

PASSOS, R. R. G. **Avaliação Energético-Econômica da Utilização da Vinhaça Via Biogás ou Evaporação Seguida de Incineração**. 2014, 47p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

PEREIRA, T. P. **Avaliação de Opções e Custos de Mitigação das Emissões de GEE Utilizando a Cana-de-açúcar**. 2014, 98p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2014.

PIRES, R. W. **O (Uso do) Discurso Ambiental como Elemento para a Consolidação do Setor Agroenergético no Sudoeste de Goiás**. 2014, 188p.

Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Goiás, Jataí, GO, 2014.

POVEDA, M. M. R. **Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético**. 2014. 150 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

PUCCINI, E. C. **Matemática Financeira e Análise de Investimentos**. Florianópolis, Departamento de Ciências da Administração. Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

SOUZA, Z. Bioeletricidade: Mais de 50 Usinas Já Receberam o Selo Energia Verde. Abril, 2017. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/4450445792036376298/mais-de-50-usinas-ja-receberam-o-selo-energia-verde/>>. Acesso em: 18 de junho de 2017.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA. **Relatório final da safra 2013/2014**. Departamento de Economia e Estatística. 2015.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA. **Relatório final da safra 2015/2016**. Departamento de Economia e Estatística. 2017.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA. **Boletim: A Bioeletricidade da Cana em Números – Março 2017**. Departamento de Economia e Estatística. 2017.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **A indústria Brasileira da Cana-de-Açúcar: Uma trajetória de Evolução**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/linhadotempo/index.html>>. 2016.

SALOMON, K. R. **Análise Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá - MG. Novembro, 2007.

SOUZA, M. E.; FUZARO, G.; POLEGATO, A. R. **Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor**. Sixth international symposium on anaerobic digestion, 1991, p.191-200.

SPERLING, M. V. **Tecnologias de Tratamento de Esgotos**. IV Seminário Internacional de Engenharia de Saúde Pública. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

THEODORO. J. M. P. **Considerações sobre os custos ambientais decorrentes do gerenciamento dos resíduos sólidos e dos efluentes industriais gerados no setor sucroalcooleiro: um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Centro Universitário de Araraquara, Araraquara. 2005

## ANEXO A – MEMORIAL DE CÁLCULO

De acordo com a metodologia utilizada, abaixo será demonstrado o memorial de cálculo do dimensionamento do sistema de biodigestão anaeróbia, exemplificando o desenvolvimento dos cálculos energéticos para o mês de janeiro, o qual foi o mês com maior produção de vinhaça na usina.

- Determinação do volume do reator

$$COV = \frac{Q * S_0}{V} \quad (2)$$

$$V = \frac{7.800 * 19,7}{30} = 5.122 \approx 5.200m^3$$

Onde:

$COV$  – Carga orgânica volumétrica ( $Kg_{DQO}/m^3.dia$ );

$S_0$  – Carga orgânica inicial ( $kg_{DQO}/m^3$ ).

- Determinação da carga hidráulica volumétrica

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

$$CHV = \frac{7.800}{5.200} = 1,5$$

Onde:

$CHV$  – Carga hidráulica volumétrica ( $m^3/m^3.d$ );

$Q$  – Vazão diária de Vinhaça ( $m^3/dia$ );

$V$  – Volume do reator ( $m^3$ );

- Determinação do tempo de detenção hidráulica

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

$$TDH = \frac{5.200}{7.800} = 0,67$$

Onde:

$TDH$  – tempo de detenção hidráulica (dia);

- Determinação da eficiência energética do reator

$$E_{DQO} = 66,229 * TDH^{0.1288} \quad (4)$$

$$E_{DQO} = 66,229 * 0,67^{0.1288} = 62,86\%$$

Onde:

$E_{DQO}$  – Eficiência em termos de redução de DQO (%).

- Determinação da concentração de DQO final na vinhaça

$$S = 1 - \frac{E_{DQO} * S_0}{100} \quad (5)$$

$$S = 1 - \frac{62,86 * 19,7}{100} = 7,32mg/l$$

Onde:

$S$  – concentração final de DQO do efluente (mg/l);

$S_0$  –concentração inicial de DQO do efluente (mg/l).

- Determinação da carga orgânica convertida em metano (mês de janeiro)

$$DQO_{CH_4} = Q * (S_0 - S) - Y_{obs} * Q * S_0 \quad (6)$$

$$DQO_{CH} = 231.540 * (19,7 - 7,32) - 0,23 * 231.540 * 19,7$$

$$DQO_{CH} = 1.818.104,7 \text{ kg.DQO}_{CH} /d$$

Onde:

$DQO_{CH}$  – Carga orgânica convertida em metano (kg.DQO<sub>CH4</sub>/d);



$Y_{obs}$  – coeficiente de produção de sólidos no sistema (0,23 kg.DQO<sub>lodo</sub>/kg.DQO<sub>apl</sub>) (Gehring, 2014).

- Determinação da produção volumétrica de metano (mês de janeiro)

$$K(t) = \frac{P * K_{DQO}}{R * (273 + t)} \quad (8)$$

$$K(t) = \frac{1 * 64}{0,08206 * (273 + 55)} = 2,37$$

Onde:

$P$ - Pressão atmosférica (1 atm);

$R$  –Constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.°K);

$K_{DQO}$  – DQO correspondente a um mol CH<sub>4</sub> (64 gDQO/mol).

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (7)$$

$$Q_{CH_4} = \frac{1.818.104,7}{2,37}$$

$$Q_{CH_4} = 764.617,64 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Onde:

$Q_{CH_4}$  – produção volumétrica de metano (m<sup>3</sup>/dia);

$K$  – Fator de correção da temperatura operacional do reator (kg.DQO/m<sup>3</sup>);

$t$  – temperatura operacional do reator.

- Determinação da produção volumétrica de biogás (mês de janeiro)

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (9)$$

$$Q_{biogás} = \frac{764.617,64}{0,6}$$

$$Q_{biogás} = 1.274.362,73 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Onde:

$C_{CH_4}$  – Teor de produção de metano no biogás;

$Q_{biogás}$  – Produção volumétrica de biogás (m<sup>3</sup>/dia).

- Determinação da produção de energia elétrica (mês de janeiro)

$$E = Q_{biogás} * PCI_{biogás} * \eta_{gerador} * \frac{4,1868}{3600} \quad (11)$$
$$E = 1.274.362,73 * 5.100 * 0,422 * \frac{4,1868}{3600} = 3.189.740,88 \text{ kWh}$$
$$E = 3.189.740,88 \text{ kWh}$$

Onde:

3600 – Fator de conversão para horas.