

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS  
DE VINHAÇA NO ESTADO DE SÃO PAULO**

**Rebeca Prado**

**São Paulo  
2014**

**Rebeca Prado**

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS  
DE VINHAÇA NO ESTADO DE SÃO PAULO**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientação:  
Profa. Dra. Suan Teixeira Coelho

**São Paulo  
2014**

## FICHA CATALOGRÀFICA

**Ferreira, Rebeca**

**Análise do Aproveitamento Energético do Biogás de  
Vinhaça no Estado de São Paulo./ R. Ferreira – São Paulo.**

**2013**

**46 p.**

**Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.**

**1. Biogás 2. Vinhaça 3. Biodigestão Anaeróbia  
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de  
Educação Continuada em Engenharia III. t.**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA POLI USP**

**REBECA PRADO**

*ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE VINHAÇA  
NO ESTADO DE SÃO PAULO*

Monografia defendida e aprovada em 13/03/2014 pela Comissão Julgadora:

---

Profa. Dra. Suani Teixeira Coelho – CENBIO/IEE/USP  
Presidente

---

Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

---

Profa. Vanessa Pecora Garcilasso

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Eloísa e Luiz Roberto por todo o apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

## RESUMO

**FERREIRA, R. Análise do aproveitamento energético do biogás de vinhaça no estado de São Paulo.** 2013. 47f. Monografia – Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Oitenta e um porcento da atual oferta energética mundial é dominada pelos combustíveis fósseis. Entre 2000 a 2030 a demanda de energia no mundo aumentará 1,7%. Tendo em vista o desenvolvimento sustentável, busca-se reduzir a poluição e exaustão dos recursos naturais, utilizando fontes renováveis. O fato é que os recursos naturais existentes para a produção de energia são finitos, buscando-se assim, a produção de energia por fontes alternativas. O Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar, e consequentemente de resíduos, como a vinhaça. Uma forma alternativa de sua utilização é na produção de energia, através de biodigestão anaeróbia gerando então o biogás, que é considerado fonte de energia renovável. A biodigestão anaeróbia da vinhaça é feita por meio de reatores, os chamados biodigestores. Este trabalho teve como objetivo fazer uma análise do aproveitamento energético do biogás de vinhaça no estado de São Paulo. Foram analisados alguns exemplos de produção de biogás da vinhaça, assim como a sua composição, o processo de biogestão, reator que mais se adapta ao processo e legislações aplicáveis. Como resultado pode-se concluir que a biodigestão anaeróbica da vinhaça apresenta um potencial elevado na geração de energia elétrica, trazendo inúmeras vantagens para o meio ambiente, inclusive na questão de gerenciamento de resíduos. Porém, o processo ainda enfrenta algumas dificuldades na implementação, devido à obtenção de financiamento, políticas públicas, e a falta de informação de algumas indústrias que se recusam a experimentar novas alternativas.

**Palavras-chave:** Vinhaça, Biodigestão Anaeróbia, Biodigestores, Energias Renováveis, Biogás.

## ABSTRACT

**FERREIRA , R. Analysis of energetic use of biogas from stillage in the state of São Paulo.** 2013. 47f . Monografia – Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Eighty-one percent of the current world energy supply is dominated by fossil fuels. Between 2000 and 2030, the demand for energy will increase 1.7% worldwide. Taking into consideration sustainable development, we now seek to reduce pollution and the depletion of natural resources by using renewable sources. Brazil is one of the biggest producers of sugar cane, and consequently, residues such as vinasse. An alternative way of using vinasse is to produce energy with it through anaerobic digestion, then generating biogas, which is considered a renewable energy source. The anaerobic digestion of vinasse is done through reactors, called digesters. This study aimed to analyze the energy of biogas from vinasse in the state of São Paulo. Some examples of biogas production from vinasse, according to research reactor that best suits the process and applicable laws were reviewed, as well as its composition. As a result it can be concluded that anaerobic digestion of vinasse using has a high potential in generating electricity. Bringing numerous benefits to the environment issue in waste management. But the process still faces some difficulties in implementation due to obtaining finance, public policy, and lack of information of certain industries that refuse to try new alternatives.

**Key words :** Vinasse , Anaerobic Digestion , Biogas plant , Renewable Energy , Biogas .

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Evolução da produção de álcool e vinhaça ao longo das safras	12
Figura 2	Consumo final energético brasileiro por fonte – Ano 2011	15
Figura 3	Geração elétrica por energético no Brasil participação	16
Figura 4	Diagrama simplificado para a produção de álcool e geração de vinhaça.	20
Figura 5	Processo de Biodigestão Anaeróbia	27
Figura 6	Corte Esquemático do Reator UASB	29
Figura 7	Esquema de Purificação do Biogás.	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos	31
Tabela 2	Quadro comparativo das características do biogás	35

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>9</b>
 <b>INTRODUÇÃO</b>	 <b>12</b>
 <b>1. A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E A PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA</b>	 <b>15</b>
 <b>2. A CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL</b>	 <b>17</b>
2.1. O CICLO PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL E AÇÚCAR	17
2.2. A CANA-DE-AÇÚCAR COMO RECURSO ENERGÉTICO	17
2.3. VINHAÇA: GERAÇÃO, APLICAÇÕES E IMPLICAÇÕES AO MEIO AMBIENTE	20
2.4. A LEGISLAÇÃO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO	23
2.4.1 Legislação do Estado de São Paulo	25
 <b>3. O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA</b>	 <b>27</b>
3.1. BIODIGESTORES ANAERÓBIOS	28
 <b>4. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DA VINHAÇA</b>	 <b>31</b>
4.1. POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE VINHAÇA	32
4.2. PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	32
4.3. PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS DE VINHAÇA	33
4.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS DE VINHAÇA	37

4.5. ESTUDO DE CASO – REGO & HERNANDEZ (2006)	38
4.5.1. Biodigestão da vinhaça durante o período da Safra	38
4.5.2. Biodigestão da vinhaça ao longo do ano	39
4.6. USINA ESTER (COSMÓPOLIS/SP)	40
<b>5. VIABILIDADE ECONÔMICA DOS PROJETOS DE BIODIGESTÃO</b>	<b>41</b>
 <b>CONCLUSÃO</b>	 <b>44</b>
 <b>REFERÊNCIAS</b>	 <b>45</b>

## INTRODUÇÃO

A necessidade de adoção de formas eficientes e ecologicamente corretas de geração de energia vem preocupando o mundo. Nesse sentido, têm-se buscado alternativas dentro do próprio setor industrial, através do aproveitamento de produtos e subprodutos do processo produtivo na geração de energia.

Dentre esses segmentos, destaca-se o sucroalcooleiro, visto que a cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil, desde o seu período colonial. No processo de aproveitamento industrial da cana-de-açúcar obtém-se o álcool e o açúcar como produtos principais e o bagaço e a vinhaça como subprodutos (LAMONICA, 2006).

Segundo ÚNICA (2007), a projeção para a safra 2012/13 é de uma colheita de aproximadamente 700 milhões de toneladas de cana para uma produção de 36 bilhões de litros de álcool e 39 milhões de toneladas de açúcar (Figura 1). Essa produção tem como principal motor as iniciativas que vem impulsionando o mercado de etanol no país, como o Proálcool e o desenvolvimento de carros bicombustíveis.

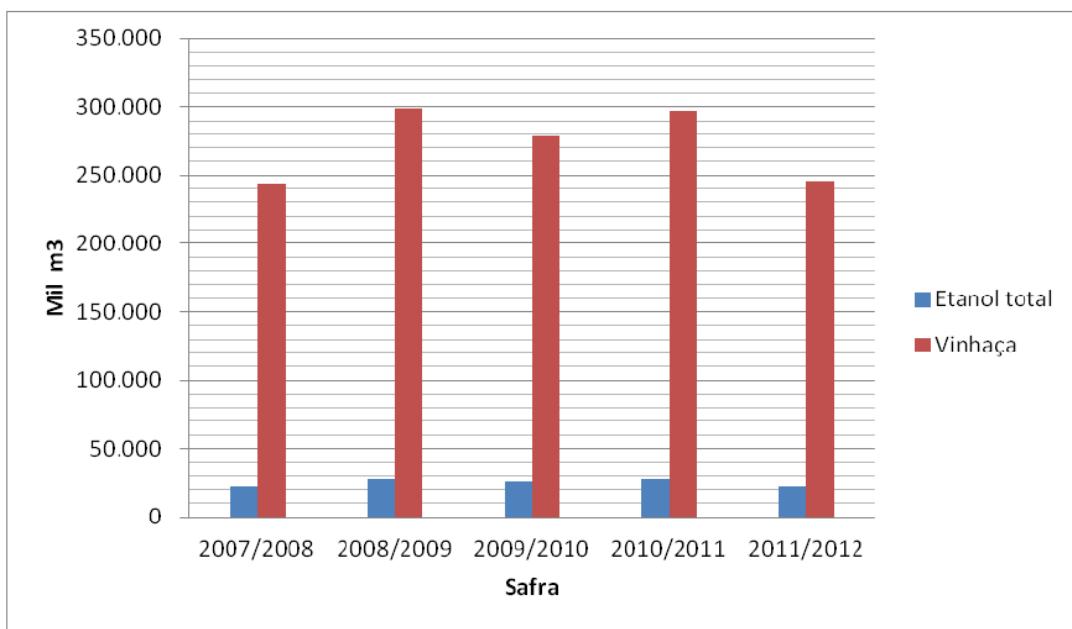


Figura 1. Evolução da produção de álcool e vinhaça ao longo das safras.

Fonte dados: ÚNICA (2012).

A vinhaça, um dos principais subprodutos da agroindústria canavieira, é resultante da destilação do vinho, que é o produto da fermentação do caldo da cana-de-açúcar ou do melaço no processo de fabricação do álcool. Usinas de grande porte no Brasil

apresentam uma produção média de 7 a 10 litros de vinhaça por litro de etanol (SALOMON, 2007).

Constituída principalmente de água, sais, sólidos em suspensão e solúveis, é possível sua utilização na lavoura como fertilizante em doses controladas, permitindo uma redução nos custos de plantio devido a diminuição do uso de fertilizantes (SALOMON, 2007). Vale salientar ainda que, quando aplicada em grandes concentrações, a vinhaça pode ser considerada um poluente de alto teor de orgânicos, demandando tratamento antes do seu lançamento nos corpos aquáticos. Dessa forma, os impactos produzidos pela vinhaça adquirem enorme importância e são estudadas técnicas para o seu aproveitamento.

Destaca-se ainda a utilização da vinhaça na alimentação de caldeiras a vapor, com a sua queima direta correspondendo o principal mecanismo de produção de energia através da biodigestão.

Esse método começou a se tornar atraente após o desenvolvimento de reatores de alto desempenho. Na década de 70, com a crise do petróleo, a tecnologia da biodigestão foi trazida para o Brasil. Índia e China são os países que originaram os modelos mais difundidos, que eram utilizados para aplicação rural devido ao grande volume de resíduo gerado.

O biogás gerado pode ser aproveitado de duas maneiras. Na queima direta de aquecedores, esquentadores, fogões e caldeiras; e na conversão em eletricidade, permitindo assim a produção de energia elétrica e térmica (POVEDA, 2006). O principal componente do biogás é o gás metano,  $CH_4$ . A sua combustão completa libera energia na forma de calor, que pode ser aproveitada para diversas finalidades.

O uso da biomassa como fonte renovável e sustentável de energia tem como principal justificativa a possibilidade de diversificar a matriz energética nacional, além de reduzir a emissão de gases efeito estufa. O aprimoramento dos reatores de alto desempenho fez com que passasse a ser estudado o aproveitamento da vinhaça para produção de biogás através da biodigestão anaeróbia.

Sendo assim, o objetivo principal deste estudo é analisar as opções de aproveitamento energético do biogás da vinhaça, através do estudo o processo de produção da vinhaça e suas diferentes utilizações, definição do conceito da biodigestão e caracterização dos biodigestores existentes, levantamento da legislação sobre resíduos agroindustriais na geração de energia e, por fim, apontar as vantagens e desvantagens do processo.

## 1. A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E A PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA

A energia renovável no Brasil representa mais de 45% de sua matriz energética. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2012, o bagaço de cana-de-açúcar e o etanol destacam-se entre as fontes renováveis, sendo responsável por 16,6% de toda a oferta primária de energia no país (Figura 2). Pode-se observar ainda que, para o ano de 2011, essa matriz energética produziu cerca de 532.872 GWh (Figura 3).

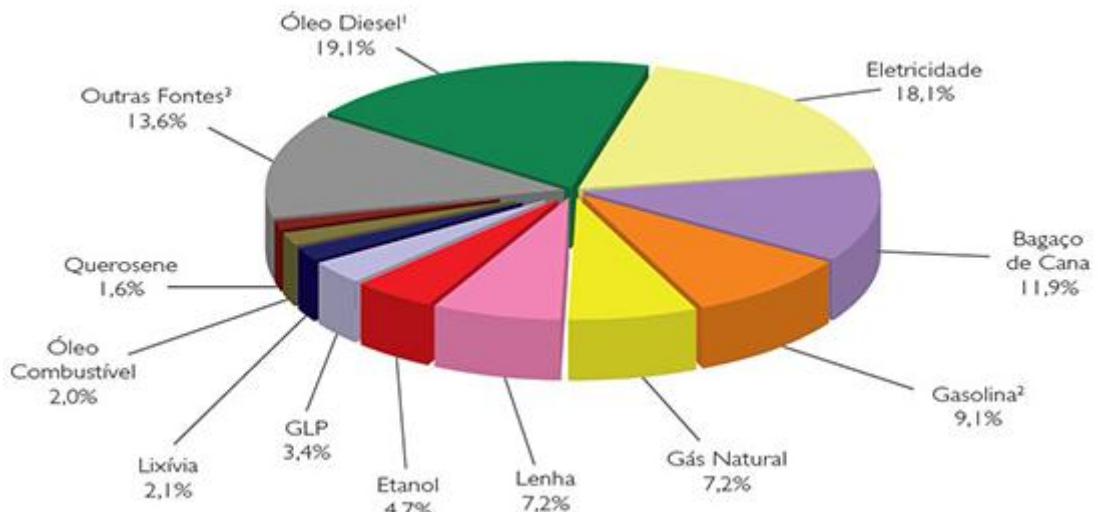
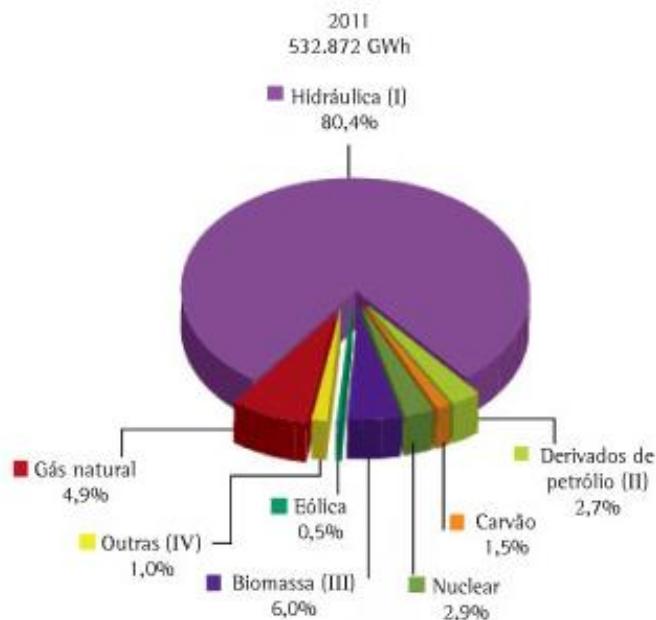


Figura 2. Consumo final energético brasileiro por fonte – Ano 2011

Fonte: <https://ben.epe.gov.br/BENResultadosPreliminares2012.aspx>

<sup>1</sup> (Inclui biodiesel) ; <sup>2</sup> Inclui apenas gasolina A (automotiva); <sup>3</sup> Inclui lixívia, óleo combustível, gás de refinaria, coque de carvão mineral e carvão vegetal, dentre outros



Nota:

- I) Inclui autoprodução
- II) Dericados de petróleo: óleo diesel e óleo combustível
- III) Biomassa: lenha, bagaço de cana e lixívia
- IV) Outras: recuperações, gás de coqueira e outros secundários

Figura 3 – Geração elétrica por energético no Brasil participação.

Fonte: EPE, 2012.

A biomassa de maior representatividade na matriz energética brasileira é o bagaço de cana-de-açúcar, e é responsável pelo suprimento de energia térmica, mecânica e elétrica nas unidades produtoras de açúcar e álcool. A principal utilização da biomassa tradicional (lenha) é para a produção de carvão vegetal. Já a denominada biomassa moderna, pode ser utilizada na auto-geração de energia, com o uso de resíduos agroindustriais, e como biocombustível no setor de transportes com a utilização do etanol.

## 2. A CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL

### 2.1. O CICLO DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL E AÇÚCAR

A cana-de-açúcar passa por algumas etapas no processo de produção de etanol e açúcar, descritas abaixo:

- É encaminhada à usina após a colheita onde passa pelo processo de lavagem para retirada de materiais indesejados decorrentes do processo como pedras, areia e outros materiais;
- Na sequência, a cana-de-açúcar passa por um desfibrador com a finalidade de aumentar a densidade e a abertura das células do colmo de cana, isso permite a otimização da quantidade de caldo extraído;
- A cana-de-açúcar é então enviada ao conjunto de moendas onde é retirado o caldo no qual o açúcar encontra-se dissolvido;
- Desse processo se obtém o caldo, cujo rendimento de extração varia de 92% a 97% e bagaço com teor de umidade final de aproximadamente 50%;

O bagaço da cana é constituído de 46% de fibra, 50% de umidade e 4% de sólidos dissolvidos. A quantidade de bagaço obtido por tonelada de cana moída é de 240 kg a 280 kg (MACEDO; CORTEZ, 2005). O teor energético de bagaço é de 30% a 40% da energia total da planta (BRAUNBECK; CORTEZ, 2005).

Utilizada através de combustão direta, o que acarreta na produção de poluentes atmosféricos, a biomassa pode também ser convertida em uma variedade de formas de energia como calor, vapor, eletricidade, hidrogênio, metano, etanol e metanol.

### 2.2. A CANA-DE-AÇÚCAR COMO RECURSO ENERGÉTICO

Segundo Oliveira (2007), a cana de açúcar constitui grande potencial gerador de energia, além da vantagem de ser uma fonte renovável, compreendendo ainda um dos principais produtos agrícolas do Brasil e sendo cultivada desde a época da colonização.

A cana-de-açúcar tem o mais alto retorno para os agricultores por hectare plantado. O custo de produção do açúcar no país é baixo (inferior a US\$ 200/toneladas), podendo dessa maneira competir no mercado internacional. Tal mercado é, entretanto, volátil e apresenta grandes oscilações de preços.

O principal programa nacional de incentivo a utilização do Álcool e que impulsionou o mercado da cana-de-açúcar foi o *Proálcool*, criado em 14 de novembro de 1975 pelo decreto nº 76.593, com o objetivo de estimular a produção do álcool, visando o atendimento das necessidades do mercado interno e externo e da política de combustíveis automotivos.

De acordo com o decreto, a produção do álcool oriundo da cana-de-açúcar, da mandioca ou de qualquer outro insumo deveria ser incentivada por meio da expansão da oferta de matérias-primas, com especial ênfase no aumento da produção agrícola, da modernização e ampliação das destilarias existentes e da instalação de novas unidades produtoras, anexas a usinas ou autônomas, e de unidades armazenadoras.

De 1975 a 2000, foram produzidos cerca de 5,6 milhões de veículos a álcool hidratado. Acrescido a isso, o Programa substituiu por uma fração de álcool anidro (entre 1,1% a 25%) um volume de gasolina pura consumida por uma frota superior a 10 milhões de veículos a gasolina, evitando, assim, nesse período, emissões de gás carbônico da ordem de 110 milhões de toneladas de carbono (contido no CO<sub>2</sub>), a importação de aproximadamente 550 milhões de barris de petróleo e, ainda, proporcionando uma economia de divisas da ordem de 11,5 bilhões de dólares.

Já em 2001, quando o Brasil foi afetado por uma grave crise de abastecimento de energia, a utilização de fontes alternativas ganhou novo destaque. Os preços da eletricidade atingiram valores altíssimos, e vários produtores do setor sucroalcooleiro que já vinham produzindo energia através dos seus resíduos perceberam a oportunidade do mercado. Assim, muitas usinas estão trocando seus equipamentos antigos por equipamentos mais eficientes na intenção de produzir excedente de eletricidade a ser comercializado GUARDABASSI (2006).

Porém, um dos maiores incentivos do etanol é o fato de o mesmo ser menos poluente do que a gasolina, e ser uma fonte de energia renovável, já que a mesma é derivada do petróleo, portanto um recurso natural finito. Gonçalves (2005), ainda cita os benefícios ambientais da utilização do etanol estão:

- A absorção de gás carbônico da atmosfera à medida em que a cana-de-açúcar se desenvolve;
- O menor nível de poluentes emitidos na sua queima;
- Capacidade de substituir solventes e aditivos da gasolina, contribuindo para a melhoria do ar nas grandes cidades.

Atualmente, cientistas buscam outra opção para produção e utilização do etanol oriundo da cana-de-açúcar: o etanol celulósico. Em fase de testes, este etanol é extraído da celulose proveniente das paredes celulares da planta, tais como o bagaço, o caule e as folhas, usadas aí como matérias-primas. A tecnologia consiste na quebra da celulose do bagaço através de enzimas, extraindo o açúcar. Apresenta vantagens em relação aos etanóis produzidos através de outras matérias-primas, principalmente devido a utilização da lignina (subproduto produzido quando a água é retirada da celulose) como combustível para alimentar as plantas na produção de etanol. Se a lignina puder ser controlada, pode tornar o processamento de etanol autossustentável.

Entre 2014 e 2015 acredita-se que no Brasil o etanol celulósico seja produzido em escala comercial. Três usinas devem entrar em operação e juntas produziram 160 milhões de litros por ano, o que demandará um investimento de cerca de R\$ 800 milhões. A primeira planta de etanol celulósico foi inaugurada em outubro de 2013 em Crescentino na Itália e possui capacidade de gerar 78.000 m<sup>3</sup>/ano, produzindo etanol a partir dos resíduos agrícolas e biomassa local.

No Brasil a primeira usina de etanol celulósico está em fase final de construção. Localizada no Município de São Miguel dos Campos, em Alagoas, a usina da está com 85% das obras concluídas e o início das operações é esperado para ainda este ano. A unidade receberá o nome de BioFlex e já possui as certificações de Biossegurança concedida pela Comissão Técnica de Biossegurança (CTNBio). Acredita-se que até o ano de 2020 outras empresas utilizarão essa tecnologia aumentando a produção de combustível (ÚNICA, 2013). Enquanto esta tecnologia não se expande, outros caminhos são explorados para a produção de biocombustíveis.

### 2.3. VINHAÇA: GERAÇÃO, APLICAÇÕES E IMPLICAÇÕES AO MEIO AMBIENTE

A vinhaça, também conhecida como vinhoto, calda, tiborna, restilo, garapão, vinhoto, caxixi, mosto, entre outros nomes, é um resíduo ou subproduto gerado no processo de fermentação na fabricação do etanol (POVEDA, 2012).

Theodoro (2005), afirma que para cada 1000 t de cana processada, são gerados 360 m<sup>3</sup> de vinhaça, dando uma dimensão do resíduo gerado. De acordo com Poveda (2012), apesar de a vinhaça apresentar elevado teor de matéria orgânica, com Demanda Química de Oxigênio (DQO) entre 20.000 e 35.000 mg.L<sup>-1</sup> e pH variando de 3,7 a 5, esta é rica em nutrientes minerais como potássio, cálcio e enxofre.

Apresenta uma suspensão aquosa contendo, em média 93% de água e 7% de sólidos, dos quais 75 % são orgânicos e biodegradáveis e os 25% restantes correspondem à fração mineral. Sua extração é feita no processo de destilação a uma temperatura que varia de 100 a 110°C, conforme diagrama apresentado na Figura 4.

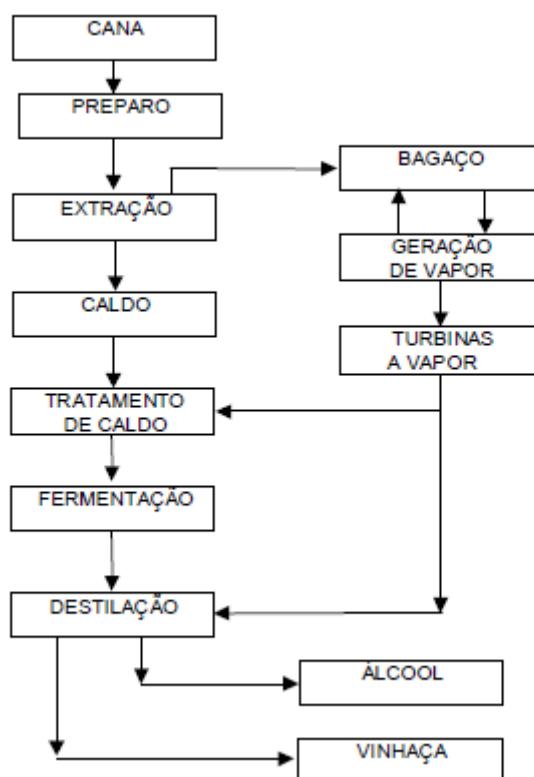


Figura 4. Diagrama simplificado para a produção de álcool e geração de vinhaça.

Fonte: LAMONICA, 2006.

A produção crescente de etanol no Brasil que teve lugar com a implementação do Proálcool levou, inevitavelmente, ao aumento da produção da vinhaça, agravando, portanto, o problema do destino do resíduo. Como cada litro de álcool origina cerca de 12 litros de vinhaça (HASSUDA, 1989), o crescimento da produção deste resíduo foi vertiginoso. O volume de vinhaça gerado anualmente no país pode ser estimado, tendo em vista a produção atual de álcool, em algo em torno de 192 bilhões de litros (HASSUDA, 1989).

Sabendo-se que a produção anual de álcool pela agroindústria canavieira paulista alcança 8 bilhões de litros, o que equivale a 50% da produção nacional de álcool, estima-se que o volume total de vinhaça gerada anualmente no Estado de São Paulo deve chegar aos 96 bilhões de litros (HASSUDA, 1989).

Para que se tenha ideia do impacto ambiental que esse volume de vinhaça engendra, pode-se recorrer a uma comparação entre esse resíduo e o esgoto doméstico. Compara-se o impacto ambiental de um litro de vinhaça ao esgoto doméstico não tratado, gerado por 1,43 pessoas. Ou seja, para se produzir dez litros de álcool, a poluição gerada é equivalente àquela produzida por aproximadamente 172 pessoas em um dia. Seguindo esta metodologia de cálculo, estima-se que o impacto ambiental da vinhaça obtida como subproduto da produção anual de álcool no Brasil (para a safra de 2010/2011<sup>1</sup>) equivale ao esgoto doméstico não tratado produzido em um ano por aproximadamente 429 milhões de pessoas.

Segundo Freire e Cortez (2000) desde 1994 a vinhaça é classificada, pelas Normas da ABNT, como “resíduo classe II”, não inerte, ou seja, não perigoso, com base em suas características físico-químicas e na adequação do sistema de sua aplicação, não implicando em contaminação das águas subterrâneas ou danos ao meio ambiente e saúde pública.

No entanto, segundo os mesmos autores, o seu despejo em rios e lagos vem causando sérios problemas ambientais, ao ponto de tal prática ter sido proibida no país no final dos anos 70, obrigando as indústrias a optarem por outras formas de descarte. A partir dessa proibição, a vinhaça passou a ser utilizada para fertirrigação, por meio de caminhões-tanque e sistemas de irrigação por aspersão e sulcos de infiltração.

Entretanto, se utilizada de maneira incorreta para a adubação de plantações a vinhaça pode derrubar os índices de oxigênio na água e afetando ainda depósitos

---

<sup>1</sup> 25 bilhões de litros de etanol (CONAB)

subterrâneos, além de acúmulo de potássio no solo em níveis tóxicos (CABELLO, 2009). Prevendo o perigo desse uso indiscriminado, órgãos regulatórios, como a CETESB, se preocuparam em criar uma legislação que controlasse as quantidades seguras para aplicação.

Foi criada então, em janeiro de 2005, a Norma Técnica P.4231. Vinhaça – Critérios e Procedimentos para Aplicação no Solo Agrícola, que considera amplamente a necessidade de controlar o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça no solo (CETESB, 2006). Dentre todos os parâmetros estabelecidos na Norma, o mais importante é a dosagem máxima de vinhaça estabelecida a ser aplicada no solo em culturas de cana-de-açúcar. Foi então criada uma equação que facilita sua aplicação:

$$\text{m}^3 \text{ de vinhaça/ha} = [(0,05 \times \text{CTC-ks}) \times 3744 + 185] / \text{kvi}$$

Onde:

- **0,05** corresponde a 5% da CTC;
- **CTC** é a capacidade de troca catiônica expressa em cmolc/dm<sup>3</sup>, dada pela análise de fertilidade do solo que é realizada por laboratório de análise de solo e utiliza a metodologia do IAC (Instituto Agronômico de Campinas);
- **Ks** é a concentração de potássio no solo, expresso também em cmolc/dm<sup>3</sup>, à uma profundidade de 0 a 0,80;
- **3744** é a constante para transformar os resultados da análise de fertilidade expressos em cmolc/dm<sup>3</sup> em kg de potássio, em um volume de 1 (um) hectare por 0,80 metros de profundidade;
- **185** é a massa, expressa em kg, de K<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> extraído pela cultura por hectare, por corte;
- **Kvi** é a concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de K<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>, apresentada em um boletim de resultado analítico, CETESB (2006).

Pode-se observar pela equação acima que a dosagem para a aplicação da vinhaça como fonte de enriquecimento do solo é calculada considerando a profundidade e a fertilidade do solo.

Se descartada incorretamente, a vinhaça pode contaminar os cursos d'água superficiais (rios, lagos, nascentes e várzeas) e o lençol freático através da percolação até as águas subterrâneas.

Esta preocupação se justifica pelo fato desse tipo de poluição não ser percebida imediatamente e muitas vezes quando constatada, sua possibilidade de reversão poderá ser pequena. Mas, este mesmo autor salienta que especialistas buscam saídas tecnológicas para se diminuir a carga orgânica desse resíduo e reutilizá-lo na fertirrigação com um menor risco de dano à natureza (BARROS, 2007).

Surgindo como uma alternativa de tratamento deste subproduto, a biodigestão anaeróbia tem então papel importante na economia através da produção de metano que é utilizado como fonte de energia. O metano é um gás altamente poluidor que se emitido diretamente para a atmosfera causa impacto negativo ao ambiente, que corresponde a 21 vezes o impacto do CO<sub>2</sub>.

#### 2.4. A LEGISLAÇÃO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO

Até o final dos anos 70, grande quantidade de vinhaça produzida era lançada nos mananciais superficiais, principalmente nos cursos d'água, rios e ribeirões das proximidades das usinas de açúcar e álcool. Como principal consequência, ocorria a proliferação de microrganismos que esgotam o oxigênio dissolvido na água, destruindo a flora e a fauna aquáticas e dificultando o aproveitamento dos mananciais contaminados como fonte de abastecimento de água potável.

A partir da safra de 78/79 foram elaborados dispositivos legais que proibiram o despejo da vinhaça nos mananciais superficiais, incorrendo em multa ao empreendedor que violasse a proibição (Portaria MINTER nº323, de 29 de novembro de 1978 e Portaria MINTER de 03 de novembro de 1980).

Na sequência, a Resolução CONAMA nº 0002 de 05 de junho de 1984, determinou a realização de estudos específicos para o controle da poluição oriunda dos efluentes das destilarias de álcool e pelas águas de lavagem da cana. Além disso, o CONAMA, em sua Resolução nº0001 de 23 de janeiro de 1986, tornou obrigatória a elaboração da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para novas indústrias instaladas ou qualquer ampliação efetuada nas já existentes.

O Estado de São Paulo destaca-se na vanguarda da elaboração e aplicação da legislação sobre contaminação de aquíferos subterrâneos. Desde 1988, o estado conta com legislação específica e que, até então, não havia dispositivo correspondente na esfera federal. De fato, somente em 1999 foram concebidas

medidas de proteção dos aquíferos subterrâneos, com o início do Projeto Aquífero Guarani – PAG.

Antes disso, a nível federal, merece destaque a elaboração de uma legislação que incidisse sobre os componentes químicos dos nutrientes utilizados na fertilização. A Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980 Art.2º XIV, estabelece o regulamento sobre nutrientes, classificando-os como elementos essenciais ou benéficos para o crescimento e produção dos vegetais, e os subdividem em:

- Macros nutrientes primários: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), expressos nas formas de Nitrogênio (N), Pentóxido de Fósforo ( $P_2O_5$ ) e Óxido de Potássio ( $K_2O$ );
- Macros nutrientes secundários: Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S). Expressos nas formas de Cálcio (Ca) ou Óxido de Cálcio (CaO), Magnésio (Mg) ou Óxido de Magnésio (MgO) e Enxofre (S).
- Micronutrientes: Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Zinco (Zn), Cobalto (Co), Silício (Si) e outros elementos que a pesquisa científica vier a definir, expressos nas suas formas elementares, (Lei 6.894, art. XIV).

Definida sua composição química e consciente de que a mesma é um produto poluente, a legislação regulou seu armazenamento através da Portaria CTSA-1 de 28 de novembro de 2005, onde se estabeleceu as porcentagens anuais a ser atingida no tocante a impermeabilização de tanques e canais já instalados.

Paralelo a estas descobertas ocorreu a evolução na legislação para normatizar o uso da vinhaça, tanto no âmbito Federal como Estadual. Abaixo estão citadas algumas delas:

- Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 - Código Florestal. Portaria do Ministério do Interior nº 158, de 03 de novembro de 1980: Dispõe sobre o lançamento de vinhoto em coleções hídricas e sobre efluentes de destilarias e usinas de açúcar;
- Portaria do Ministério do Interior nº 124, de 20 de agosto de 1980 – Define normas para localização e construção de instalações que armazenem substâncias que possam causar poluição hídrica;

- Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 15, de 01 de junho de 2001 – Define as diretrizes para a gestão integrada das águas superficiais, subterrâneas e meteóricas;
- Portaria do Ministério da Saúde nº 518/04, de 25 de março de 2004: Estabelece procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.

#### 2.4.1. Legislação do Estado de São Paulo

Conforme relatado anteriormente, o estado de São Paulo foi pioneiro na elaboração e aplicação de leis para proteção dos aquíferos subterrâneos, uso e conservação do solo e utilização da vinhaça. Tal fato deve-se principalmente pelo fato do estado concentrar mais de 60% da produção de cana-de-açúcar do país. Os principais dispositivos legais serão listados e comentados na sequência.

A Lei nº 997 de 31 de maio de 1976, Dispõe sobre a prevenção, controle da poluição do meio ambiente, estabelece padrões técnicos de qualidade e emissão, institui instrumentos de proibição e exigências gerais para licenças e registros dos estabelecimentos geradores de material poluente, procedimentos administrativos e amplia competências da CETESB. Vale salientar que o dispositivo legal citado anteriormente foi regulamentado pelo Decreto nº 8.468, de 08 de setembro de 1976.

Na sequência, destaca-se a Lei nº 6.134, de 02 de junho de 1988 que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais e águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Em seu artigo 5º, a lei prevê que “os resíduos líquidos, sólidos ou gasosos, provenientes de atividades agropecuárias, industriais, comerciais ou de qualquer outra natureza, só poderão ser conduzidos ou lançados de forma a não poluírem as aguas subterrâneas”. Esta lei foi regulamentada pelo Decreto nº 32.955, de 07 de junho de 1991.

O uso, conservação e preservação do solo agrícola foi o alvo principal da Lei nº 6.171, de 04 de julho de 1988, que define em seu Artigo 3º, Inciso 2º, que “entende-se como uso adequado a adoção de um conjunto de práticas e procedimentos que visem à conservação, melhoramento e recuperação do solo agrícola, atendendo a função socioeconômica da propriedade rural e da região”. Esta Lei foi regulamentada pelo Decreto nº 41.719, de 16 de abril de 1997.

Importante citar também a Norma Técnica P.4.231 de dezembro de 2006, dispõe sobre os critérios e procedimentos para aplicação da vinhaça no solo agrícola, especificando as restrições quanto às áreas de aplicação, suspendendo o armazenamento/disposição deste resíduo em áreas de sacrifício, determinando procedimentos para monitoramento, verificação de contaminação, impermeabilização dos tanques e canais, caracterização do solo e da vinhaça e traça exigências e procedimentos para o plano de aplicação de vinhaça.

Um tema que representa um ponto preocupante do setor compreende a queima da palha da cana-de-açúcar e que, até então, não possuía uma legislação específica, seja ela federal ou estadual. Até que em setembro de 2002 foi criada a Lei nº 11.241, que discorre sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá outras providências. Como principal mecanismo adotado por esse dispositivo destaca-se a eliminação do uso do fogo como método despalhador e facilitador do corte da cana-de-açúcar.

Para a contenção de fuligem nas usinas, a Lei nº 5.309 de 14 de novembro de 2008 tornou obrigatório o uso de filtros de contenção e estabeleceu um prazo de 12 meses a partir da data de publicação desta lei para que as usinas em funcionamento realizem as devidas adequações.

### 3. O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia pode ser citada como um dos processos mais indicados para a geração de energia através da biomassa, pois requer um menor investimento de capital e custo por unidade de produção, em relação a outras energias renováveis, tais como hídrica, solar e eólica. Além disso, a energia renovável obtida a partir da biomassa está disponível nas áreas rurais, como um recurso doméstico, não estando sujeita a flutuações dos preços mundiais, ou às incertezas de abastecimento como de combustíveis importados e convencionais (REGO & HERNÁNDEZ, 2006).

Segundo Salomon (2007), a biodigestão anaeróbia é um processo complexo que envolve muitas espécies de bactérias e sucessivas etapas intermediárias realizadas por diversos grupos de microrganismos, que convertem a matéria orgânica complexa em biogás, amônia, água e novas células bacterianas. A Figura 5 ilustra, de forma esquemática, o processo de biodigestão anaeróbia.

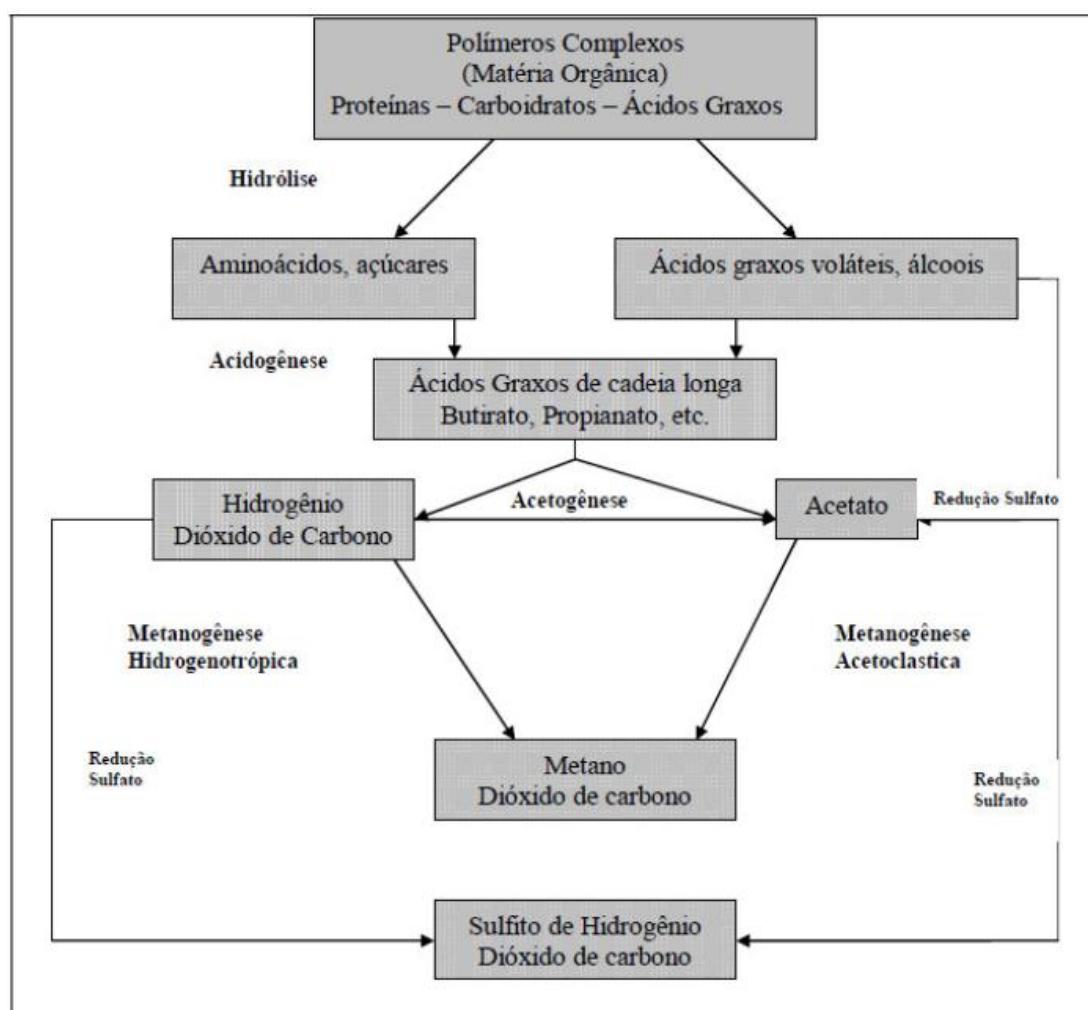


Figura 5. Processo de Biodigestão Anaeróbia.

Fonte: Poveda (2012), adaptado de Lettinga e Rinzema (1985).

A digestão anaeróbia da vinhaça auxilia no uso do recurso natural, a biomassa da cana, de maneira a reduzir os rejeitos que causam danos ao meio ambiente. O processo consiste na biodegradação de sua carga orgânica, etapa de fermentação anaeróbica que produz o metano. Este processo gera biogás e biofertilizante com reduzida carga orgânica sem, no entanto, alterar suas propriedades fertilizantes (LAMONICA, 2006). O processo ocorre em duas etapas:

- Na primeira etapa estão envolvidas bactérias fermentativas, não produtoras de metano, que atuam por hidrolise quebrando polímeros orgânicos, incorporando e fermentando esses produtos de hidrólise em ácidos orgânicos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono.
- Na segunda etapa estes produtos são transformados em metano e dióxido de carbono pela ação das bactérias acetogênicas e metanogênicas (SANTA CRUZ, 2011).

Uma vez que atua na remoção e reutilização da carga orgânica presente e mantém seu alto poder nutricional NPK, o uso dessa tecnologia apresenta-se viável, aprimorando o balanço energético da produção do álcool, tornando-o mais competitivo e eficiente comparado aos combustíveis fosseis mais utilizados. Além disso, sua utilização reduziria as emissões dos gases de efeito estufa, colaborando para o controle da temperatura do planeta.

Como benefícios, a biodigestão anaeróbia da vinhaça apresenta, por exemplo, um menor consumo de energia (comparativamente a outros sistemas aeróbios); menor produção de lodo em virtude da menor produção de biomassa; possibilidade de aproveitamento do biogás gerado; redução da carga orgânica da vinhaça para sua aplicação no solo, etc. (CORTEZ et al., 2007).

Como desvantagens, Cortez et al. (2007) citam o maior tempo de detenção, em comparação com sistemas aeróbios e a produção de gases com odor desagradável e corrosivos.

### 3.1. BIODIGESTORES ANAERÓBIOS

Existem vários tipos de reatores para a digestão anaeróbica. No entanto, o desafio é sempre o mesmo, procurar homogeneizar o meio ao máximo, para proporcionar às

bactérias um maior contato com a matéria orgânica, que é a sua fonte de sobrevivência.

Quanto à tecnologia de biodigestão, consideram-se os reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB, sigla em inglês), mostrado na Figura 6 abaixo, como sendo os reatores que mais se adaptam ao processo de digestão anaeróbica da vinhaça (MACHADO apud GRANATO 2003).

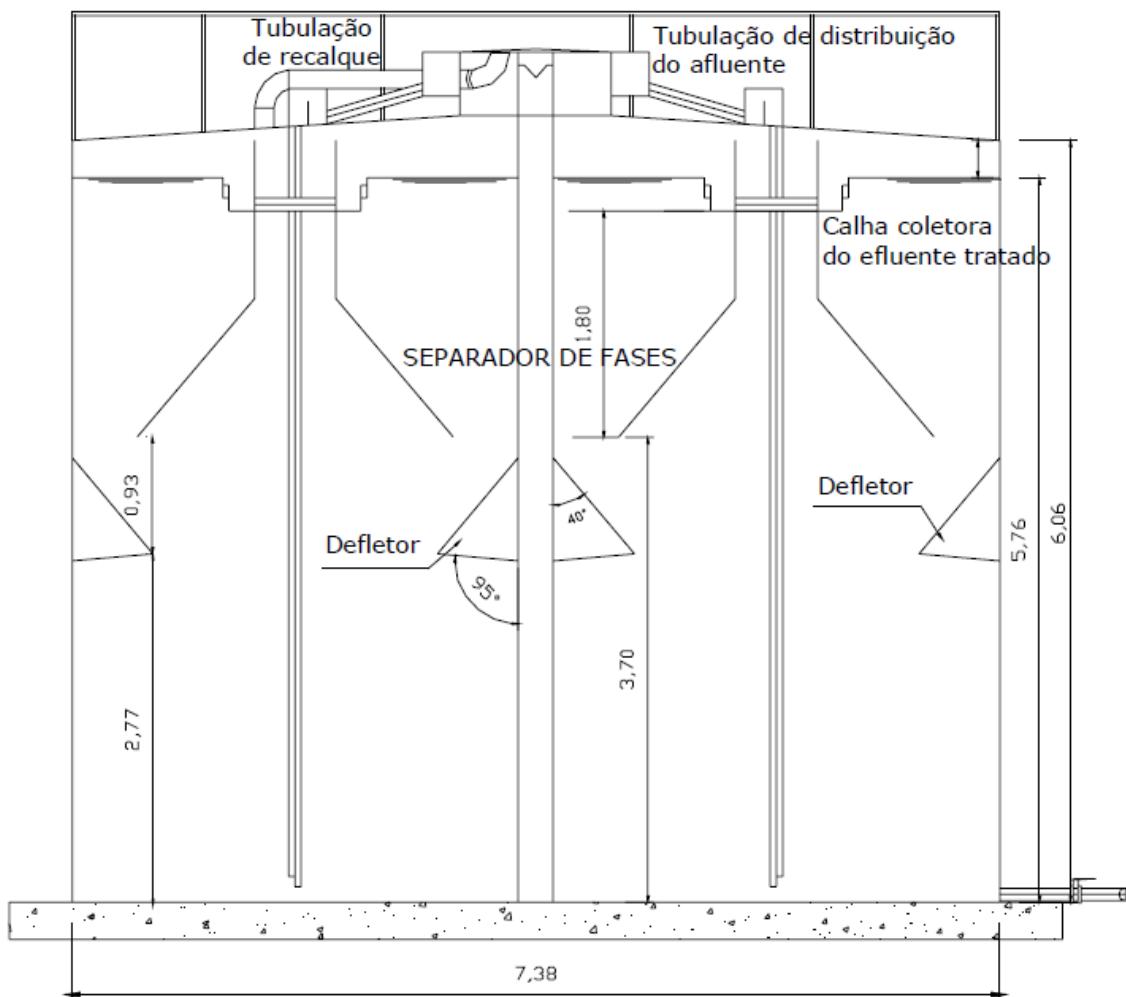


Figura 6. Corte Esquemático do Reator UASB.

Fonte: Pierotti 2007, adaptado de Kellner 2003.

Esse reator é constituído de um compartimento digestor que se localiza na base, e que contém o leito do lodo biológico; no topo está localizado um decantador precedido por um sistema de separação de gás. O efluente tratado é distribuído de maneira uniforme na base do reator, passando pela camada de lodo, através da qual a matéria orgânica é então transformada em biogás.

O gás gerado é impedido de dirigir-se ao sedimentador pelos deflectores, entrando apenas em algumas regiões do reator. A fração de lodo que atinge o decantador é separada, retornando à base do reator e o efluente é então retirado da superfície do mesmo (SALOMON, 2007). O tempo de retenção hidráulica (HRT) desse material no digestor varia de 2,5 horas a dois dias, dependendo da concentração do líquido que entra.

Desenvolvido na Holanda, os biodigestores UASB (*upflow anaerobic sludge blanket digestion*) são indicados para o tratamento de efluentes com teor de sólidos de até 2% (CORTEZ et al., 2007). Estão sendo utilizados inicialmente no tratamento de biomassa residual da agroindústria e posteriormente no tratamento de esgotos, principalmente em regiões de clima quente. Atualmente, os reatores UASB constituem cerca de 75% dos sistemas de tratamento anaeróbio no mundo. Dentre as principais vantagens na utilização do reator modelo UASB pode-se destacar:

- Baixa produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios;
- Redução de consumo de energia, usualmente associada a uma elevatória de chegada;
- Necessita de uma área muito menor que a utilizada para implantação dos sistemas aeróbios;
- Baixos custos de implantação, quando comparados aos sistemas aeróbios;
- Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico e com potencial de reaproveitamento;
- Possibilidade de preservação de até 8 meses da biomassa em alimentação do reator;
- Tolerância a elevadas cargas orgânicas, (Sakuma, 2013).

Sakuma (2013) também aponta algumas desvantagens da utilização destes reatores:

- Geração de efluente com aspecto desagradável e dificuldade de controlar a geração de maus odores;
- É necessária alguma forma de pós-tratamento;
- As bactérias são susceptíveis a inibição por um grande número de composto comprometendo assim a eficiência do reator;
- Remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos insatisfatória;
- A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e precisam ser mais estudadas.

#### 4. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DA VINHAÇA

O biogás é considerado um biocombustível, de fonte renovável, com conteúdo energético que se assemelha ao do gás natural. Constituído por uma mistura de hidrocarbonetos, como Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e o gás Metano (CH<sub>4</sub>), se colocado sob pressão se torna inflamável, como outros combustíveis (SAKUMA, 2013). Seu potencial energético reside na quantidade de metano contida no gás, o que determina o seu poder calorífico (Tabela 1). Santos (2000) afirma que o poder calorífico do biogás é de 6,5 kWh.m<sup>-3</sup> e a eficiência de conversão em energia elétrica com grupos geradores (motores ciclo Otto) é de, aproximadamente, 25%.

Tabela 1. 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: POVEDA 2013, adaptado de Castanon 2002.

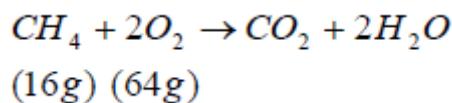
Para a obtenção do biogás deve-se obedecer aos critérios de fermentação, temperatura, umidade, acidez e ausência de oxigênio. Dependendo da matéria a ser digerida ou o tipo de biodigestor a ser utilizado, a porcentagem de cada gás presente no biogás pode sofrer variações (SAKUMA, 2013).

O biogás pode ser usado para a geração de energias elétrica, térmica e mecânica. Com o uso do biogás é possível substituir os gases de origem mineral como o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), usado como gás de cozinha, GN (Gás Natural) usado em equipamentos domésticos e GNV (Gás Natural Veicular). O mesmo pode ser

empregado nos mais variados tipos de produtos, como em fogões domésticos, lampiões, geladeiras, chocadeiras, secadores de grãos ou secadores diversos, aquecimento e balanço calorífico, e em motores de combustão interna (automóveis), (LAMONICA, 2006).

#### 4.1. POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE VINHAÇA

Para quantificar o potencial energético, deve-se avaliar a quantidade de material orgânico, expressa em massa de DQO presente na mistura. VAN HANDEL (2003) encontrou aproximadamente 500 kg de DQO por m<sup>3</sup> de álcool produzido, independente das proporções entre a vazão de álcool e a vazão de vinhoto. Pelo processo de digestão anaeróbica do vinhoto há uma conversão deste material orgânico em gases metano e dióxido de carbono que, juntos com outros gases em menor proporção, formam o biogás:



Pela equação acima, estequiométricamente a cada unidade de metano tem-se quatro unidades de oxigênio. Adotando-se uma eficiência de remoção do material orgânico de 80%, que tem sido alcançada com segurança, a cada m<sup>3</sup> de álcool há uma remoção de 400 kg de DQO, o que equivale a uma produção de 100 kg de CH<sub>4</sub> (4:1). Considerando-se que o poder calorífico inferior (PCI) do metano é de 12.000 kcal/ kg, 1 kg de CH<sub>4</sub> é equivalente a 50.400 kJ (kWs) ou 14 kWh. Para os 100 kg de metano considerados na produção de 1 m<sup>3</sup> de álcool, o potencial energético é de 1.400 kWh/m<sup>3</sup> de álcool. Entretanto, supondo-se que a eficiência de um grupo gerador ciclo Otto, que irá queimar este biogás, é de 35%, no máximo, tem-se uma relação de 490 kWh por m<sup>3</sup> de álcool (1.400 kWh \* 35%) (REGO & HERNANDEZ, 2006).

#### 4.2. PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A produção de biogás através do mecanismo de biodigestão anaeróbia pode ser feito de acordo com uma variedade de processos, os quais podem ser caracterizados segundo o tipo de regime, o número de estágios de processo e o percentual de sólidos no substrato a ser digerido.

Quanto ao tipo de regime, podem ser empregados dois processos:

- Em batelada, onde o substrato é mantido selado, no interior de um tanque digestor, por um determinado período de retenção, ocorrendo o processo completo de digestão. Devido à ausência de agitação ou mistura do substrato, o conteúdo do digestor apresentará uma estratificação em camadas, incluindo gás, escuma, sobrenadante, uma camada reativa, e sólidos estabilizados no fundo do tanque. Como desvantagens do processo em batelada, tem-se um período mais longo de retenção, as baixas taxas de carregamento de substrato (matéria orgânica), bem como a formação de uma camada de escuma.
- Em regime permanente, que podem ser modelados na forma de escoamento pistonado, onde o fluido passa através do reator sem que haja mistura entre fluido recém-alimentado e o já existente no reator ou escoamento de mistura perfeita, onde o fluido é uniformemente misturado, sendo sua composição semelhante no interior e na saída do reator. Neste sistema o processo ocorre sob regime uniforme, mantendo a produção de biogás constante (BRITO, 2011).

O percentual de sólidos no substrato determina o tipo de digestor selecionado. A possibilidade de mistura completa, ou a capacidade de fluir no aparato, podem determinar não somente o design de digestor mais apropriado, como apontar a necessidade de mistura com outros substratos líquidos (co-digestão).

#### 4.3. PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS DE VINHAÇA

O biogás produzido pela fermentação anaeróbia da vinhaça da cana-de-açúcar através de digestores do tipo UASB, deve ser purificado por meio de processos específicos, a fim de possibilitar a obtenção de um produto com alto conteúdo energético, além de eliminar ou reduzir a participação de gases inertes como o CO<sub>2</sub> e de gases corrosivos como o H<sub>2</sub>S.

A utilização direta do biogás em queimadores e, especialmente, em motores de combustão interna para fins de geração elétrica determina:

- Baixo rendimento pela presença de grandes quantidades de gases inertes (da ordem de 30 a 50%);

- Dificuldades da regulagem pelo comportamento variável de compostos não combustíveis;
- Reduzida vida útil das peças em contato com o gás antes e depois de sua combustão;
- Elevados custos de manutenção, pela necessidade de reposição de peças e componentes, degradados pelos poluentes do biogás.

O processo de purificação a ser detalhado na sequência foi apresentado por Almanca (1994), seguindo a sistemática empregada por empresas especializadas no ramo e sugerida pelos consultores de biodigestores. Tal processo garante a obtenção de um gás depurado, com um teor de metano ( $\text{CH}_4$ ) da ordem de 90%, gases inertes ( $\text{CO}_2$  e outros) abaixo de 10%, baixo teor de umidade e significativa redução de gases corrosivos e tóxicos ( $\text{H}_2\text{S}$ ) da ordem de 0,1%.

No início do processo, o biogás produzido é armazenado em um gasômetro inflável com volume aproximado de 1% da produção diária de biogás e pressão idêntica a original (1,15bar), afim de servir como pulmão para o sistema de purificação.

Do gasômetro, o biogás é direcionado para um separador de particulados, onde são eliminadas eventuais partículas sólidas. Esta prévia filtração tem também a função de proteger o compressor de biogás. No compressor, o biogás sofre uma alteração da pressão original, passando de 1,15 bar para aproximadamente 15 bar.

O biogás é então direcionado para filtros desoleadores, que têm a função de reter o óleo proveniente do compressor, além de água e partículas finas. Esses filtros são do tipo cartucho, constituídos de elementos filtrantes como fibras de borosilicato. Os sólidos são retidos no primeiro meio filtrante (tela de aço inox), enquanto que os líquidos aderem as fibras, sendo então eliminados por um purgador automático. Dos filtros o biogás é dirigido à uma coluna de lavagem, onde ocorre a maior eliminação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  de todo o processo. A coluna de lavagem nada mais é que um *scrubber* clássico, onde o biogás encontra a água de adsorção num fluxo contra-corrente.

A recirculação da água é promovida por uma bomba de circulação, que opera à pressão compatível com a pressão do gás na coluna, enquanto que o  $\text{CO}_2$  absorvido e dissolvido na água é eliminado numa torre de desorção por meio de aeração forçada. O gás resultante sai bastante úmido (saturado), sendo necessário reduzir seu teor de umidade por intermédio de um separador de gotículas.

Do separador de gotículas, o gás passa novamente por filtros desoleadeiros, desta vez utilizando carvão ativado de elevada eficiência como elemento filtrante, afim de eliminar resíduos de óleo provenientes da bomba de circulação que alimentam a coluna de lavagem, como também promover a depuração final do gás.

Após concluído todo este circuito, ilustrado na Figura 7, o gás encontra-se num estado purificado, sendo então estocado em um tanque pulmão. A pressão final do gás é de aproximadamente 12 bar, menor que a alcançada no compressor, devido a uma pequena expansão do gás que ocorre ao longo do processo. Desta forma, o gás obtido estará num estado adequado a ser utilizado em equipamentos responsáveis pela produção de energia elétrica. Um comparativo entre as características básicas do biogás antes e depois da purificação é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Quadro comparativo das características do biogás

Elemento	Biogás sem tratamento	Biogás com tratamento
CH <sub>4</sub>	60%	90%
CO <sub>2</sub>	32%	8 a 9%
H <sub>2</sub> S	1%	0,1%
Outros	1%	1%
H <sub>2</sub> O	6% (saturado)	0,5%
Pressão	1,15 bar	12 bar

Fonte: Almanca, 1994.

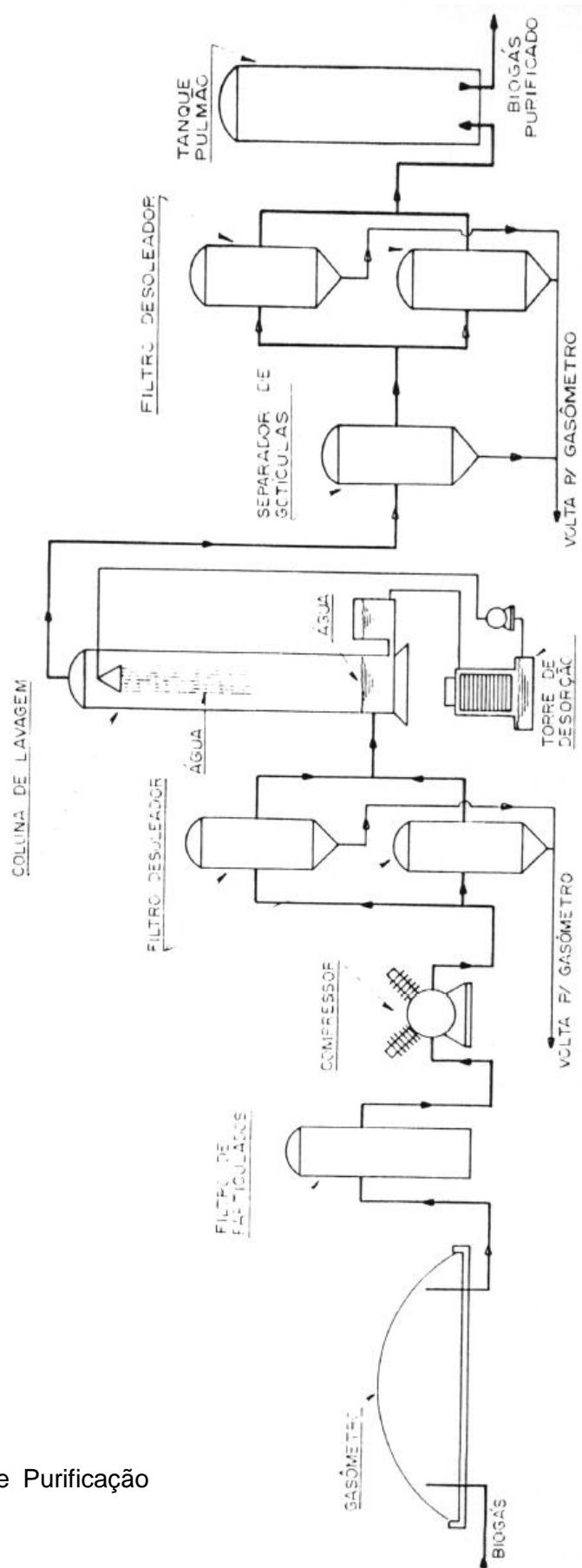


Figura 7. Esquema de Purificação do Biogás.

Fonte: Almanca, 1994.

#### 4.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS DE VINHAÇA

A utilização do biogás na obtenção de energia possui algumas vantagens que devem ser levadas em consideração. Na questão ambiental, sua utilização comparada com os combustíveis fósseis é menos poluidora, ajudando nas emissões de efeito estufa e no desmatamento, já que sua utilização diminuiu o uso da lenha como fonte de geração de energia. Devido à grande disponibilidade de efluentes e o caráter renovável dos materiais orgânicos e bactérias necessários para síntese de biogás, esta é uma fonte de energia potencialmente eficaz e sustentável (ROYA, *et al* 2011). Produtores rurais de todo o mundo têm investido nos biodigestores para a produção de pequenas quantidades de biogás.

A digestão anaeróbia da vinhaça ainda tem ao seu favor o argumento econômico da produção do metano. Problemas técnicos, foram superados e a biodigestão anaeróbia da vinhaça é hoje considerada tecnicamente viável, sendo possível encontrar uma unidade (de escala industrial) em operação na Usina São Martinho (Pradópolis, SP).

Porém, por ser um gás corrosivo exige cuidados especiais com os equipamentos utilizados. Isto se dá, principalmente pela presença de sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) (POVEDA, 2012). De acordo com o CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, o limite para emissão de sulfetos não pode ultrapassar 1,0 mg/l.

Segundo os padrões nacionais de qualidade do ar fixados na Resolução CONAMA nº 3, de 28/06/90, existem limites somente para o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) (Padrão primário 365 g/m<sup>3</sup> e Padrão secundário 100 g/m<sup>3</sup> em 24 horas), também considerado como produto da combustão do biogás e nocivo à saúde. A amônia também em baixas concentrações é corrosiva, podendo emitir como produto da combustão os óxidos de nitrogênio também nocivos à saúde e ao ambiente.

Apesar das vantagens oferecidas na produção de energia elétrica a partir do biogás, alguns desafios precisam ser vencidos, como a falta de tecnologias nacionais de grande porte para a geração a partir da vinhaça, indisponibilidade de sistemas eficientes e de baixo custo para a purificação do biogás, o que pode inviabilizar projetos dessa natureza..

Como a maioria das tecnologias empregadas não são nacionais, o custo de implantação ainda é muito alto. Para que se tornem economicamente competitivas precisam de um suporte governamental e de investimentos em tecnologias (GUARDABASSI, 2006). Rego & Hernández (2006), destacam ainda que a viabilidade

econômica desta tecnologia é tolhida por três fatores, pelo menos. Em primeiro lugar, a falta de valorização do biogás, como combustível alternativo; em segundo lugar, a difusão bem sucedida da fertirrigação, que não sofreu nenhum controle ambiental mais rigoroso; e, em terceiro lugar, o declínio do Proálcool, que não permitia investimentos.

#### 4.5. ESTUDO DE CASO – REGO & HERNANDÉZ (2006)

O estudo desenvolvido pelos autores apresenta duas variações. Na primeira variação a produção de biogás ocorrerá apenas durante o período de safra, com a utilização de toda a vinhaça nesse período, já na segunda variação, será considerado a utilização de um açude de armazenamento da vinhaça, para sua utilização ao longo do ano.

##### 4.5.1. Biodigestão da vinhaça durante o período de safra

O processo é realizado durante o período da safra, uma vez que a legislação ambiental do Estado de São Paulo não permite que a vinhaça seja estocada, havendo apenas a construção de um pequeno tanque de resfriamento de 20 m<sup>3</sup>. A usina, com operação prevista de 3.960 horas/ano, atingirá a potência instalada máxima de 3.775 kW, disponibilizando anualmente ao sistema 11.899.800 kWh, correspondendo em média a 3.005 kWh/h.

A transformação da energia contida no biogás em energia elétrica será feita pela queima (explosão) do biogás em motor de combustão interna operando em ciclo Otto, potência mecânica contínua 792 kW, aspiração turbo-alimentada, velocidade 1800 rpm, relação de compressão 14:1, acoplado a alternador síncrono.

Para atender o fornecimento de energia, foram implantados para o estudo em questão, cinco motores geradores com rendimento 35%, interligados entre si e operando com fator de disponibilidade 0,9. Potência ativa nominal de 755 kW, cada, rendimento cosseno φ 1 e 0,8 de respectivamente 96,5% e 95,5% e capacidade de regulagem deste cosseno em conformidade com a rede. Cada grupo motor-gerador será montado em container no qual também se encontra todo equipamento necessário à partida, controle, proteção e sincronismo.

Adicionalmente, foram implantados:

- Transformador elevador: 1 (um) 4.000 kVA, 60Hz, trifásico, 380 V / 13.800V;

- Linha de interconexão com a rede da Concessionária;
- Painéis, disjuntores, relés de proteção e controle na alta e baixa tensão;
- Sistema de sincronismo, medição e despacho.

A usina disponibilizará sua energia através da subestação elevadora 380 V/ 13.800 V e de uma linha em 13.800 V, em alumínio, circuito simples, com aproximadamente 10 Km de extensão, conectando-se esta à linha da concessionária de distribuição.

O orçamento previsto para este projeto é de R\$ 5.725 mil, sendo que apenas o grupo gerador representa 57% do investimento. A avaliação de viabilidade do projeto considerou as mesmas premissas de financiamento do BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, concedida aos projetos selecionados pelo PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia.

Considerando-se uma taxa de oportunidade do capital próprio, ou taxa interna de retorno de 15,0% ao ano, o custo de comercialização da energia que viabilize o projeto é de **R\$ 155 / MWh**.

Comparando-se com o valor que o PROINFA estaria disposto a pagar pela energia advinda de projetos a biogás, R\$ 166,31/ MWh, segundo Audiência Pública de julho de 2003, o projeto seria viável econômico-financeiramente. Mesmo sendo viável no âmbito do PROINFA, ele não pode ser contratado pela ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A., pois a Portaria MME nº 45, de 30 de março de 2004, restringiu o PROINFA ao biogás de aterro sanitário, pagando-lhe R\$ 169,08/ MWh, eliminando a possibilidade de participação do biogás da vinhaça de cana-de-açúcar.

#### 4.5.2. Biodigestão da vinhaça ao longo do ano

A simulação a ser apresentada neste item considera a utilização de um açude de decantação de 300 mil m<sup>3</sup>, ao invés de um tanque de 20 mil m<sup>3</sup>. O armazenamento da vinhaça em grandes açudes é uma realidade comum nas usinas do interior do Estado de Pernambuco. Com um açude de armazenamento, a produção de biogás pode ser normalizada durante todo o ano, o que traz os seguintes benefícios:

- Menor investimento em grupos geradores;
- Diminuição da temperatura da vinhaça de aproximadamente 55°C para 35°C, o que melhora a ação das bactérias.

Considerando-se as mesmas premissas do item anterior, e as duas vantagens acima, o custo de comercialização da energia que viabilize o projeto passa de R\$ 155 / MWh para **R\$ 117 / MWh**. Esta diferença retrata o custo ambiental pelo armazenamento da vinhaça, esses R\$ 38 / MWh representam um volume anual de aproximadamente R\$ 450 mil.

Entretanto, na prática, o que se verifica é uma inviabilidade de construção de um açude de 300 mil m<sup>3</sup> nas usinas localizadas no Estado de São Paulo, em decorrência da aplicação e existência de uma legislação ambiental mais rigorosa do que a encontrada no Estado de Pernambuco.

#### 4.6. USINA ESTER (COSMÓPOLIS/SP)

Segundo dados do Portal Energia Hoje (4/4/2013) estava previsto para maio de 2013, juntamente com o início da safra de cana 2013/2014, a inauguração da planta de geração de 1,2 MW, movida a biogás de vinhaça, instalada na usina Ester. Iniciativa conjunta da CPFL Energia, General Electric e Omnis Biotechnology, o projeto conta com apoio do Programa Paulista de Biogás. Interessado em cortar as emissões de gases de efeito estufa, conforme metas estabelecidas na lei estadual de mudanças climáticas, o governo de São Paulo quer incentivar modalidades alternativas de geração de eletricidade e também reduzir dependência do estado do gás da Petrobras.

Localizada em Cosmópolis, interior do Estado de São Paulo, a Usina já possui autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) para explorar a energia proveniente da biomassa produzida pela moagem de cana-de-açúcar, com capacidade instalada de 40 MW e potência injetada limitada a 30 MW. A Usina Ester iniciou o processo de cogeração comercial em 2010 (POVEDA, 2012).

Em relação aos aspectos do processo, foram disponibilizados dados que indicam que a usina produz 600 m<sup>3</sup>/h de vinhaça e tem uma capacidade de tratamento de 15% do volume de vinhaça produzida (90 m<sup>3</sup>/h).

A vinhaça tem entre 20 e 60 kg de DQO/ m<sup>3</sup> e o biodigestor produz 0,2 m<sup>3</sup> de biogás / kg de DQO (de 4 a 12 m<sup>3</sup> de biogás/ m<sup>3</sup> de vinhaça). Também foi informado que não existe tratamento químico da vinhaça antes do biodigestor. A vinhaça chega a uma temperatura de 65º na planta, é resfriada até 50ºC por meio de um trocador de calor, e chega ao reator aos 38 ºC.

Na sequência são apresentados alguns dados técnicos do digestor utilizado na Usina:

- Tipo de biodigestor: Lagoa de alta taxa
- Capacidade: 15.000 m<sup>3</sup>
- Dimensões: 40 x 60 x h = 10 (9 metros de altura útil)
- Capacidade de tratamento: 2 kg DQO/ m<sup>3</sup> dia
- Tempo de residência: 12 dias
- 95% de eficiência remoção de DQO.

## 5. VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROJETOS DE BIODIGESTÃO

As análises de viabilidade econômica de um projeto devem levar em consideração algumas questões básicas, mas de grande importância na decisão de investir ou não na atividade.

Um dos focos principais é avaliar o fluxo de caixa, diante da necessidade de um investimento inicial com a implantação do biodigestor, além dos gastos com operação e manutenção, que devem ser periódicas.

É preciso também examinar os impactos que as variações nos *inputs*, como receitas, custos de operação e financiamentos podem ocasionar o valor presente líquido ou qualquer outro elemento de decisão. A geração do fluxo de caixa a partir das entradas de receitas e despesas é parte principal, pois infere se o projeto é ou não capaz de remunerar adequadamente o capital investido.

Benefício com o investimento é que além da implantação de mecanismos de desenvolvimento limpo, poderão ser geradas receitas provenientes da geração de energia elétrica e comercialização de crédito de carbono. Diante disto, é possível que o empreendedor analise a alternativa de implantação do projeto, visando a sua longevidade e maximização dos fluxos de caixa gerados na operação (SOUZA, 2010).

No segmento de geração de energias alternativas, o BNDES financia empreendimentos de geração de energia a partir de fontes alternativas, tais como biomassa, eólica e solar, além de pequenas centrais hidrelétricas, visando à diversificação da matriz energética nacional. As linhas de financiamento do BNDES

Finem atendem ao segmento e apresentam regras específicas de acordo com o cliente ou o empreendimento/item apoiado. Podem ser combinadas diferentes linhas de financiamento em uma mesma operação e dentre as principais linhas, destacam-se:

- Geração de Energia Elétrica Renovável;
- Projetos de Eficiência Energética;
- Aquisição de Bens de Capital;
- Aquisição de Bens e Serviços Importados.

Por essas linhas de crédito, as empresas podem investir na aquisição de máquinas, equipamentos e bens de informática e automação, associados aos planos apresentados ao BNDES, de forma isolada ou vinculada a projetos. Atualmente, o valor mínimo de financiamento é de 3 milhões de reais e o banco participa com até 90% do valor dos itens financiáveis.

Dentre os principais benefícios para a empresa, pode-se citar o prazo para pagamento, que é de até 16 anos, incluindo período de carência, que termina em até 6 meses após a data de entrada em operação comercial do empreendimento.

Além disso, empresas que quiserem adquirir equipamentos para geração de energia renovável terão linhas de financiamento específicas. Atualmente estão disponíveis financiamentos para a obtenção de microgeradores e minigeradores solares fotovoltaicos. Os equipamentos contam com sistema de geração elétrica de pequena potência, normalmente instalados para produzir energia suficiente para alimentar uma casa, um edifício, ou até mesmo um galpão de uma indústria.

O incentivo veio por meio da resolução nº482/12 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que disponibiliza linhas de crédito aos consumidores interessados em fomentar o consumo sustentável de energia. Esta lei, que entrou em vigor em dezembro de 2012 regulamentou o Sistema de Compensação de Energia (Lei nº 6403/09), que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e receber créditos da distribuidora local<sup>2</sup>. A regra é válida para geradores que utilizem fontes incentivadas de energia: hídrica, solar, biomassa, eólica e cogeração qualificada.

---

<sup>2</sup> Os créditos variam de acordo com a distribuidora, variando entre R\$ 0,22 a 0,42 por kWh comercializado.

Têm-se ainda a possibilidade de comercialização de créditos de carbono. O Brasil é o segundo país, depois da Índia, em número de projetos para comercialização de créditos de carbono. O negócio que mais tem atraído investidores estrangeiros ao país é o de cogeração de energia a partir da biomassa. O segmento já representa a maior parte dos projetos brasileiros nesse mercado, e estima-se que seu potencial de redução de emissões alcance 2,486 milhões de toneladas de carbono no país, por ano (MCT, 2006).

A cogeração com biomassa é a base de 51 dos 138 projetos já aprovados pelas autoridades brasileiras e que aguardam liberação pela Organização das Nações Unidas (ONU). Destes 51 projetos, a maior parte refere-se exclusivamente a usinas de açúcar e álcool, que tradicionalmente fazem a cogeração a partir do bagaço da cana-de-açúcar.

Contudo, há um significativo entrave para o Brasil, no que diz respeito à efetivação da cogeração de energia, que se concentra na ausência de políticas institucionais e reguladoras que favoreçam o sistema de comercialização de excedentes energéticos gerados pelo setor. Por consequência desses entraves políticos e legislativos, falta garantia para efetivação de um sistema consolidado e de longo prazo, que garanta às empresas o retorno dos investimentos exigidos para a adequação nesse novo cenário energético.

## CONCLUSÃO

O Brasil possui um grande potencial de demanda de energia que poderia ser suprido pela utilização do biogás, dado que a viabilidade econômica desta tecnologia seria possível em locais com altas taxas de produção de biogás.

Em média para cada litro de etanol produzido, são deixados 12 litros de vinhaça como subproduto. Na safra 2010/2011 foram produzidos cerca de 25 bilhões litros de etanol, o que equivale a cerca de 300 bilhões de litros de vinhaça ou 300 milhões m<sup>3</sup>. Volume suficiente para gerar cerca de 1.600 MW, o que equivale a 45% da capacidade instalada de uma hidrelétrica como a de Jirau, com a vantagem de produzir energia de forma descentralizada e sem impacto para o meio ambiente, o que a torna de grande importância na matriz energética brasileira (ÚNICA, 2012).

De acordo com ÚNICA (2013), em novembro de 2013 um novo marco foi atingido pela energia gerada a partir da biomassa no Brasil. Essa fonte atingiu o total de 11.250 MW em potência instalada, por meio de 474 usinas em operação, número que supera a capacidade a ser estabelecida na Usina Belo Monte até 2019, estimado em 11.233 MW.

A cana-de-açúcar é o principal expoente da biomassa, sua utilização não pode se restringir a produção de álcool e queima do bagaço. O cenário da indústria sucroalcooleira no Brasil é muito promissor. Pois, o país não é apenas líder na produção de açúcar e etanol, mas, reúne também as melhores condições de expansão da indústria. Segundo a UDOP, a produção de etanol no Brasil no ciclo 2013/14 será de 27,1 bilhões de litros, o que equivale a um aumento de 5,4% em relação ao previsto em março e 15% maior que a safra 2012/13, isso faz com que a possibilidade de geração de energia através dos resíduos orgânicos cresça, fazendo com que se adeque as necessidades do mercado energético brasileiro e se reduzam os impactos ambientais decorrentes do processo.

É necessário não somente estimar o potencial dessa fonte, mas também traçar as diretrizes que transformem esse potencial em capacidade instalada efetiva, formulando políticas e estratégias com maior previsão e máxima eficiência. O Brasil possui recursos humanos capazes de gerar tecnologias que proporcionem vantagens competitivas em relação à agricultura mundial. É capaz de competir em igualdade e condições com qualquer país nos negócios agrícolas. Por isso, os investimentos em pesquisas e estratégias de produção, precisam continuar.

## REFERÊNCIAS

ALMANÇA, R.A. **Avaliação do uso da vinhaça da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica (Estudo de caso)**. São Paulo: USP, Dissertação de Mestrado. 1994. 144p.

BERMANN, Célio. **Crise ambiental e energias renováveis**, disponível [cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v60n3/a10v60n3.pdf](http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v60n3/a10v60n3.pdf). Acessado em 12 de dez de 2013.

BRASIL. **Plano Nacional de Agroenergia** 2006-2011 2 ed Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Secretaria de Produção e Agroenergia. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, DF 2006. Disponível [http://www.embrapa.br/publicacoes/institucionais/agroenergia\\_miolo.pdf](http://www.embrapa.br/publicacoes/institucionais/agroenergia_miolo.pdf)

BRITO, F.L.S. **Biodigestão Anaeróbia em Duplo Estágio do Bagaço de Cana-de-Açúcar para Obtenção de Biogás**. Belo Horizonte, 2011, 166f. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/755M.PDF>>.

CERVI R.G. **Avaliação Econômica do Aproveitamento do Biogás e Biofertilizante Produzido por Biodigestão Anaeróbia: Estudo de Caso em Unidade Biointegrada**. São Paulo, 2009, 57f. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura). Disponível em:<<http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arg0412.pdf>>.

CETESB. Norma P4. 231, de dezembro de 2006. **Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. Estabelece as normas para aplicação de vinhaça no solo agrícola. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas>>. Acesso em 18 nov. 2013.

COPERSUCAR. Cooperativa dos produtores de cana e álcool do Estado de São Paulo. Proálcool: **Fundamentos e perspectivas**. São Paulo,SP: Copersucar,2009.

CORTEZ, L. A .B.; SILVA, A.; LUCAS JUNIOR, J. de; JORDAN, R. A.; CASTRO, L. R. de. Biodigestão de efluentes. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. (Coord.). **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2007. cap. 15, p. 493-529.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

ENERGIA HOJE. **SP inicia em maio geração de energia com biogás de vinhaça**. Disponível em: <http://www.abegas.org.br/Site/?p=20283> . Acessado em 26/03/2014.

FERRAZ, J. M. G., MARRIEL, I. E. **Biogás - Fonte Alternativa de Energia**. EMBRAPA/CNPMS, Sete Lagoas (MG). 27p, 1980.

FERREIRA, V.F. **Pesquisa Produz Energia a Partir de Resíduos do Biodiesel.** Agência USP de Notícias. Disponível em: <http://www.usp.br/agen/?p=64386>. Acesso em 10 de março de 2014.

FREIRE, W.J; CORTEZ,L.A.B. **Vinhaça de Cana- de- Açúcar.** Serie Engenharia Agrícola. p.18-25, Guaíba,RS: Agropecuária, 2000.

GLÓRIA,N.A. **Uso agronômico de resíduos.** Disponível em <<http://www.dpv24.iciag.ufu.br/new/dpv24/Apostilas/NadirUso%20agron.%20Residuos-04.pdf>>. Acesso em 20 dez 2014.

GOLDEMBERG, José. **Energia e desenvolvimento. DOSSIÊ RECURSOS NATURAIS.** Estud. av. vol.12 no.33 São Paulo May/Aug. 1998. Disponível [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40141998000200002](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141998000200002).

GONÇALVES, Daniel Bertoli. **Mar de cana, deserto verde? Dilemas do desenvolvimento sustentável na produção canavieira paulista.** São Carlos, 2005, 259f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. Disponível em:

GRANATO, E.F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça** (2003). Dissertação (Tese de mestrado), Universidade Estadual Paulista Bauru, 2003.

GUARDIA, E. Meio ambiente.: **Produção e tecnologias limpas** – Informativo da Fundação Carlos Alberto Vazolini. Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica – USP. Ano IX, nº. 42, mar.-abr., 2000.

HASSUDA, S. **Impactos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero de Bauru.** (s.l.): Dissertação de Mestrado IG/USP, 1989.

KELLNER, E. **Projeto Básico para Ampliação e Reforma da ETE de água Vermelha.** Projeto 105p. 2003

LAMONICA, H. M. **Potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça.** Campinas: Editora Unicamp, 2006. (Palestra proferida no AGRENER).

LUDOVICE, M.T.F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático.** Dissertação Mestrado, Campinas: UNICAMP,117 p.,1997.

LUZ, P.H.C., **Novas tecnologias no Uso da Vinhaça e alguns Aspectos Legais, II Simpósio de Tecnologia de Produção de Cana-de-açúcar.** ESALQ, Piracicaba, 2005.

**LUZ, Pedro Henrique C. Novas Tecnologias no Uso da Vinhaça e Alguns Aspectos Legais.** II Simpósio de Tecnologia de Produção de Cana-de-Açúcar – 09 e 10 de junho de 2005. Acessado em 10 de março de 2014. Disponível em:<[http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/1c678d0ba742019483256e19004af5b8/6d4452a7dc2e1483032570d8003f1509/\\$FILE/Anais%20Pedro%20Henrique%20de%20C%20Luz.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/1c678d0ba742019483256e19004af5b8/6d4452a7dc2e1483032570d8003f1509/$FILE/Anais%20Pedro%20Henrique%20de%20C%20Luz.pdf)>

**MACEDO, I.C.; Leal, M.R.L.V.; Silva, J.E.A. Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) na Produção e Uso do etanol no Brasil.** São Paulo 2004.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia. Usinas aproveitam co-geração e lucram com mercado de crédito de carbono, 2006. Disponível em: <http://agenciact.mct.gov.br/index.php/content/view/42250.html>. Acesso em 28 mar. 2014.

MME (Ministério de Minas e Energia) Balanço Energético Nacional 2004, Brasília, 2005.

**PECORA, V. Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP: estudo de caso.** São Paulo, 2006. 152p.

**PENATTI, Cláudimir P.; FORTI José A.; SILVA, Paulo C. da.; COSTA, Vinícius M.; DONZELLI, Jorge L.; FARONI, Carlos E.** Vinhaça: **efeitos no solo e na planta.** 2007. Disponível em:

**PIERRE, Tatiana Dillenburg Saint'. Arquimedes.** Disponível em: [http://web.ccead.pucrio.br/condigital/mvsl/linha%20tempo/Arquimedes/pdf\\_LT/LT\\_arquimedes.pdf](http://web.ccead.pucrio.br/condigital/mvsl/linha%20tempo/Arquimedes/pdf_LT/LT_arquimedes.pdf). Acesso em 20 de jan de 2014.

**PORTAL TERRA ECONOMIA. CPFL conclui aquisição dos ativos de cogeração da Usina Ester.** Disponível em: [http://economia.terra.com.br/cpfl-conclui-aquisicao-dos-ativos-de-cogeracao-da-usina-ester,04585a5e56b41410VgnCLD200000bbcceb0a\\_RC\\_RD.html](http://economia.terra.com.br/cpfl-conclui-aquisicao-dos-ativos-de-cogeracao-da-usina-ester,04585a5e56b41410VgnCLD200000bbcceb0a_RC_RD.html). Acessado em 26/03/2014.

**POVEDA, M.M.R. Sustentabilidade da Biodigestão versus Combustão para o Tratamento da Vinhaça.** Piracicaba, 2012.

**PROCKNOR, C. Energia Elétrica a Partir da Vinhaça – STAB Maio/Jun 2008.** Disponível em:<<http://www.procknor.com.br/articles/energia-eletrica-a-partir-da-vinhaaca-%e2%80%93-stab-maijun-2008/>>. Acesso em 10 de março de 2014.

**REGO, E.E., HERNÁNDEZ, F.D.L. Eletricidade por digestão anaeróbia de vinhaça de cana-de-açúcar. Contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção.** USP, 2006.

**ROCHA, V.C. Processamento Anaeróbio de Vinhaça Pré-Tratada com Biopolímero à Base de Cálcio.** São Carlos, 2012, 86f. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências. Disponível em: <

[http://www.saocarlos.usp.br/index.php?option=com\\_content&task=view&id=9006&Itemid=154](http://www.saocarlos.usp.br/index.php?option=com_content&task=view&id=9006&Itemid=154)

SAKUMA, A.C. **Desenvolvimento e análise experimental de biodigestores modulares de baixo tempo de residência.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/254.pdf>>.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica da biodigestão anaeróbia das vinhaças.** Universidade de São Paulo. Trabalho apresentado no II GERA: Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindústria Sucroalcooleira. Itajubá: [s.n.], 2007. Disponível em: <[http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/novidades/workshop\\_gestao\\_energia\\_residuos/files/dia12/7-Karina-Ribeiro-Salomon.pdf](http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/novidades/workshop_gestao_energia_residuos/files/dia12/7-Karina-Ribeiro-Salomon.pdf)>.

SALOMON, K.R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade.** Itajubá, 2007. Dissertação (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <<http://juno.unifei.edu.br/bim/0032785.pdf>>.

SPADOTTO, C. **A Gestão de Resíduos: realizações e desafios no setor sucroalcooleiro.** (s/d) disponível [http://www.cnpma.embrapa.br/down\\_hp/360.pdf](http://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/360.pdf)

SZYMANSKI, M.S.E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W.N. **Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso.** Relato de Caso. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v.31, n. 4, p. 901-902, 2010. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/7596>>.

TERCIOTE, Ricardo. **Eficiência energética de um sistema eólico isolado.** UNICAMP, Campinas: 2002. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0100.pdf>>. Acesso em: 02 de fev de 2014.

ÚNICA 2012. <http://www.unica.com.br/noticia/39870311920324775593/cresce-utilizacao-de-vinhaca-de-cana-para-gerar-energia-e-como-fertilizante-/>

ÚNICA 2013, <http://www.unica.com.br/noticia/25007302920341358852/bioeletricidade-atinge-o-equivalente-a-uma-belo-monte-em-potencia-instalada/>.

VITTI, G. C.; QUEIROZ, F. E. C.; QUINTINO, T. A. **Micronutrientes na cana-de-açúcar: mitos e realidades** 2008. Disponível: em <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Anais\\_Godofredo\\_Cesar\\_Vitti\\_000fizug9hp02wyiv802hvm3j0am3m2k.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Anais_Godofredo_Cesar_Vitti_000fizug9hp02wyiv802hvm3j0am3m2k.pdf)> Acesso em: 11 dezembro de 2013.

<[http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/workshop\\_vinhaca\\_sessao3\\_claudimir\\_VS.pdf](http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/workshop_vinhaca_sessao3_claudimir_VS.pdf)>. Acesso em 23 fev.2014.