



INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIÁS



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO**  
**IFG CAMPUS GOIÂNIA**  
**MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

**Rosana Aparecida de Freitas**

**BIODIGESTÃO ANAERÓBIA COMO PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE  
TORTA DE FILTRO E VINHAÇA NA INDÚSTRIA DO ETANOL**

**Goiânia, 2014**

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO**  
**IFG CAMPUS GOIÂNIA**  
**MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

Rosana Aparecida de Freitas

**BIODIGESTÃO ANAERÓBIA COMO PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE  
TORTA DE FILTRO E VINHAÇA NA INDÚSTRIA DO ETANOL**

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTPS- IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos

Orientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang

Coorientadora: Prof. Dr. Warde Antonieta da Fonseca Zang

**Goiânia, 2014**

F884b Freitas, Rosana Aparecida de.

Biodigestão anaeróbia como proposta de gerenciamento de torta de filtro e vinhaça na indústria do Etanol/ Rosana Aparecida de Freitas. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2014.  
75 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang.

Coorientadora: Profª. Drª. Warde Antonieta da Fonseca Zang.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Gestão de resíduos. 2. Etanol. 3. Tratamento - resíduo. I. Zang, Joachim Werner (orientador). II. Zang, Warde Antonieta da Fonseca (coorientadora). III. Título.

**CDD 363.728 2**

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO  
IFG CAMPUS GOIÂNIA  
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Rosana Aparecida de Freitas

BIODIGESTÃO ANAERÓBIA COMO PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE  
TORTA DE FILTRO E VINHAÇA NA INDÚSTRIA DO ETANOL

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em  
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG  
(PPGTPS- IFG) - Dissertação de Mestrado  
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de  
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:  
Tecnologia de Redução e Gerenciamento de  
Resíduos



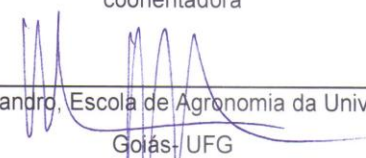
Dr. Joachim Werner Zang, Instituto Federal de Goiás - IFG

Presidente da banca examinadora e orientador



Dra. Warde Antonieta da Fonseca Zang, Instituto Federal de Goiás - IFG

coorientadora



Dr. Wilson Mozena Leandro, Escola de Agronomia da Universidade Federal de

Goiás- UFG

Membro Externo

Aprovado em: 09/agosto/2014.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha mãe Maria José de Freitas.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **Deus** pela infinita graças pelo dom da vida e o sustento dos meus passos.

Agradeço, em especial, ao Professor Dr. Joachim e à Professora Dr. Warde, pela orientação, amizade e confiança que em mim depositaram.

Ao Luis Sávio por todas as orientações e ensinamentos.

Ao meu amigo Gilberto Carvalho pela eterna amizade e ajuda.

A Camila Alonso por toda a colaboração do início ao fim dessa pesquisa de mestrado.

Ao Waldir Vieira pela grande contribuição na realização dessa pesquisa.

A Bárbara Alves pelo apoio e incentivo.

Aos amigos do Mestrado Carolina, Miron, Leila Ninon e Romário Victor.

Ao Laboratório Nacional Agropecuário em Goiás-LANAGRO-GO.

À Usina Denusa situada no município Jandaia/GO, pela permissão concedida para que fosse usada como campo de referência nesse trabalho.

## **EPÍGRAFE**

“Quando existe a convicção de que está havendo um avanço diário, mesmo que de um passo apenas, pode-se sentir pela vida uma razão de viver iluminada pela esperança de vencer.”

**Massaharu Taniguchi**

Título: Biodigestão Anaeróbia Como Proposta de Gerenciamento de Torta de Filtro e Vinhaça na Indústria do Etanol

Autor: Rosana Aparecida de Freitas

Orientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang

Coorientadora: Profa. Dr. Warde Antonieta da Fonseca Zang

## RESUMO

Na representação da matriz energética Brasileira em 2011 6,5% do total de energia produzida do Brasil eram advindos de Biomassas segundo dados publicados pelo Ministério de Minas e Energia. Na safra de 2011/2012 foram processadas 493.159 mil toneladas de cana-de-açúcar produzindo 20.542 bilhões de litros de etanol e na safra 2012/2013 foram moídas 532.758 mil toneladas de cana gerando um total de 1.362 milhões de litros de etanol de acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar. No processo produtivo do etanol são gerados subprodutos a vinhaça e torta de filtro. A vinhaça e a torta de filtro conseguem devolver ao solo quantidades significativas de potássio, fósforo, nitrogênio, enxofre, cálcio e magnésio, diminuindo gastos com a compra de fertilizantes minerais, o que aumenta a lucratividade da produção do etanol. Porém, sabe-se que principalmente a vinhaça, aplicada sem critérios ao solo, pode causar desequilíbrio de nutrientes, além de induzir a uma saturação do solo, ocasionando problemas de lixiviação de seus constituintes para águas subterrâneas. O reaproveitamento dos subprodutos do etanol deve ser acompanhado por uma tecnologia de tratamento de resíduos que possa diminuir a degradação ambiental ocasionado pelo atual sistema de gerenciamento de resíduos do etanol. A tecnologia de biodigestão anaeróbia caracterizada por ser um processo de estabilização biológica no qual um consórcio de diferentes microrganismos, na ausência de oxigênio, promove a transformação de matéria orgânica em biogás pode ser uma alternativa no tratamento dos subprodutos do etanol. Além disso, ao final do processo de biodigestão é produzido o biogás como uma fonte de energia alternativa composto por uma mistura de gases que contem o metano e dióxido de carbono como componentes principais, além de menores quantidades vapor de água, de gás sulfídrico, traços de hidrogênio, nitrogênio e amônia.

**Palavras-chave:** etanol, gerenciamento de resíduos, reaproveitamento, tratamento de resíduo.



Title: Anaerobic Digestion as a Proposal Management for the Filter Cake and Vinasse in the Ethanol Industry

Author: Rosana Aparecida de Freitas

Adviser: Prof. Dr. Joachim Werner Zang

Co-adviser: Profa. Dr. Warde Antonieta da Fonseca Zang

## **ABSTRACT**

According to the Brazilian energy matrix in 2011, 6.5% of the total energy produced in Brazil came from biomass. In the 2011/2012 harvest, 493,159,000 tons of cane sugar produced 20,542 billion liters of ethanol. In the 2012/2013 harvest, 532,758,000 tons of sugar cane were ground generating a total of 1,362 million liters of ethanol according to the union of Sugar Cane Industry Association. In the production process of ethanol, byproducts are generated as vinasse and filter cake. The vinasse and filter cake can return significant amounts of potassium, phosphorus, nitrogen, sulfur, calcium and magnesium to the soil, thus reducing expenses with the purchase of mineral fertilizers, which increases the profitability of ethanol production. However, it is known that the vinasse mainly applied to the soil without criterion can cause imbalance of nutrients, and induce a saturation of the soil, causing problems of leaching of constituents in groundwater. The reuse of byproducts of ethanol must be accompanied by a waste treatment technology that can reduce the environmental degradation caused by the current system of waste management in the industry. The technology of the anaerobic digestion process is characterized by biological stabilization in which a consortium of different microorganisms in the absence of oxygen, promotes the transformation of organic matter into biogas and it can be an alternative to treat the byproducts. In addition, the end of the digestion process, biogas is produced as an alternative energy source comprises a gas mixture containing methane and carbon dioxide as major components, and minor amounts of water vapor, hydrogen sulfide, nitrogen compounds.

Keywords: biogas, ethanol, material flow management, recycling, waste treatment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da produção de etanol no Brasil. ....	28
Figura 2 – Representação esquemática das etapas do processo de biodigestão anaeróbia.....	38
Figura 3 – Apresentação esquemática do funcionamento do reator anaeróbio.....	52
Figura 4 – Esquema do biorreator com adaptações no sistema de captação de biogás.....	54
Figura 5 – Esquema do biorreator com adaptações no sistema de captação de biogás.....	55
Figura 6 – Bancadas de reatores utilizados experimentos de biodigestão anaeróbia .....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Área, Produtividade e Produção da Indústria Sucroalcooleira nas safras de 2004 a 2013 .....	22
Tabela 2 – Moagem de cana-de-açúcar e produção de etanol entre safras dos anos de 1999 a 2014 .....	24
Tabela 3 – Composição química média da torta de filtro, subproduto do etanol .....	35
Tabela 4 – Produção, importação e consumo de fertilizantes no Brasil dos anos de 2007 a 2013. ....	42
Tabela 5 – Principais resíduos da produção do etanol gerado na safra 2012/2013 na destilaria Denusa, Jandaia, GO .....	51
Tabela 6 – Composição dos reatores usados nos experimentos de biogás .....	57
Tabela 7 – Nutrientes aplicados na adubação da cana-de-açúcar no Brasil .....	60
Tabela 8 – Composição química da vinhaça .....	61
Tabela 9 – Relação entre os nutrientes presentes na vinhaça durante a safra 2013/2014 da usina Denusa com a quantidade de áreas que poderia ser fertilizantes .....	62
Tabela 10 – Composição química da torta de filtro .....	64
Tabela 11 – Composição química da mistura da torta de filtro e vinhaça a 50% em massa ...	65
Tabela 12 – Contaminantes inorgânicos presentes em subprodutos e biofertilizantes .....	65
Tabela 13– Concentração de nutrientes, pH e a eficiência de remoção da matéria orgânica no Biofertilizante .....	66
Tabela 14– Matéria seca orgânica disponível para geração de biogás a partir dos resíduos vinhaça e torta de filtro da Denusa na safra de 2013/2014 .....	70
Tabela 15– Capacidade de geração de biogás a partir dos resíduos vinhaça e torta de filtro da Denusa na safra de 2013/2014.....	70

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção de cana-de-açúcar e área plantada da indústria sucroalcooleira brasileira entre 2004 e 2013 .....	23
Gráfico 2 – Produção de cana-de-açúcar e etanol da indústria sucroalcooleira brasileira entre 1999 e 2014. ....	25
Gráfico 3 – Evolução do volume importação e do dispendio com a importação de Petróleo 2003-2012.....	27
Gráfico 4 – Potencial de produção de biogás a partir dos subprodutos do etanol .....	67

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP- Agência Nacional do Petróleo

CTC- Capacidade de Troca Catiônica

EUA- Estados Unidos da América

FAO- Organização das Nações Unidas Para Alimentos e Agricultura

IPI- Imposto Sobre Produtos Industrializados

MAPA- Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento

PCTS- Pagamento de Cana-de-açúcar Por Teor de Sacarose

PROÁLCOOL-Programa Nacional do Álcool

## LISTA DE SÍMBOLOS

Cd- Cádmio

CaO – Óxido de Cálcio.

CO – Monóxido de Carbono.

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono.

Cr- Cromo

CuO – Óxido de Cobre II.

DQO – Demanda Química de Oxigênio.

K<sub>2</sub>O – Óxido de Potássio

MgO – Óxido de Magnésio

m/m- Massa/Massa

Mn- Manganês

Mo- Molibdênio

MSI- Massa seca inorgânica

MSO- Massa seca orgânica

N – Nitrogênio

N<sub>2</sub> – Gás Nitrogênio

Ni- Níquel

mL- mililitros

NmL/gmso- Mililitros por gramas massa seca orgânica

NO<sub>3</sub>- Nitratos

Pb- Chumbo

pH – Potencial de Hidrogênio.

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Pentaóxido de Difósforo.

Zn- Zinco

Se- Selênio

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
2	CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1	O ETANOL BRASILEIRO.....	19
2.2	O SISTEMA DE PRODUÇÃO DO ETANOL NO BRASIL.....	27
2.2.1	Moagem.....	29
2.2.2	Tratamento do caldo .....	30
2.2.3	Câmara de evaporação.....	32
2.2.4	Fermentação.....	32
2.2.5	Destilação .....	34
2.3	GERENCIAMENTO DE RESÍDUO DA PRODUÇÃO DO ETANOL.....	34
2.4	TECNOLOGIA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	37
2.5	MERCADO BRASILEIRO DE FERTILIZANTES .....	41
3	REFERÊNCIAS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O TEMA.....	43
4	CAPÍTULO III: ARTIGO ORIGINAL.....	46
4.1	INTRODUÇÃO .....	48
4.2	MATERIAL E MÉTODO .....	50
4.2.1	Desenvolvimento e operação do biorreator .....	52
4.2.2	Metologia utilizada na operação do biorretor.....	56
4.2.3	Montagem dos reatores em batelada .....	57
4.2.4	Caracterização dos resíduos e biofertilizantes.....	58
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	60
4.3.1	RESULTADOS OBTIDOS COM O EXPERIMENTO DE BIODIGESTÃO .....	64
4.3.1.1	Cálculo do potencial de metano safra 2013/2014 .....	69
5	REFERÊNCIAS .....	72

## 1 INTRODUÇÃO

Na representação da matriz energética Brasileira em 2011 6,5% do total de energia produzida do Brasil eram advindas de Biomassas segundo dados publicados pelo Ministério de Minas e Energia. Para fins energéticos a biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Portanto o etanol é um biocombustível produzido a partir da cana-de-açúcar e pode ser considerada uma fonte energética proveniente de biomassa (MME, 2012).

O recente desenvolvimento da indústria brasileira de açúcar e etanol pode ser dividido em duas fases marcantes. No período de 2005 a 2009, o setor obteve crescimento da produção de cana em cerca de 10% ao ano, estimulado pela expectativa de expansão da demanda interna de etanol e pelo incremento das exportações do produto ao mercado mundial. A partir de 2008, ocorreu reversão no fluxo de investimentos, causada pela crise financeira que assolou o cenário mundial, afetando seriamente as economias de diversos países, particularmente a dos EUA e da União Europeia (MORAES, 2013).

No Brasil nas safras dos anos 2011/2012 e 2012/2013 a quantidade de cana-de-açúcar processada teve um crescimento de 8,03% e a produção de etanol aumentou 3,99%. Na safra de 2011/2012 foram processadas 493159 mil toneladas de cana-de-açúcar produzindo 20542 bilhões de litros de etanol e na safra 2012/2013 foram moídas 532758 mil toneladas de cana gerando um total de 1.362 milhões de litros de etanol de acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2013).

No entanto esses valores estão abaixo das projeções de produção e são reflexo da crise financeira que afeta sensivelmente o desempenho da atividade agrícola. Programas envolvendo tratamentos culturais, a utilização de insumos e a renovação de canaviais deixaram de ser



cumpridos por força de escassez de capital financeiro diminuindo a produtividade do setor sucroalcooleiro.

O país tem estabelecido novos índices de produção, tanto na expansão de área plantada quanto no aumento da produtividade. Essa grande quantidade de etanol gera em seu processo produtivo subprodutos que representam ao setor sucroalcooleiro uma importante fonte de fertilização do solo. A vinhaça e a torta de filtro conseguem devolver ao solo quantidades significativas de potássio, fósforo, nitrogênio, enxofre, cálcio e magnésio, diminuindo gastos com a compra de fertilizantes minerais, o que aumenta a lucratividade da produção do etanol. Porém, sabe-se que principalmente a vinhaça, aplicada sem critérios ao solo, pode causar desequilíbrio de nutrientes, além de induzir a uma saturação do solo, ocasionando problemas de lixiviação de seus constituintes para águas subterrâneas. Pode-se dizer que a dosagem “ideal” da aplicação de vinhaça varia de acordo com o tipo de solo e variedades de cana-de-açúcar (NETO, 2008).

O etanol apresenta-se como uma forma alternativa e renovável de energia, no entanto a sustentabilidade de seu processo produtivo passa pelo melhor gerenciamento dos resíduos. A forma atual de gerenciamento dos subprodutos do etanol é baseada na disposição final desses resíduos no solo, e na grande maioria das usinas do Brasil essa prática não é acompanhada por um tratamento prévio dos resíduos gerados. Assim o reaproveitamento dos subprodutos do etanol deve ser acompanhado por uma tecnologia de tratamento de resíduos que possa diminuir a degradação ambiental ocasionado pelo atual sistema de gerenciamento de resíduos do etanol.

A tecnologia de biodigestão anaeróbia caracterizada por ser um processo de estabilização biológica no qual um consórcio de diferentes microorganismos, na ausência de oxigênio, promove a transformação de matéria orgânica em biogás pode ser uma alternativa no tratamento dos subprodutos do etanol. Além disso, ao final do processo de biodigestão é produzido o biogás como uma fonte de energia alternativa composto por uma mistura de gases que contem o metano e dióxido de carbono como componentes principais, além de menores quantidades vapor de água, de gás sulfídrico, traços de hidrogênio, nitrogênio e amônia.

Em virtude da probabilidade de expansão da cultura da cana-de-açúcar no estado de Goiás, e levando em consideração as 36 usinas já em funcionamento no Estado (SIFAEG, 2014) e que se faz necessário pesquisar formas de melhorias na forma atual de gerenciamento

de resíduos da industrial do etanol. Deste modo a pesquisa realizada buscou investigar o atual sistema de gerenciamento de resíduos do etanol com intuito, de testar a utilização da biodigestão anaeróbia, no tratamento de vinhaça e torta de filtro antes de serem usadas para fertilizar o solo.

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

Propor tecnologia de digestão anaeróbia para o sistema de gerenciamento de resíduos da indústria do etanol como forma de tratamento e aproveitamento dos resíduos de vinhaça e torta de filtro.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Investigar o sistema de gerenciamento adotado pela usina;
- Caracterizar os subprodutos do processo;
- Testar a tecnologia de biodigestão anaeróbia com forma de tratamento de resíduos;
- Propor alternativas mais sustentáveis ao atual gerenciamento de resíduos da usina.

## **2 CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 O ETANOL BRASILEIRO**

Na história brasileira a produção de cana-de-açúcar ocupa uma posição de destaque não somente por ser caracterizada a primeira monocultura praticada no país, e sim por ser a matéria prima na produção de um importante biocombustível o etanol. Passados mais de quinhentos anos em que a primeira plantação de cana-de-açúcar ocorreu seu cultivo continua a ter muita relevância na economia e na representação da matriz energética nacional.

O cultivo da cana-de-açúcar durante muitos anos deve como principal objetivo a produção do açúcar. Porém, o governo brasileiro motivado pela alta nos preços da gasolina ocasionado pela crise do petróleo no início da década de 70 criou o Proálcool (Programa Nacional do Álcool) que incentivou a produção do etanol combustível alternativo ao uso da gasolina promovendo o desenvolvimento tecnológico da indústria sucroalcooleira.

A situação do setor sucroalcooleiro antes do Proálcool apresentava um cenário sem muito destaque, o uso do etanol era praticamente em pequenas quantidades adicionados a gasolina ou como válvula de escape para excedentes de produção de cana-de-açúcar. Entretanto no início do Programa o estado da produção do etanol começou a mudar e os níveis de adição do biocombustível a gasolina foram aumentados atingindo 22%. Assim as áreas de plantio foram intensificadas novas usinas foram surgindo e a frota de carros do Brasil passou a ser abastecidas por um novo combustível o etanol.

Fernandes et al. (2007) em um estudo sobre biodiesel investigaram a viabilidade da implantação de um Programa do Biodiesel no Brasil dividindo o Programa Nacional do Álcool em três fases. Na primeira fase os autores apresentaram os seguintes indicadores: aumento do preço interno da gasolina, o valor do litro do álcool 25% mais barato, o baixo custo

do etanol produzido e o crescimento da área plantada com cana-de-açúcar em 32%, o que ocasionou um ganho na produtividade agrícola de 46,48 ton/ha nos anos 60 a 57,18 ton/ha, nos anos 70. Já na segunda fase os destaques foram: fixação do preço do álcool em 64,5% o preço da gasolina, a redução do Imposto sobre Produtos Industrializados IPI para carros movidos a álcool, o estabelecimento de nova meta de produção e desenvolvimento em regiões não tradicionais tais como: Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná, Santa Catarina e região Norte. A última fase foi marcada pelo declínio do Proálcool principalmente pela redução brusca dos recursos públicos investidos na expansão do programa, e pela recuperação dos preços internacionais do açúcar e pela queda dos preços do barril de petróleo: US\$ 35,00 em 1980 para US\$15,00 em 1988 desmotivam a produção alcooleira.

O Proálcool, de maneira geral, foi um programa bem sucedido que substituiu o consumo em grande escala dos derivados de petróleo. Principalmente porque sua criação evitou o aumento da dependência externa de divisas quando dos choques de preços de petróleo; a substituição de um volume de gasolina pura consumida por fração de álcool anidro (entre 1,1% a 25%) em uma frota superior a 10 milhões de veículos a gasolina. Isso proporcionou ganhos ambientais e econômicos devido a: (a) diminuição da taxa de emissão de gás carbônico da ordem de 110 milhões de toneladas de carbono (contido no CO<sub>2</sub>); (b) uma redução na importação de aproximadamente 550 milhões de barris de petróleo e (c) economia da ordem de 11,5 bilhões de dólares (RODRIGUEZ, 2008).

Porém para Bertone (2007) nem tudo foi positivo durante a implementação do Proálcool, visto que as mudanças na agricultura e na estrutura fundiária, impulsionadas pelo programa, trouxeram consequências ao meio ambiente, oriundas do monocultivo e da exploração não sustentável de recursos naturais como água e solo. Houve agravamento de pelo menos, dois grandes problemas ambientais: a) poluição atmosférica causada pelas queimadas; e b) poluição de cursos de água e do lençol freático pela aplicação excessiva da vinhaça *in na-*

*tura.*

Em março de 2003, foi lançado no mercado brasileiro o veículo bicombustível, movido tanto a álcool como a gasolina, tecnologia conhecida como flex fuel, que chegou para estimular a demanda doméstica de álcool. No contexto energético, a cana pode ser utilizada para produzir etanol anidro (usado misturado à gasolina), etanol hidratado (usado como combustível nos veículos exclusivos a álcool e flex fuel), e o excedente é usado para produzir de eletricidade por meio da queima do bagaço ou do biogás (FILHO; PICCIRILLI, 2012).

Nos últimos o Brasil vem acumulando conhecimento e respeito na atividade sucroalcooleira, fruto de um esforço conjunto entre entidades governamentais e os empreendedores do setor; o que faz o País figurar entre os maiores produtores mundiais de etanol. Na safra 2013/20014 foram produzidos 27.531 mil m<sup>3</sup> de litros de etanol no Brasil. Tudo isso foi possível por causa dos programas de melhoramento genético da cana-de-açúcar aliado ao desenvolvimento de tecnologia de produção e processamento, o que ocasiona explorar o potencial de produtividade da cana-de-açúcar, na menor área plantada, com alto índice de sacarose no extrato processado (UNICA, 2013).

O etanol produzido no Brasil mostra-se mais competitivo em relação ao etanol produzido em outros países, como nos Estados Unidos da América (EUA), maior produtor mundial de etanol, que usa como matéria-prima o milho, porém o etanol advindo da cana-de-açúcar tem maior produtividade na mesma área plantada. Apesar da vantagem que a cana-de-açúcar apresenta em relação ao milho na produtividade por hectare (Tabela 1), quando se compara o rendimento em litros produzidos de etanol por tonelada de matéria-prima, o milho tem vantagem, produzindo 371 litros contra 90 da cana de açúcar (MENDONÇA; JÚNIOR, 2010).

**Tabela 1:** Área, Produtividade e Produção da Indústria sucroalcooleira nas safras de 2004 a 2013

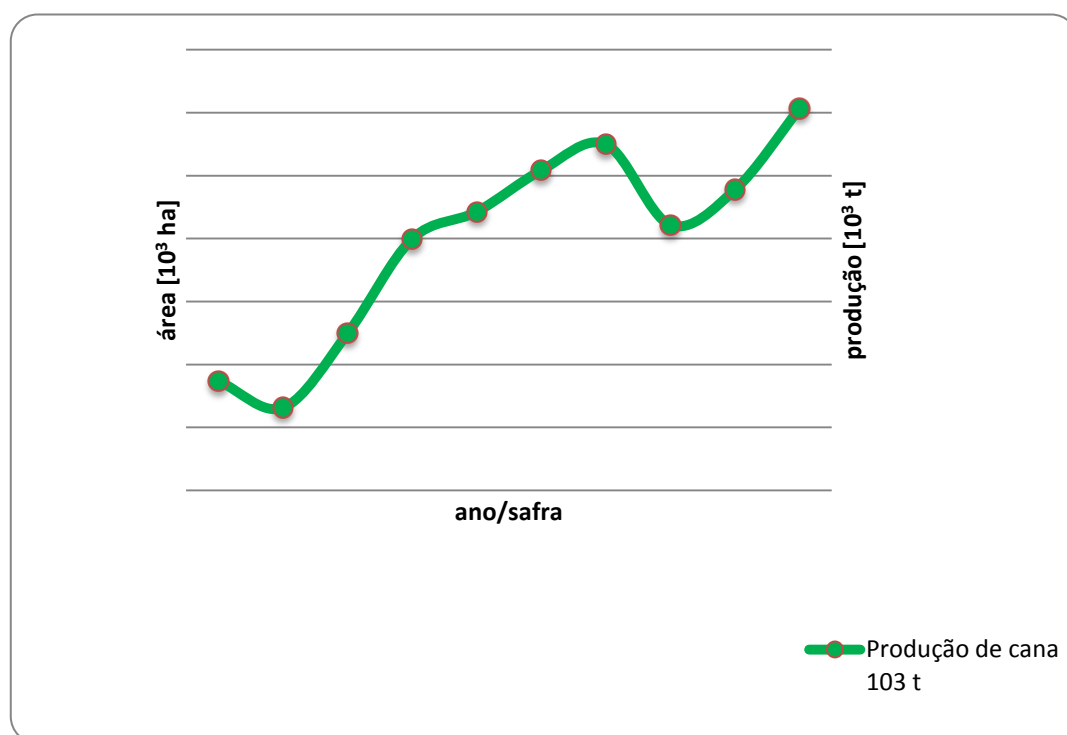
<b>Ano/Safra</b>	<b>Área</b> <i>Em mil ha</i>	<b>Produtividade</b> <i>Em Kg/ha</i>	<b>Produção</b> Em mil toneladas
2004/2005	5.625	73.897	436.781
2005/2006	5.877	74.318	415.694
2006/2007	6.162	77.038	474.800
2007/2008	6.963	78.969	549.905
2008/2009	7.057	80.965	571.434
2009/2010	7.409	81.585	604.313
2010/2011	8.033	77.798	624.991
2011/2012	8.362	67.081	560.954
2012/2013	8.485	69.407	588.915
2013/2014	8.811	74.769	653.319

**Fonte de dados brutos:** CONAB, 2014. Adaptado pela própria autora.

O Brasil tem apresentado nos últimos anos ganhos na produtividade de cana-de-açúcar por hectare de área plantada. O país, principal produtor mundial de cana-de-açúcar, possui clima, solo e topografia favoráveis, dando-lhe vantagens competitivas ao etanol produzido em outros países. Os dados de área plantada, produtividade e produção das dez últimas safras brasileira de cana-de-açúcar (Tabela 1) comprovam a soberania brasileira. As safras dos anos de 2008/2009, 2009/2010 e 2010/2011 destacam-se por possuírem maiores índices de produtividade e elevada produção de cana (CONAB, 2014)

Alterações climáticas nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar impactaram negativamente na produtividade na safra do ano de 2005/2006. Constantes períodos de escassez de chuva nas regiões Centro Sul e Sudeste prolongadas por alguns meses durante o período de safra fizeram com que a produtividade da cana-de-açúcar não acompanha-se o crescimento das áreas plantadas. O mesmo ocorreu na safra do ano 2011/2012 o clima foi o principal causador da queda da produção com chuvas escassas em toda a região Centro-Oeste e Su-

deste. Este comportamento do clima prejudica a brotação e o desenvolvimento da cana, tanto nas áreas colhidas como nas áreas de renovação e expansão (CONAB, 2014). A produção de cana-de-açúcar e área plantada da indústria sucroalcooleira brasileira entre 2004 e 2013, gráfico 1.



**Gráfico1** - Produção de cana-de-açúcar e área plantada da indústria sucroalcooleira brasileira entre 2004 e 2013. Fonte: CONAB, 2014.

Os automóveis que circulam no país utilizam dois tipos de etanol combustível: o hidratado (como combustível) e o anidro (misturado à gasolina A). E para ser comercializado no Brasil, o álcool combustível precisa cumprir especificações estabelecidas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP). Conforme a ANP etanol comum (etanol hidratado) vendido atualmente nos postos de abastecimento veicular, precisa ser límpido, transparente, isento de impurezas, com graduação alcóolica entre 95,1 % e 96%, pH neutro, e tolerância extremamente pequena de minerais e metais como ferro, sódio e cobre. Já o etanol anidro misturado, à gasolina

do tipo A, numa proporção de 25%, conforme determina a portaria MAPA N° 105/2013 possui uma graduação alcoólica de no mínimo 99,6% de álcool puro, e sua coloração é diferente do etanol hidratado, para ser diferenciado facilmente, sendo obrigatória a adição de um corante laranja no álcool anidro.

A moagem de cana-de-açúcar e produção de etanol nas últimas safras (Tabela 2) nas usinas brasileiras exibem o reflexo da situação do setor sucroalcooleiro. No início dos anos 2000, a produção de etanol dos tipos anidro e hidratado eram praticamente a mesma, porém, nos próximos cinco anos dessa mesma década até a safra 2005/2006, a oferta de álcool anidro superou a do tipo hidratado. A partir da safra do ano 2006/2007 até a última safra 2013/2014, o etanol hidratado vem sendo produzido em maior escala, se comparado ao álcool anidro.

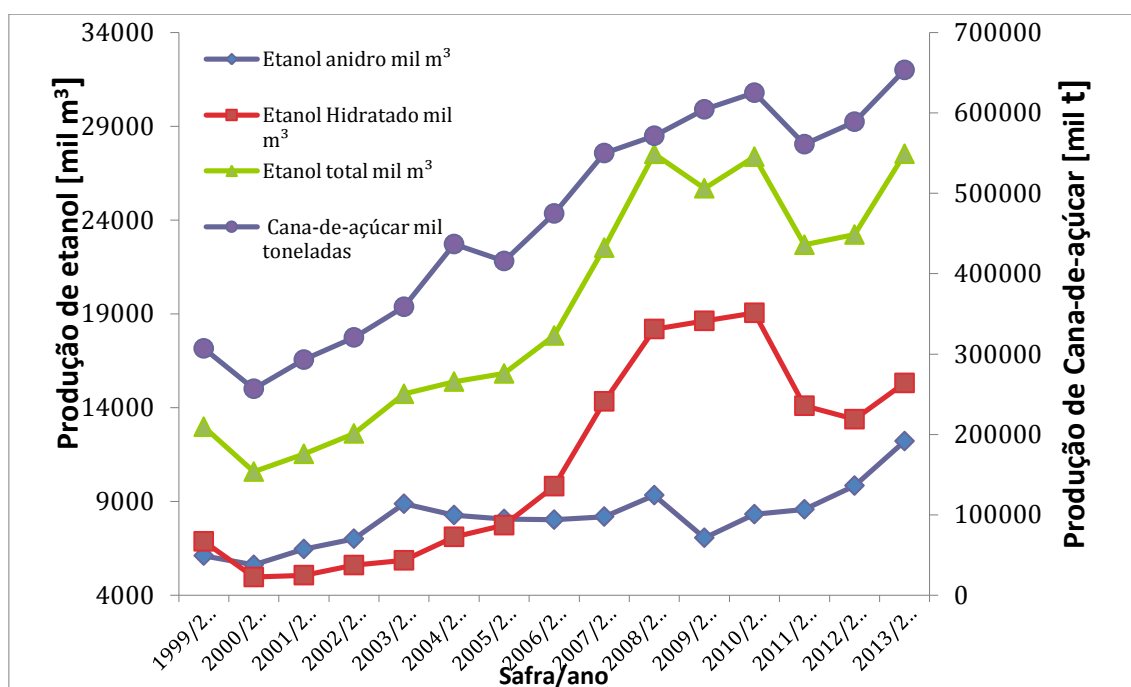
**Tabela 2:** Moagem de cana-de-açúcar e produção de etanol entre safras dos anos de 1999 a 2014.

Safra/ Ano	Cana-de-açúcar mil toneladas	Etanol Anidro mil m <sup>3</sup>	Etanol Hidratado mil m <sup>3</sup>	Etanol total mil m <sup>3</sup>
1999/2000	307.013	6.112	6.871	12.983
2000/2001	256.818	5.621	4.971	10.592
2001/2002	293.042	6.465	5.071	11.536
2002/2003	320.650	7.015	5.608	12.623
2003/2004	358.762	8.876	5.861	14.736
2004/2005	436.781	8.276	7.113	15.389
2005/2006	415.694	8.067	7.734	15.821
2006/2007	474.800	8.030	9.814	17.844
2007/2008	549.905	8.193	14.333	22.527
2008/2009	571.434	9.336	18.190	27.526
2009/2010	604.313	7.065	18.626	25.691
2010/2011	624.991	8.323	19.053	27.376
2011/2012	560.954	8.581	14.101	22.682
2012/2013	588.915	9.844	13.382	23.226
2013/2014	653.319	12.217	15.314	27.531

**Fonte de dados brutos:** UNICA, 2014. (Adaptado pelo autor).



A Produção de cana-de-açúcar cresceu da safra do ano de 2001/2002 até safra do ano 2010/2011 refletindo também na produção de etanol total, que atingiu maior índice ao final da safra de 2010/2011. Porém no ano de 2011 ao início do ano de 2013 a crise financeira que afligiu o setor sucroalcooleiro afetou a produção de cana-de-açúcar, que foi menor do que a dos anos anteriores. A falta de investimentos na compra de insumos agropecuários e renovação dos canaviais foram as principais causas na baixa produtividade da cana e consequentemente da menos produção de etanol diminuído a oferta desse biocombustível para o consumidor (UNICA, 2014). No gráfico 2, a produção de cana-de-açúcar e etanol da indústria sucroalcooleira brasileira entre 1999 e 2014 pode-se notar toda a evolução na produção tanto de cana-de-açúcar como a produção de etanol esse progresso foi marcado por mudança na produção e consumo do etanol Brasileiro.



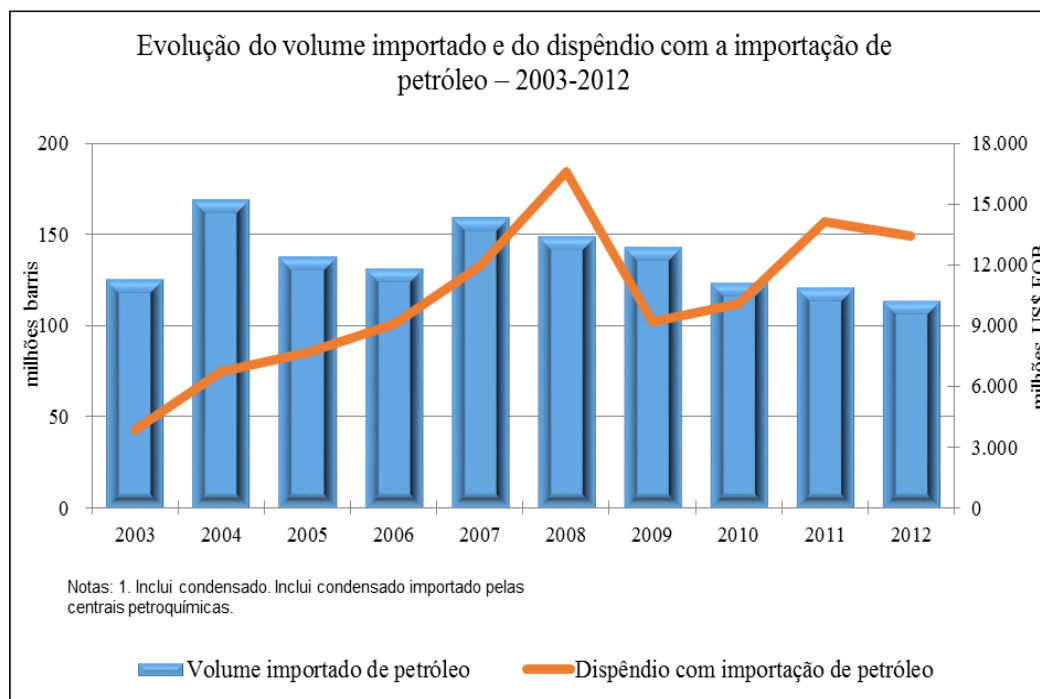
**Gráfico 2** - Produção de cana-de-açúcar e etanol da indústria sucroalcooleira brasileira entre 1999 e 2014. UNICA, 2014.

A superioridade da produção do etanol hidratado foi incrementada a partir do surgimento do carro flex fuel no ano 2003, em 2004 esses veículos representavam 2% da frota;

em 2008 respondiam por 31%. O resultado foi um crescimento vertiginoso da demanda por etanol hidratado, que em 2009 superou as vendas de gasolina C. A principal característica do mercado consumidor brasileiro de combustíveis é a concorrência entre o etanol hidratado e a gasolina C na bomba para os veículos flex fuel. A concorrência entre os dois combustíveis líquidos está relacionada à sensibilidade das demandas dos dois combustíveis frente a variações no preço relativo (NASTARI, 2013).

O balanço entre a produção e consumo de petróleo no Brasil expõem um déficit representado pelo índice de importação dessa matriz energética pelo país. Mesmo com uma grande quantidade de reservas de petróleo descobertas nos últimos anos a dependência externa de petróleo é evidente conforme o volume e o dispêndio com a importação de petróleo entre os anos 2003 e 2012 (Figura 3). Em 2012, o país gastou US\$ 3 bilhões com a importação de 3,76 bilhões de litros de gasolina e no ano de 2013 a importação de 686,4 mil de litros de gasolina, com dispêndio de US\$ 509 milhões, e novas estimativas de importação de gasolina indicam que em 2020 serão gastos US\$ 7,5 bilhões (ANP, 2013).

Evolução do volume importação e do dispêndio com a importação de petróleo-2003-2012 (Gráfico 3).



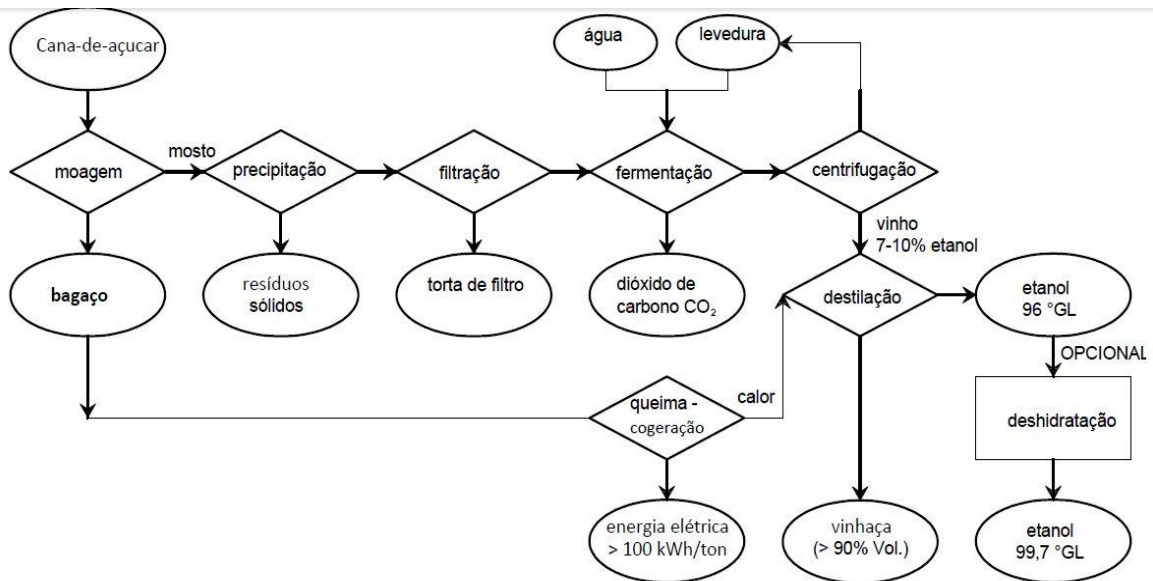
**Gráfico 3** - Evolução do volume importação e do dispêndio com a importação de petróleo-2003-2012. **Fonte:** Agencia Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis, 2013.

## 2. 2 O SISTEMA DE PRODUÇÃO DO ETANOL NO BRASIL

Atualmente o setor produtivo de etanol vive uma das fases mais desafiadoras ao longo dos cinco séculos de produção de cana-de-açúcar no país. Principalmente após a recente crise mundial ocorrida entre os anos de 2008 a 2012, e os problemas climáticos que atingiram as últimas safras, o aumento nos custos de produção e a política de preços para os combustíveis fósseis, entre outros aspectos. No entanto, há uma relação paradoxal entre a situação econômica apresentada pelas unidades produtoras de etanol e o índice recorde de produção da última safra (2013/2014) brasileira de cana-de-açúcar, sendo crescente a procura por formas alternativas de atender à demanda por energia e por novos processos, que permitam a otimização das fontes existentes visando à diversificação da matriz e à garantia de oferta a preços acessíveis. Assim o setor de produção de etanol reconhecido mundialmente por gerar benefícios sociais e ambientais relevantes busca manter a competitividade perante outras fontes de

energia através de investimentos em pesquisas de melhoramento do sistema de produção atualmente existente (RIBEIRO, 2003).

O processo de produção do álcool adotou como referência o modelo de destilação do etanol feito pela maioria das usinas no Brasil, tendo com diferencial somente a tecnologia aplicada no processo, qual é específica de cada usina variando conforme o capital disponível para o investimento em novas tecnologias. A produção do etanol é dividida em: moagem, tratamento de caldo, câmara de evaporação, fermentação e destilação. Conforme pode ser observado do fluxograma da produção do etanol no Brasil, na Figura 1.



Fluxograma da produção de etanol no Brasil.

Desenho Técnico 2012: Joachim Werner Zang, Warde A. da Fonseca-Zang, Química, IFG, Goiânia

**Figura 1** - Fluxograma da produção de etanol no Brasil.

Com o intuito de facilitar o entendimento das etapas de produção do etanol, a descrição do sistema de produção será feita em forma de tópicos, conforme vão ocorrendo, até a obtenção do etanol.

### 2. 2. 1 Moagem

A moagem da cana-de-açúcar consiste necessariamente em etapas que objetivam a maior extração de sacarose possível, portanto é dividida em três partes: (a) recepção da cana-de-açúcar; (b) preparo do extrato da cana-de-açúcar e (c) moagem. Na recepção da cana-de-açúcar é coletada uma amostra representativa de cana no caminhão para análise de pagamento de cana-de-açúcar por teor de sacarose (P.C.T.S). Em seguida, a cana-de-açúcar vai para a moagem, processada no mesmo dia (GONZALÉZ; GARLOBO, 1999).

O próximo passo da etapa de moagem trata do preparo da cana que é uma etapa constituída por sistemas, nivelador, picador, tambor, desfibrador e espalhador de cana. No nivelador, acontece a uniformização da cana-de-açúcar na esteira, uma vez que quando do lançamento ocorre uma má distribuição da amostra, fazendo-se necessário uma maior organização que facilitar a moagem e em seguida, a cana-de-açúcar é cortada no picador, para facilitar o processo de moagem. Em seguida tem-se o recebimento da cana-de-açúcar em um tambor, o qual recebe a mesma e a distribui em uma camada mais fina sobre a esteira. Subsequentemente, a cana-de-açúcar segue para o desfibrador, equipamento composto por vários martelos, cuja função é “quebrar” ainda mais o bagaço. O desfibrador, então, alimenta o espalhador, o qual distribui, novamente, a cana-de-açúcar sobre a esteira com direcionamento para a fase de moagem (RIBEIRO, 2003).

Na continuação da etapa de moagem, ocorre a moagem propriamente dita por meio de seis ternos de moenda, em que o primeiro não há embebição da cana-de-açúcar e os outros cinco ternos há. A embebição é feita com água à temperatura ambiente e a sua entrada no processo começa no sexto terno, a partir daí o caldo produzido pelo terno da frente é usado como embebição no terno anterior, até o segundo terno. Portanto, a embebição e o bagaço

seguem fluxos contrários, o bagaço é moído do primeiro ao sexto terno enquanto a embebição se dá do sexto ao segundo terno. A embebição é um processo utilizado com a finalidade de aumentar a extração da sacarose, sendo que o extrato quando chega ao primeiro terno já possui uma concentração de 80 a 85% de sacarose. Todo o caldo extraído, do primeiro ao sexto terno, é bombeado para a peneira rotativa, para que o bagaço, que passou no processo de moagem seja separado do caldo. O caldo peneirado é enviado ao tanque de caldo misto e o bagaço cai direto no primeiro terno da moenda, para que o caldo que ainda está no bagaço possa ser aproveitado (OLIVEIRA, 2007).

Como resultado do processo de moagem, surgiu um importante subproduto da cana-de-açúcar o bagaço, que trata de um material fibroso, de baixa densidade, tamanho altamente variável, umidade de, aproximadamente 50%, (em base úmida), sendo transportado das moendas ou difusores em esteiras até os alimentadores de bagaço das caldeiras para ser queimado nas caldeiras. Situação que acabou beneficiando as indústrias, pois, dessa forma evita-se o uso de combustíveis externos e se dispõe de todo o bagaço produzido, o que é uma consequência lógica e ambientalmente correta e economicamente rentável para as usinas em geral. O processo de cogeração de energia no setor sucroalcooleiro consiste em aproveitar o vapor produzido (energia térmica) pela queima de bagaço em caldeiras, para movimentar os equipamentos da própria unidade industrial e, simultaneamente, acionar conjuntos, geradores de energia elétrica (MARCOCCIA, 2007).

### **2. 2. 2 Tratamento do caldo**

O caldo misto da cana-de-açúcar que origina da etapa de moagem é uma solução contendo diversas substâncias solúveis como sacarose, glicose, frutose, sais minerais, compostos nitrogenados, e ainda em suspensão o bagacilho, terra, cera, etc. Como se trata de matéria-prima extrativa, o caldo de cana é de composição extremamente variável, podendo apre-

sentar alterações devido, principalmente, aos fatores: a) variedade da cana, idade e sanidade da cana, b) condições climáticas, c) tratos culturais, d) condições de solo e nutricionais, e) tempo de espera para a industrialização, após a despalha pelo fogo e f) tempo de espera para industrialização após o corte.

O processo de tratamento do caldo fundamenta-se na coagulação dos seus colóides (partículas que não podem ser vistas a olho nu) e na formação de um precipitado insolúvel que tem a finalidade de absorver e arrastar as impurezas, responsáveis pela natureza turva e opalescente do caldo. Nessa etapa procura-se a remoção de impurezas em suspensão e a não inversão da sacarose através da elevação do pH em nível onde as perdas de sacarose sejam as mínimas possíveis; a manutenção dos açúcares redutores presentes no extrato; a diminuição do teor de sais solubilizados; a eliminação dos colóides que são partículas que não podem ser vistas a olho nu; o aumento do coeficiente de pureza do caldo e a produção de um caldo límpido, transparente, tal qual o obtido pela dissolução de açúcar em água (RIBEIRO, 2003).

Normalmente, os processos atuais de tratamento do caldo consistem em um tratamento à base de cal e calor, formando um precipitado pesado de composição complexa, no qual parte é mais leve e parte é mais pesada do que o caldo. Esse precipitado floculante leva consigo a maior parte do material fino que está no caldo e que não foi extraído pelas peneiras no setor de moagem, onde a separação deste precipitado é feita por sedimentação e decantação. Por esses processos, procura-se separar tanto quanto possível do caldo as impurezas em suspensão. Ao final da etapa de tratamento de caldo, é obtida a torta de filtro, importante subproduto da cana-de-açúcar na produção do etanol, que consiste em uma mistura do lodo com bagacinho de cana-de-açúcar que saíram do processo de filtragem. Normalmente a torta de filtro é utilizada como fertilizante natural, cuja composição química envolve nutrientes essenciais para a fertilização do solo, tais como: nitrogênio orgânico (em formas amoniacais ou forma nítrica), fósforo na forma de outros compostos como pentaóxido difósforo ( $P_2O_5$ ), óxi-

do de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) e outros nutrientes (AGUILERA; RUIZ, 1999).

### **2. 2. 3 Câmara de evaporação**

A câmara de evaporação é dotada de quatro lunetas de vidro, protegidas com guarnições de bronze, como também manômetros e termômetros. Essa câmara propicia observação do caldo em ebulição, dando uma ideia do nível além dos transmissores e sensores de nível. Seu principal objetivo é diminuir os riscos de arrastes de gotículas de líquido que se projetam junto com os vapores, oriundos da ebulição do caldo. Os vapores dessa câmara, alcançando o vaso de segurança central, saem por um tubo de grosso diâmetro que os conduzirá ao condensador (RIBEIRO, 2003).

A calandra é o elemento de aquecimento do vaso evaporador, constituindo, neste caso, a sua parte intermediária. Ela é formada por dois espelhos perfurados, os quais são interconectados por uma série de tubos metálicos, presos nos furos por mandrilamentos. Após o caldo passar pelo pré-evaporador ele chega à temperatura de mais ou menos 90°C, ele passa pelo regenerador, que é um trocador de calor entre as temperaturas do caldo do pré-evaporador e o caldo do tanque de caldo misto, pois o caldo do pré-evaporador precisa diminuir a temperatura enquanto que o caldo misto tem que elevar sua temperatura, assim é feito uma economia de energia (OLIVEIRA, 2007).

### **2. 2. 4 Fermentação**

O caldo decantado e pré-evaporado sai do regenerador com temperatura aproximada de 60°C; passa pelo trocador de calor e sai do trocador com temperatura de mais



ou menos 29°C. O caldo nesse estágio do processo (chamado mosto) é misturado ao fermento em tubulações. Essa mistura de mosto e fermento vão para as dornas de fermentação que são caracterizadas como fermentação contínua que ocorre em quatro estágios. Sendo todas as dornas de uma destilaria de igual volume, dependendo somente da capacidade de cada usina em relação ao volume de produção do etanol (AGUILERA; RUIZ, 1999).

Cada dorna é ligada a um trocador de calor por meio de tubulações, cujo objetivo é promover o controle de temperatura da fermentação, uma vez que as reações são exotérmicas. A temperatura e o Brix (são os sólidos solúveis na cana ou na solução açucarada, dos quais uma parte é a sacarose) das dornas são controlados, a cada hora, pelo operador em conjunto com o laboratório industrial. Após passar pelo primeiro estágio, o vinho bruto e o fermento passam para o segundo estágio, onde a temperatura também é mantida em torno de 33°C e o Brix gira em torno de 2,0 a 1,0. Em seguida, o vinho bruto e o fermento passam pelo terceiro estágio que é a centrifugação, tanto do fermento quanto do vinho bruto. Essa etapa ocorre se o grau Brix e o residual de açúcar forem iguais a zero ou próximo desse valor. Ao contrário, o fermento e o vinho bruto são enviados ao quarto estágio para que o Brix e o residual se aproximem do zero (RIBEIRO, 2003).

O vinho bruto e o fermento filtrado vão para o tanque de vinho, de onde são bombeados para as centrífugas. As centrífugas permitem usar o mesmo fermento para várias fermentações, e quando a centrifugação é eficiente, a concentração de fermento na dorna se eleva e a fermentação fica mais rápida, menos sujeita à infecção. O desempenho das centrífugas é fator primordial para se obter altos rendimentos. Um bom desempenho significa concentrar 70 a 80% do creme ou do leite e perder, minimamente, o vinho centrifugado (0,05 – 0,1% v/v de concentração de levedo) (AGUILERA; RUIZ, 1999).

### 2. 2. 5 Destilação

Na etapa de destilação do etanol, o vinho com sua porcentagem alcoólica é enviado aos aparelhos de destilação, onde passa por colunas destiladoras que servem para remover impurezas do vinho. O etanol purificado e diluído é retirado da coluna de destilação extrativa pela parte inferior dessa coluna, o álcool com qualidade industrial é retirado lateralmente de uma das bandejas superiores e enviado para desidratação.

Durante a etapa de desidratação, o etanol é alimentado quente em fase líquida a um conjunto de trocadores de calor que tem por finalidade aquecer, vaporizar e superaquecer o etanol para que possa ser desidratado. Após esse processo é adicionado o ciclo hexano no produto já fabricado que tem a finalidade de extrair a água. Deste ponto em diante o etanol em fase vapor passa pelo leito de peneiras de onde já se retira o álcool neutro anidro bastando condensá-lo e resfriá-lo para enviar ao armazenamento. Ao final da etapa de destilação tem-se a vinhaça que é uma espécie de água residuária complexa muito concentrada, podendo atingir concentração acima de 100g/L de matéria orgânica em termos de DQO (200 vezes mais concentrada que o esgoto doméstico em média) e é produzida em temperaturas altas, em torno de 80 a 90 °C. Porém por apresentar uma composição química com nutrientes como: óxido de potássio ( $K_2O$ ), fosfato ( $P_2O_5$ ), óxido de cálcio ( $CaO$ ), nitrogênio (em forma amoniacais ou nítricas), óxido de manganês ( $MgO$ ), óxido de cobre II ( $CuO$ ), água ( $H_2O$ ), dentre outros, vem sendo muito utilizada na prática de fertirrigação dos canaviais brasileiros (VIANNA, 2006).

### 2. 3 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DO ETANOL

O uso da torta de filtro é como biofertilizante, devido a grande quantidade dispo-

nível de nitrogênio, fósforo, cálcio e matérias orgânicas, que em geral, que enriquece o solo, conforme pode ser observada na tabela de composição química média da torta de filtro (Tabela 3). Trata-se de material com relação carbono/hidrogênio muito elevada, característica de materiais altamente carbonáceos como a palha. No entanto, a inclusão na torta de filtro dos compostos orgânicos nitrogenados, floculados do caldo, faz com que o teor de nitrogênio do material se eleve, determinando uma relação C/N com valor médio de 26,1% a qual é comparada à quantidade de C/N presente nas leguminosas e no estrume, percentagem respectiva de 20 e 30,1% de C/N (AGUILERA; RUIZ, 1999).

**Tabela 3:** Composição química média da torta de filtro, subproduto do etanol.

C/N	Mat.Org.	C <sub>org</sub>	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Cinzas
g Kg <sup>-1</sup>								
<b>26,1</b>	<b>85,1</b>	<b>36,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,0</b>	<b>0,7</b>	<b>5,5</b>	<b>0,6</b>	<b>14,9</b>

Fonte: AGUILERA; RUIZ, 1999.

Os Impactos positivos: 1) alteração da população microbiana: desenvolvimento da população de microrganismos (fungos e bactérias), favorecida pelo aporte de matéria orgânica e nutriente. 2) Alteração do CTC do solo: Aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), principalmente pelo aporte de matéria orgânica no solo e, conseqüente, aumento das cargas negativas; 3) Alteração da concentração de íons “nutrientes” disponível na solução do solo: Aumento da concentração dos íons de fundamental importância para a nutrição das plantas, como por exemplo, potássio (K<sup>+</sup>), cálcio (Ca<sup>+2</sup>) e magnésio (Mg<sup>+2</sup>) que se apresentam em elevadas concentrações na vinhaça. 4) Alteração da estrutura física do solo: Melhorias estruturais ocasionadas pela ação de microrganismos que se desenvolvem no ambiente. 5) Redução de escavações em jazidas de fertilizantes: Redução das pressões antrópicas sobre os depósitos minerais, através da reutilização dos subprodutos do processo produtivo (CRUZ, 2011)

Impactos negativos: 1) Alteração (elevação) do pH: Redução inicial do pH devido

à característica ácida da vinhaça (pH médio em torno de 4) e posterior elevação resultante da ação dos microorganismos. 2) Salinização: Elevação na concentração de sais no solo pelo uso da vinhaça ao longo dos anos. 3) Alteração da carga orgânica: Aumento da carga orgânica nos corpos de água ocasionada pelo transbordo e arraste da vinhaça dos tanques de armazenamento e canais de transporte, principalmente nos meses mais chuvosos. 4) Alteração da concentração de nutrientes: Aumento da concentração de nutrientes (N, K, Ca e Mg) nos corpos de água devido ao transbordo e arraste de vinhaça dos tanques de armazenamento e canais de transporte, principalmente nos meses mais chuvosos, potencializando alterações da qualidade da água, por exemplo, no seu padrão de potabilidade da água( MANGALHÃES, 2010). 5) Alteração da carga orgânica: Aumento da carga orgânica nas águas subterrâneas, carregada por percolação, alteração o padrão de potabilidade da água. 6) Alteração da concentração de nutriente: Aumento da concentração de nutrientes (principalmente N e K) nas águas subterrâneas, carregados por percolação, alterando o padrão de potabilidade da água. 7) Alteração das concentrações de sais: Aumento da concentração de nutrientes de sais dissolvidos (principalmente de cloretos) nas águas subterrâneas, carregados por percolação, alterando o padrão de potabilidade da água. 8) Alteração da concentração de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ): Aumento da concentração de nitrato nas águas subterrâneas, composto potencialmente causadores de doenças, como a metemoglobinemia e outras doenças carcinogênicas. 9) Alterações da qualidade da Água: Aporte de substâncias solúveis (i. e, sais minerais, compostos orgânicos, etc.) carregadas pela percolação da água da vinhaça, potencializando alterações da qualidade da água (i.e, alterações do padrão de potabilidade) (SILVA, 2012)

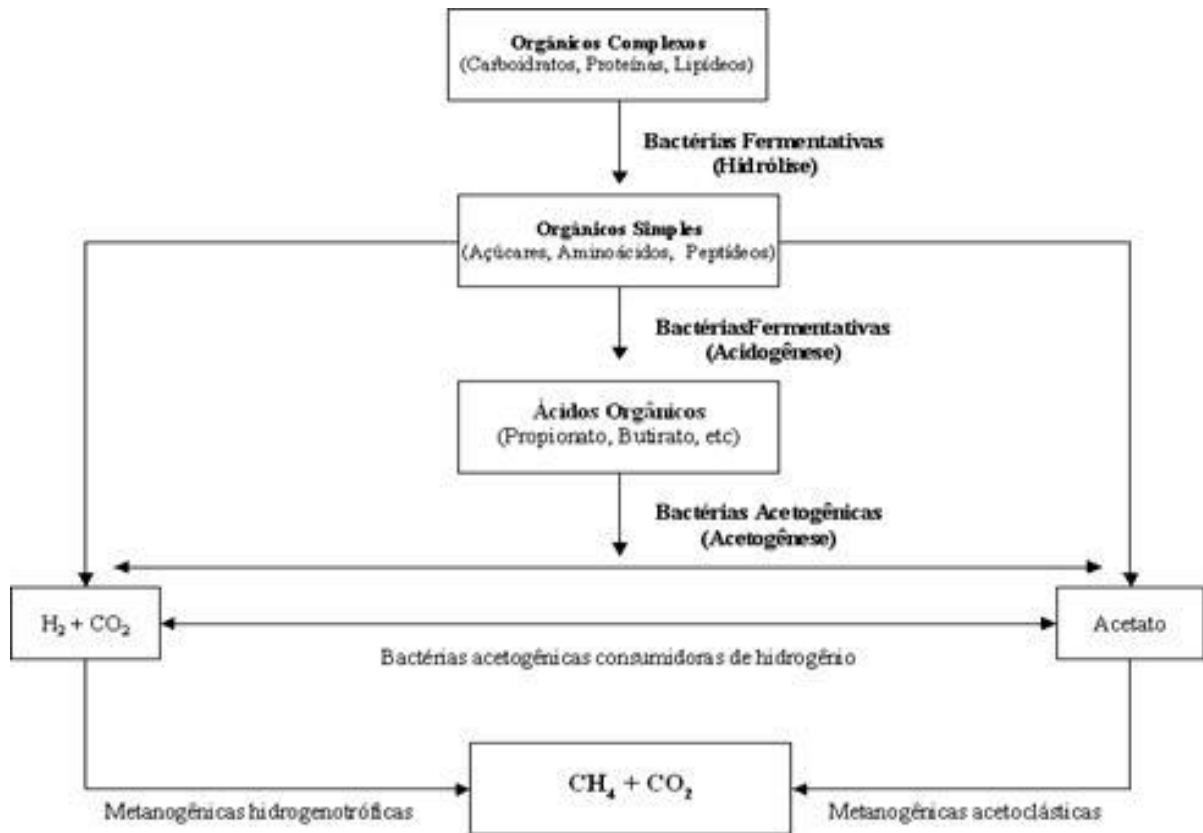
## 2. 4 TECNOLOGIA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A humanidade busca na natureza exemplos e inspirações para resolução de vários problemas atualmente existentes. Nas questões ambientais não é diferente principalmente no tratamento de efluentes, registros indicam que o processo bacteriológico de fermentação da matéria orgânica começou a ser utilizados no século XVIII. A primeira instalação operacional destinada a produzir gás combustível a partir da degradação anaeróbica da matéria orgânica foi construída em 1857 na Índia. Pesquisadores alemães e franceses desenvolveram pesquisas estabelecendo bases teóricas e experimentais da biodigestão anaeróbica. Esses conhecimentos proporcionaram a países como França, Argélia e Alemanha a utilizar durante a Segunda Guerra Mundial, devido à escassez de combustível, o metano de biodigestores para mover automóveis (PINTO, 1999).

O processo de degradação da matéria orgânica em condições de anaerobiose (na ausência de oxigênio) possui alto grau de complexidade, pois são envolvidas muitas espécies de bactérias com funções diferenciadas, atuando de forma simbiótica. Na relação de simbiose as bactérias utilizam a matéria orgânica de forma assimilativa para o crescimento da população atuante no processo (SANT`ANNA, 2010).

Na etapa de hidrólise os materiais orgânicos complexos de alta massa molar como as proteínas, polissacarídeos, lipídios, ácidos nucleicos presentes na forma particulada, são transformados em substância de menor massa molar como os açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, etc. pela ação de enzimas hidrolíticas excretadas por diversas espécies microbianas. Normalmente essa etapa pode ocorrer de forma mais lenta do que as demais, e fatores como pH, temperatura, tempo de retenção, tamanho e distribuição das partículas podem influenciar na hidrólise da matéria orgânica (COSTA, 2006).

Etapas da biodigestão anaeróbica: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, figura 2.



**Figura 2:** Representação esquemática das etapas do processo de biodigestão anaeróbica (Fonte: TORRES et al., 2012).

Segundo Salomon (2007) a degradação de matéria orgânica que contém gordura (lipídeos) por muito tempo não pode ser realizada pelo processo de biodigestão anaeróbica, devido principalmente a problemas de arraste de biomassa (massa de microorganismos) e formação de substâncias tóxicas. Porém por meio de pesquisas foram descobertos que dependendo do tipo de composto a hidrólise se realiza por diferentes grupos extracelulares tornando a degradação de compostos que contenham lipídios possíveis.

Na continuação do processo de biodigestão anaeróbica as substâncias resultantes das etapas de hidrólise são fermentadas gerando ácidos carboxílicos de cadeia curta, os chamados ácidos voláteis como o fórmico, acético, propiônico, butírico, valérico. Como os ácidos

graxos voláteis são os principais produtos dos organismos fermentativos, estes são chamados bactérias fermentativas acidogênicas. Nessa etapa as bactérias crescem rapidamente e a produção de ácido acético é predominante; mas poderão ser produzidas outras substâncias conforme o acúmulo de hidrogênio durante as perturbações de carga orgânica do sistema (SANT`ANNA, 2010).

As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas portanto essa é uma das etapas críticas do processo de biodigestão anaeróbia (SOARES e ZAIAT, 2007). A formação de acetato e de hidrogênio pode ocorrer de duas formas: a acetogênese de hidrogenação que produz ácido acético como um só produto final de fermentação de hexose ou de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  e a acetogênese de desidrogenação que converte os ácidos graxos de cadeia curta e longa em ácido acético por um grupo de bactérias acetogênicas (CHERNICHARO, 1997). Durante a formação dos ácidos acéticos uma grande quantidade de hidrogênio é formada, fazendo com que o valor do pH no meio aquoso decresça. De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas metanogênicas (SOLOMON, 2007).

E finalmente ocorre a etapa de metanogênese que consiste na transformação dos produtos formados anteriormente em metano ou de dióxido de carbono pela ação das bactérias metanogênicas. É nesta etapa que ocorre, efetivamente, a mineralização dos poluentes (compostos de carbono). A formação do metano pode ocorrer pela ação de diferentes grupos de bactérias metanogênicas: as acetoclásticas e as hidrogenotróficas. A produção de metano a partir ácido acético ou metanol é feita pelas bactérias acetoclásticas, já a utilização de dióxido de carbono é por meio das bactérias hidrogenotróficas (PINTO, 1999).

Ao final de todo o processo de biodigestão anaeróbia é obtido o biogás fonte alternativa de energia. Sua composição é uma mistura de gases onde o metano (40-75%) e o

dióxido de carbono (25-40%) estão em maiores proporções, e em menores quantidades nitrogênio (0,5-2,5), oxigênio (0,1-1%), ácido sulfídrico (0,1-0,5 %), amônia (0,1-%) dentre outros gases (SOLOMON, 2007). Além disso, na ação das bactérias é gerado o biofertilizante resíduo líquido da biodigestão. Sua composição química apresenta nutrientes essenciais às plantas como os macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio justificando seu uso na agricultura.

A atividade microbiana essencial à biodigestão anaeróbica necessita de condições específicas de temperatura, potencial de hidrogênio (pH), necessidade nutricional. Esses fatores são de suma importância para manutenção da população de bactérias na tecnologia de biodigestão anaeróbia.

As temperaturas associadas ao desenvolvimento microbiano são classificadas conforme a faixa de temperatura ideal para o crescimento das bactérias, como: faixa psicrófila temperatura entre 0 e 20°C, faixa mesófila de 20 a 45°C e a faixa termófila com temperatura de 45 a 70°C. Durante a decomposição da matéria orgânica na biodigestão variações de temperatura podem representar problemas sérios ao processo, principalmente às bactérias metanogênicas que necessitam de um intervalo de temperatura restrito de operação. Normalmente a temperatura mais usada é da faixa mesófila considerada ótima a 35°C. No Brasil o clima tropical facilita a manutenção dessa temperatura (SOARES e ZAIAT, 2007).

O pH deve ser mantido de 6 a 8 considerado ideal de 7 a 7,2. Quantidades em excesso de ácido carbônico e os ácidos voláteis influenciam diretamente na variação do pH do processo ocasionando perdas de eficiência em remoção de matéria orgânica e consequentemente na formação de metano. As necessidades nutricionais ideais para a evolução da comunidade bacteriana são basicamente: carbono, oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, fósforo e enxofre. Outros nutrientes são necessários para a biossíntese dos componentes celulares, como cátions ( $Mg^{+2}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Na^{+1}$ ,  $K^{+1}$ ,  $Fe^{2+}$ ), ânions ( $Cl^-$ ,  $SO_4^{-2}$ ), e traços de elementos considerados



como micronutrientes (Co, Cu, Mn, Mo, Zn, Ni, Se,) servindo como elementos auxiliares para várias enzimas (Chernicharo, 1997).

## **2. 5 - MERCADO BRASILEIRO DE FERTILIZANTES**

O Brasil é considerado um grande fornecedor mundial de alimentos e estimativas da Organização das Nações Unidas para Alimentos e Agricultura (FAO) é de que, até 2050, o número de habitantes no mundo chegue a nove bilhões. Nesse período, o país deve responder por 40% do crescimento da produção alimentícia mundial (FAO, 2014). Para tanto serão necessárias aumentar a área destinada à agricultura juntamente com investimentos em pesquisas e desenvolvimento de tecnologias que poderão significar ganhos em produtividade.

O incremento na produção agrícola nacional vem acompanhada do acréscimo no consumo de insumos agrícolas como o de fertilizantes. O Brasil que atualmente é o quarto maior consumidor, com 6,0% de participação mundial atrás da China, Índia e Estados Unidos; porém não figura entre os principais produtores, o que mostra a sua fragilidade quanto às oscilações dos preços internacionais, com reflexos diretos na agricultura (IFA, 2014).

A análise da origem da produção industrial de fertilizantes, necessária para atender ao consumo interno, revela a predominância importações crescente nos últimos anos, apesar de haver uma sinalização de crescimento interno da produção, haja vista que a produção nacional de fertilizantes foi de 8.878.000 toneladas em 2008, passou para 9.339 em 2010 e chegou a 9.860.000 toneladas em 2011 conforme pode ser observada nos índices de produção, importação e consumo de fertilizante (tabela 4). Na conjuntura de produção e consumo de fertilizante pelo setor agrícola brasileiro a taxa de crescimento da produção não acompanhar a taxa de crescimento do consumo implicando em dependência de importações. A importação de fertilizante apresenta-se em crescimento constante, principalmente nos últimos quatro anos

(Tabela 4) e no ano de 2013 aproximadamente 69% do total de fertilizante consumido no Brasil foi importado.

**Tabela 4:** Produção, importação e consumo de fertilizantes no Brasil dos anos de 2007 a 2013.

<b>Ano</b>	<b>Produção em 10<sup>3</sup> t</b>	<b>Importação em 10<sup>3</sup> t</b>	<b>Consumo em 10<sup>3</sup> t</b>
2007	9.815	17.529	24.518
2008	8.878	15.387	22.400
2009	8.372	11.020	22.429
2010	9.339	15.269	24.608
2011	9.860	19.851	28.326
2012	9.722	19.545	29.537
2013	9.304	21.618	31.081

**Fonte de dados brutos:** ANDA, 2014. Elaborado pela própria autora.

Os impactos da alta dos preços de fertilizantes na rentabilidade da agricultura são expressivos, em razão da participação significativa desses itens nos custos de produção das principais culturas do agronegócio brasileiro. De acordo Conferencia Nacional de Agricultura parcela corresponde a 18% dos custos de produção de cana-de-açúcar durante a safra 2013/2014 na região nordeste do Brasil corresponde ao uso de fertilizantes (CNA, 2014).

No custo da produção de cana-de-açúcar a parcela corresponde a aquisição de fertilizantes tem sido um dos principais fatores responsável pelo aumento dos preços da produção de cana. As elevações dos preços de produção da matéria prima do etanol somadas às constantes crises sofridas pelo setor ocasionaram uma instabilidade financeira ao seguimento, e nos últimos anos as usinas brasileiras demonstram fragilidade para honrar seus compromissos financeiros.

Diante da atual situação financeira do setor sucroalcooleiro o sistema de gerenciamento de resíduos (subprodutos) adotado o hoje pela maioria das unidades produtos de ca-

na-de-açúcar representa um aumento na lucratividade da produção do etanol. O reaproveitamento da vinhaça para a fertirrigação e torta de filtro para adubação conseguem devolver ao solo quantidades significativas de potássio, fósforo, nitrogênio, enxofre, cálcio e magnésio elementos essenciais para o desenvolvimento fisiológico da cana-de-açúcar.

## 2.6 REFERÊNCIAS

- AGUILERA; R, RUIZ, R. **Manual dos derivados da cana-de-açúcar**. Brasília: ABIPTI (Associação Brasileira das instituições de pesquisa tecnológica), v.1, 1999.
- BERTONE, A. A garantia de suprimento será à base da expansão do mercado mundial. **Revista opiniões**. Ribeirão Preto, SP, BRASIL, p. 60-62, out /dez 2007.
- CNA – CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Relatório de Inteligência do Bagaço do Posto**. Brasília 2013. Disponível em <<http://www.icna.org.br/relatorio/relatorio-de-inteligencia-do-bagaco-ao-posto>> Acesso em: 15/07/2014
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-**Acompanhamento da safra Brasileira-Cana-de-açúcar**. Brasília. Em<[http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&ordem=produto&Pagina\\_objcmsconteudos=4#A\\_objcmsconteudos](http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&ordem=produto&Pagina_objcmsconteudos=4#A_objcmsconteudos)> Acesso em 15 de junho 2014.
- CRUZ, L. F. L. **Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o setor sucroenergético do Estado de São Paulo**. Dissertação (Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia). Escola de engenharia de São Paulo. São Carlos/SP, 2011.
- CHENICHARO, C. A. L. (1997). “Princípios do Tratamento Biológico de águas residuárias”. Volume 5, 10 ed. Departamento de Engenharia Sanitária e ambiental. UFMG. Belo Horizonte.
- COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto**. Dissertação Mestrado-Programa Inter-unidades de Pós graduação em energia da USP (PIP-GE). São Paulo, 2006.
- FILHO; G. Z, PICCIRILLI, J. P. **O processo de fabricação do açúcar e álcool desde a lavoura da cana até o produto acabado**. Santa Cruz do Rio Pardo-SP: Editora Viena, 2012.
- GONZALÉZ; R, GARLOBO, C. **Manual dos derivados da cana-de-açúcar**. Brasília: ABIPTI (Associação Brasileira das instituições de pesquisa tecnológica), v.1, 1999.
- LOMANTO, L. F. S. C. **Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento). Escola de Engenharia de São Paulo, São Carlos/SP, 2011.

- MAGALHÃES, V. R. **Influência de doses de vinhaça nas características agrônômicas de variedades de cana-de-açúcar, cana planta e atributos químicos do solo.** Dissertação (Programa de pós-graduação em produção vegetal no semiárido). Universidade Estadual de Montes Claros. Janaúba/Minas Gerais, 2010.
- MARCOCCIA, R. **A participação do etanol Brasileiro em uma nova perspectiva na matriz energética Mundial.** Dissertação (Mestrado-Programa Inter-unidades de Pós-graduação em Energias). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- MENDONÇA, J. F.; JÚNIOR, I. C. L. **Comparação dos Custos de Produção e Transporte de Etanol entre o Brasil e os Estados Unidos.** In: VII SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA. Anais. 2010. Disponível em: <[http://www.aedb.br/seget/artigos10/272\\_ETANOL%20BR%20X%20EUA%20SEGET2010%20rev01.pdf](http://www.aedb.br/seget/artigos10/272_ETANOL%20BR%20X%20EUA%20SEGET2010%20rev01.pdf)>. Acesso em: 5 março. 2014.
- MENEGUETTI, N. A. A. **A reestruturação produtiva do setor sucroalcooleiro no Brasil de 1975 a 1999.** Paraná, 1999. Dissertação de mestrado na universidade estadual de Maringá.
- MAPA. MINISTERIO DA AGRICULTURA PECUARIA E ABASTECIMENTO. Portaria n° 105/2013. Disponível em <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal>> Acesso em 20 de junho 2014.
- MME. Ministério de Minas e Energia-**Balço Energético Nacional.** Rio de Janeiro. Pagina 57. 2012. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados\\_Pre\\_BEN\\_2012.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf)> Acesso em 25 junho 2014.
- MORAES, A. S. Cenários & Perspectivas. **Revista opiniões.** Ribeirão Preto/SP, BRASIL, p. 74, jul./set 2013.
- NASTARI, P. Superando a Crise. **Revista Opiniões.** Ribeirão Preto/SP, BRASIL p. 74, A-br./jun 2013.
- NETO, J. A. L. **Monitoramento de Componentes Químicos da Vinhaça Aplicada em Diferentes Tipos de Solos:** 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Campinas, 2008.
- OLIVEIRA, J. **Perspectivas para a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucroalcooleiro Paulista.** Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-graduação e área de concentração em Engenharia da Produção). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.
- PINTO, C. **Tecnologia da digestão, anaeróbica da vinhaça e desenvolvimento sustentável.** Dissertação de mestrado-Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. São Paulo, 1999.
- RIBEIRO, R. **A usina de açúcar e sua automação.** São Paulo, BRASIL, 2. edição, 2003.
- SANT’ ANNA. G. L. **Tratamento Biológico de Efluentes: Fundamentos e aplicações.** Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 418p
- SILVA, G. A. **Avaliação das tecnologias de disposição de vinhaça de cana-de-açúcar quanto ao aspecto de desenvolvimento ambiental e econômico.** Tese (Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, 2012.
- SINDICATOS DA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE ETANOL DO ESTADO DE GOIÁS- SIFAEG- **Mapa das Usinas-Unidades Produtoras e associadas.** Goiânia-Goiás.

Em<<http://www.sifaeg.com.br/mapadasusinas/>> Acesso em 15 de junho de 2014.

SOLOMM, K. R. **Avaliação técnica econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão de vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade.** Tese (Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais, 2007.

TORRES, A., PEDROSA, J.F., PONTES DE MOURA, J. **Fundamentos de implantação de biodigestores em propriedades rurais.** Educação Ambiental em Ação. No. 40. 2012. ISSN 1678-0701. Disponível em: < <http://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=1248&class=02>>, Acesso em 15 de junho de 2014.

UNICA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR- **Moagem de Cana-de-açúcar e Produção de Açúcar e Etanol.** Brasília. Em<<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4> > Acesso em 12 de junho 2014.

VIANNA. **Tratamento anaeróbico de vinhaça em reator UASB operado a temperatura na faixa termofílica (55°C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica.** Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento). Escola de Engenharia de São Paulo, São Carlos/SP, 2006.

## 5 CAPÍTULO III: ARTIGO ORIGINAL

### BIODIGESTÃO ANAERÓBIA COMO PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE TORTA DE FILTRO E VINHAÇA NA INDÚSTRIA DO ETANOL

#### ANAEROBIC DIGESTION MANAGEMENT PROPOSAL AS PIE VINASSE FILTER AND INDUSTRY OF ETHANOL

FREITAS, Rosana Aparecida<sup>1</sup>; ZANG, Joachim Werner<sup>1</sup> (Orientador); DA FONSECA-ZANG, Warde Antonieta<sup>1</sup> (Coorientador); TEIXEIRA, Luiz Sávio Medeiros<sup>2</sup>;

1. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Goiânia-GO

Rosanaquimical@hotmail.com

2. Laboratório Nacional Agropecuário em Goiás.

### Resumo

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar tendo 382 plantas produtoras de etanol no País (ANP, 2014). Na representação das exportações do agronegócio Brasileiro o setor sucroalcooleiro no ano de 2010 foi responsável por 18% da entrada de divisas para o País (UNICA, 2010). Em geral a vinhaça é gerada em uma proporção de 15 litros para um litro de etanol produzido e a torta de filtro em torno de 40 Kg para uma tonelada de cana-de-açúcar processada (FILHO; PICCIRILLI, 2012). A reutilização de subprodutos (vinhaça e torta) reduzindo ao máximo a utilização de novos insumos, obtendo vantagens na logística produtiva, no custo final de produção e no âmbito ambiental através da redução da pressão sobre os recursos naturais. Porém o uso indiscriminado de torta de filtro e principalmente de vinhaça pode acarretar problema irreversíveis ao solo e aos corpos hídricos. A biodigestão anaeróbia da vinhaça e da torta de filtro é uma tecnologia de tratamento que degrada a matéria orgânica pela ação de diferentes grupos microbianos. Os experimentos foram executados conforme as recomendações da norma alemã VDI 4630/2006 (VDI, 2006). O inóculo é oriundo de um reator anaeróbio de resíduos da indústria alimentícia. Foi realizado em três condições diferentes ocorridos ao mesmo tempo com o biorreator construído. Nesse experimento foram utilizados dois resíduos: a torta de filtro e vinhaça mistura com a torta de filtro em uma proporção de 50% massa/ massa além do inóculo. A quantidade de matéria orgânica convertida em biogás pela ação das bactérias anaeróbia indica uma taxa de conversão significativa para todos os reatores. A mistura entre a torta de filtro e vinhaça na proporção de 50% (m/m) mostrou-se mais eficiente na produção de biogás com  $226 \text{ Ncm}^3/\text{g}_{\text{mso}}$  frente a produção da torta de filtro  $203 \text{ Ncm}^3/\text{g}_{\text{mso}}$ . A produção de bioenergia a partir da biodigestão dos subprodutos do etanol pode representar uma oferta a mais de energia renovável para o Brasil. As unidades produtoras de etanol poderão operar com sistema híbrido de energia com varias fontes advindas dos subprodutos do etanol.

Palavras-chave: Subprodutos, Gerenciamento de resíduos, Reaproveitamento, Biodigestão, Biogás

## ABSTRACT

Brazil is currently the world's largest producer of cane sugar there are 382 producers of ethanol plants in Brazil. On behalf of the Brazilian agribusiness exports the sugarcane sector in 2010 accounted for 18% of foreign exchange earnings for the country. In general stillage generated and naked proportion of 15 liters for a liter of ethanol produced and the filter cake around 40 kg to one tonne of cane processed sugar. The reuse of byproducts (vinasse and pie) reduce to the maximum the use of new inputs, taking advantage in the production logistics, the final cost of production and the environmental context by reducing the pressure on natural resources. But the indiscriminate use of filter cake and vinasse can lead mainly to irreversible soil and water bodies' problem. The anaerobic digestion of vinasse and filter cake offers a treatment technology that degrades organic matter by the action of different microbial groups. The experiments were performed according to the recommendations of the German VDI 4630/2006. Inoculum from an anaerobic waste from a food industry has been applied. The tests were performed in three different conditions simultaneously. The experiments were conducted in three different composition mixture being a) a filter cake and vinasse (50%) + inoculum; b) inoculum + filter cake; and c) only inoculum. The amount of organic matter converted into biogas by anaerobic bacteria of action indicates a significant rate of conversion for all reactors. The mixture between the filter cake and vinasse in the proportion of 50% (m / m) was more efficient in the production of biogas  $226 \text{ Ncm}^3/\text{g}_{\text{ODM}}$  forward the production of filter cake in  $200 \text{ Ncm}^3/\text{g}_{\text{ODM}}$ . The production of bioenergy from digestion by-products of ethanol may represent an offer to more renewable energy for Brazil. The ethanol producing units can operate with hybrid power system with several sources of deriving ethanol byproducts.

Keywords: Byproducts Waste Management, Reuse, Digestion, Biogas

## 4.1 Introdução

A crescente utilização mundial de fontes renováveis de energia possibilitou a ampliação das matrizes energéticas existentes. No Brasil, a produção de etanol da cana-de-açúcar é o principal exemplo da produção em grande escala de energia da biomassa.

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar existindo 382 plantas produtoras de etanol no País, correspondendo a uma produção de 205.041 m<sup>3</sup>/dia de etanol hidratado e 104.193 m<sup>3</sup>/dia de produção de etanol anidro. A maioria das unidades produtoras de etanol está concentrada na região Sudeste do País nos Estados de São Paulo com 164 usinas e de Minas Gerais com 39 usinas (ANP, 2014). Na safra 2013/2014 a produção de cana-de-açúcar em São Paulo foi de 372.805,91 mil toneladas em 4.552.040 hectares de área plantada, e a produção mineira foi de 60.759,48 mil toneladas em uma extensão de 779.830 hectares de cana-de-açúcar (CONAB, 2014).

Na representação das exportações do agronegócio brasileiro o setor sucroalcooleiro no ano de 2010 foi responsável por 18% da entrada de divisas para o País. Com a exportação principalmente de açúcar e etanol tornou-se o segundo no ranking de exportação ficando somente atrás da exportação de soja. Nesse mesmo ano o bloco econômico da União Europeia importou 476.601.000 litros de etanol desembolsando 259.712.000 dólares para os cofres do Brasil (UNICA, 2010).

Nos complexos de produção de etanol são empregados tecnologias e conhecimento que atestam a eficiência em produtividade de cana-de-açúcar e na produção de etanol. São inúmeras as empresas e institutos de pesquisas que estão voltados para aperfeiçoar as técnicas de plantio e melhoramento genético da cana-de-açúcar e de produção de etanol. Porém ao se produzir grandes quantidades de etanol estão sendo geradas enormes quantidades de torta de filtro e vinhaça, resíduos (subprodutos) do processamento da cana-de-açúcar para a produção



do álcool combustível. Em geral a vinhaça e gerada nua proporção de 15 litros para um litro de etanol produzido e a torta de filtro em torno de 40 Kg para uma tonelada de cana-de-açúcar processada (FILHO; PICCIRILLI, 2012).

No gerenciamento de resíduos do etanol o reaproveitamento da vinhaça e torta de filtro como insumos agropecuários representa ganhos econômicos e ambientais principalmente pelas quantidades de nutrientes presentes em ambos os subprodutos. Ao reutilizar esses subprodutos reduz a utilização de novos insumos, obtendo vantagens na logística produtiva (redução na compra e no transporte de novos insumos), no custo final de produção e no âmbito ambiental através da redução da pressão sobre os recursos naturais (por ex.: água, fertilizantes minerais/minérios, energia, etc.). Porém o uso indiscriminado de torta de filtro e principalmente de vinhaça pode acarretar problemas irreversíveis ao solo e aos corpos hídricos.

A utilização em excesso da vinhaça sem controle pode provocar sérios problema na qualidade dos corpos hídricos e de acordo com Agência Nacional das Águas (ANA, 2009). Os principais impactos são: alteração da concentração de nitrato nas águas subterrâneas e interferência na qualidade das águas ocasionada pela percolação da vinhaça carreando sais minerais e compostos orgânicos para dentro dos corpos hídricos. No solo uso da vinhaça ao longo dos anos pode elevar a concentração de sais solúveis ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) no solo, processo conhecida como salinização (SHULTZ, 2009).

Nos últimos anos a constante busca para tornar a cadeia produtiva do etanol mais sustentável fez com que pesquisas fossem direcionadas para estudar o gerenciamento de resíduos do setor sucroalcooleiro, principalmente a etapa final do gerenciamento que consiste na disposição final dos resíduos baseada no reaproveitamento na própria unidade produtora do biocombustível. A biodigestão anaeróbia da vinhaça e da torta de filtro constitui uma tecnologia de tratamento que visa à degradação da matéria orgânica pela ação de diferentes grupos microbianos. Entre os produtos finais do processo, a vinhaça e a torta de filtro biodigerida terá

a mesma finalidade de fertirrigação e adubação. E o biogás gerado será destinado á produção de energia elétrica através de turbogeradores específicos para este tipo de bicomustível (SZYMANSKI, M. S. e BABINOT, R, 2008).

Em face da perspectiva de expansão da cultura da cana-de-açúcar no estado de Goiás, e levando em consideração o número expressivo de usinas sucroalcooleiras já em funcionamento no Estado é que se faz necessário estudar a forma atual de gerenciamento dos subprodutos advindos da produção do etanol.

## **4.2 MATERIAL E MÉTODOS**

A pesquisa foi desenvolvida na usina Denusa localizada na Fazenda São Pedro, na Rodovia BR-060, no Km 274 no Município de Jandaia – GO, que está em funcionamento deste de 1<sup>o</sup> de junho de 1980. Atualmente, a atividade agrícola da Denusa está concentrada no raio da unidade industrial, com distância média na ordem de 20 km, e explora 100% do seu canavial, em áreas de sua propriedade e de terceiros, através de parcerias.

A projeção de produção de cana-de-açúcar, média de empresa para o ciclo de produção, objeto do planejamento estratégico, correspondente à média de 80 toneladas por hectare. A empresa investiu em áreas de cana-de-açúcar e, hoje, explora área correspondente a 39.000 hectares. A vinhaça na usina Denusa é misturada a águas residuárias do processo de produção do etanol posteriormente é usada na fertirrigação da cana-de-açúcar.

**Tabela 5:** Principais resíduos da produção do etanol gerado na safra 2012/2013 na destilaria Denusa, Jandaia, GO.

<b>Resíduo (Subproduto)</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Reaproveitamento</b>
<b>Bagaço</b>	345.119 t	Cogeração
<b>Cinzas da caldeira</b>	8.011 t	Fertilizante
<b>Torta de filtro</b>	39.266 t	Fertilizante
<b>Vinhaça</b>	1.099.905 m <sup>3</sup>	Fertirrigação

Na última safra da Usina foram processadas 1.196.139 toneladas de cana-de-açúcar em 251 dias de safra gerando quantidade significativa de resíduos (Tabela 5). A quantidade de bagaço gerado foi de 345.119 toneladas sendo mais da metade consumida nas caldeiras da própria usina, sendo o restante vendido para ser queimado em caldeiras de outras indústrias, principalmente do ramo de indústrias alimentícias. Toda energia necessária para o funcionamento da usina é advinda da cogeração do bagaço da cana-de-açúcar, caracterizando autossuficiência da produção e consumo de energia. Após a queima do bagaço na caldeira, obtêm-se as cinzas da caldeira e na última safra foram geradas 8.011 toneladas desse resíduo, que é misturada à torta de filtro e incorporada ao solo como fertilizante orgânico.

Segundo informações da usina Denusa, a torta de filtro tem uma elevada importância e o ideal seria que esse resíduo fosse gerado até em maior quantidade do que atualmente, possibilitando assim alcance de maiores áreas de cana-de-açúcar fertilizada com esse resíduo. Sua aplicação é basicamente na soqueira, que é a raiz que sobra no campo após o corte da cana ou na soqueira de cobertura e na safra de 2013/2014 foram geradas 39.266 toneladas de torta de filtro.

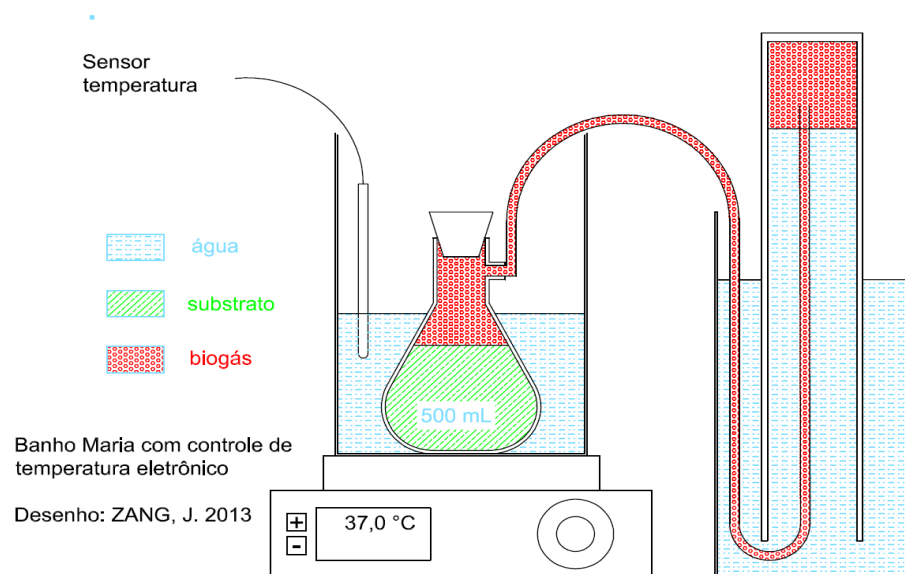
A quantidade de vinhaça gerada durante a produção do etanol chama atenção e na última safra da usina Denusa foram obtidos 1.099.905 m<sup>3</sup> desse resíduo. É importante ressaltar o grau de relevância que a vinhaça assume frente às questões ambientais, tanto pelo seu potencial poluidor quanto pelos elevados volumes produzido e conseqüente escolha dos destinos mais adequados para estes subprodutos, a fim de reduzir ao máximo o risco à saúde da

sociedade e aos ecossistemas possivelmente afetados. O uso racional da vinhaça aparece como uma das principais ferramentas na mitigação dos impactos negativos e potencialização dos positivos.

#### 4.2.1 DESENVOLVIMENTO E OPERAÇÃO DOS BIORREATORES

No processo de Biodigestão da matéria orgânica, o biorreator é de suma importância, principalmente porque é dentro dele que ocorre todo o processo anaeróbio. Assim foi estudado e desenvolvido um biorreator que passou por adequações até chegar ao protótipo ideal para execução dos experimentos.

O protótipo inicial desenvolvido do reator anaeróbio, foi montado utilizando uma proveta, mangueira, kitasato, aquecimento de água por “banho maria” conforme pode ser observado na Figura 3.



**Figura 3** - Representação esquemática do funcionamento do reator anaeróbio

O kitasato funcionou como o tanque da biodigestão e por ser um recipiente de vidro é considerado um material preferencial para todas as partes da aparelhagem que estejam

em contato com a atmosfera do biogás, principalmente por não reagir quimicamente com os componentes no mesmo. Esse recipiente ficou imerso no “banho Maria” a temperatura de 37°C. Como o controle da temperatura de operação do reator é um fator crítico para o processo de biodigestão anaeróbio foram utilizados sensores externos de controle de temperatura conectados ao equipamento. O recipiente foi lacrado com uma rolha de plástico na parte superior, evitando a entrada de oxigênio, e teve a sua atmosfera lavada por gás nitrogênio ( $N_2$ ), retirando o gás oxigênio ( $O_2$ ) residual e mantendo o meio anaeróbio.

Na saída lateral do kitasato uma mangueira de polipropileno PP foi conectada, com função de levar o biogás produzido no interior do kitasato até a bureta, ligando o tanque de biodigestão com o tanque de armazenamento de biogás. A bureta, que estava preenchida com água, teve a função de coletar e armazenar o biogás produzido. Para isto, ela ficou imersa em um béquer contendo água, com capacidade de 10 litros, de cabeça para baixo.

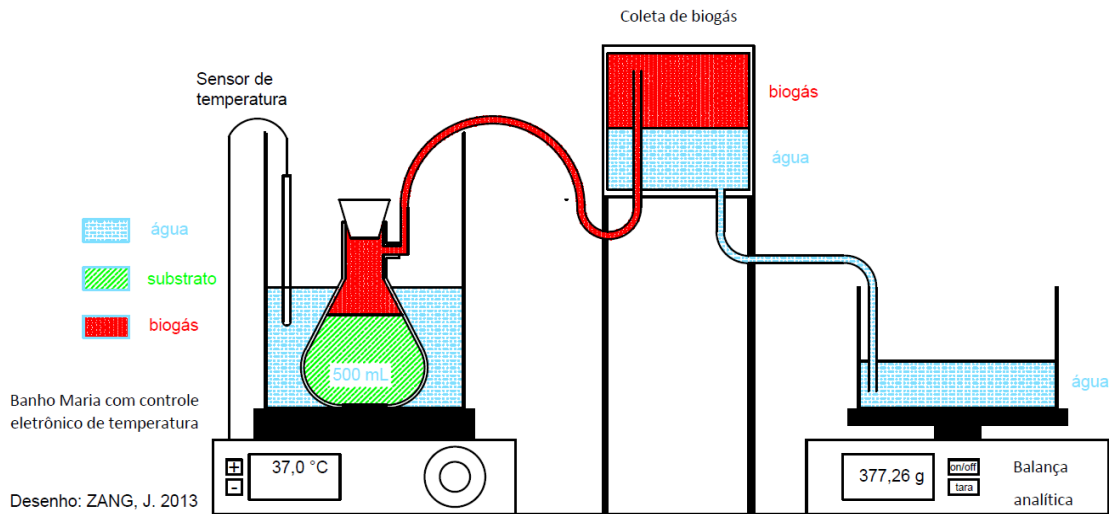
O gás produzido no kitasato foi direcionado para o interior da proveta onde ocorria o deslocamento da água por questão de diferença de densidade, permitindo assim verificar o volume de biogás produzido, como ilustra a Figura 4.

Partindo do protótipo inicial desenvolvido foi verificado por meio de teste que o recipiente utilizado como tanque de biodigestão (kitasato) foi satisfatório. Porém o sistema de captação do biogás apresentou problemas de vazamentos sendo necessárias adequações no biorreator para ter uma forma de captação mais eficiente.



**Figura 4:** Protótipo inicial do funcionamento do reator anaeróbico com o sistema de captação de biogás

No novo sistema de captação a proveta foi trocada por um recipiente redondo de vidro que ficou com abertura para baixo, fechado com uma tampa fabricada especialmente para esse recipiente. A tampa foi projetada com duas saídas onde foi instalada uma mangueira específica para gás em cada um dos conectores da saída. Uma das mangueiras foi conectada no reator (kitassato) com a função de transportar o biogás do tanque de digestão até o fundo do recipiente de vidro que estava na posição invertida. Na outra saída da tampa outra mangueira que foi acoplada e direcionada para um recipiente com o objetivo de medir o peso de água deslocada e assim definir o volume de biogás produzido. O recipiente de vidro que ficou invertido no suporte estava completo com água e quando o biogás era produzido este deslocava a água e ficava armazenado no recipiente. A água deslocada pelo biogás foi quantificada em uma balança eletrônica, adaptada para evitar problemas com queda de energia e recálculo de tara nos processos de reinicialização da mesma, como ilustra a Figura 5.



**Figura 5:** Esquema do biorreator com adaptações no sistema de captação de biogás

As novas adaptações realizadas no biorreator foram testadas e foi verificado que não havia mais vazamento. Para a operação do sistema em batelada, foi construída uma bancada especial para servir de suporte para os vasos de vidro que serviram para a captação e armazenamento do biogás. A bancada foi montada com capacidade para nove coletores de vidro, (Figura 6).



**Figura 6:** Bancadas de reatores utilizados nos experimentos de biodigestão anaeróbia.

Os vasos foram preenchidos com água e colocados no suporte feito de madeira e metal. Os vasos de captação e armazenamento de gás foram projetados e construídos na parte superior do suporte, abaixo ficaram os vasos receptores de água em cima das balanças eletrônicas e atrás do suporte ficaram os reatores mergulhados no aquecimento por “banho maria”.

A construção da bancada com suporte permitiu um fácil manuseio dos reatores e dos coletores de gases e assim foi possível a execução dos experimentos de biodigestão anaeróbia.

#### **4.2.2 METOLOGIA UTILIZADA NA OPERAÇÃO DOS BIORRETORES**

A competência alemã na produção de biogás justifica neste trabalho o uso da norma alemã VDI 4630/2006 (VDI, 2006). Esta recomenda que no processo de degradação da matéria orgânica por meio da biodigestão anaeróbia, os reatores anaeróbios tenham uma proporção de 1:0,4 da massa seca orgânica (MSO) do inóculo para o resíduo (Bactérias), pois a produção de biogás está condicionada, sobretudo, a quantidade de MSO. Assim os ensaios devem ser montados de forma que a proporção da massa seca orgânica do inoculo corresponda a cerca de 2,5 vezes a MSO do substrato.

Para determinação massa seca orgânica e massa seca inorgânica do resíduo e do inóculo foi primeiramente feita a umidade de ambos, utilizando um determinador de umidade por infravermelho à temperatura de 105 °C até peso constante. Depois de determinada a umidade, a massa seca do inóculo e do resíduo (torta e vinhaça) pode ser definida pela diferença entre a massa da amostra com umidade menos a massa da amostra sem umidade.

Na sequencia, submetendo as amostras sem umidade em um forno mufla à temperatura de 550°C por quatro horas, obteve-se com a queima da matéria orgânica, a quantidade de matéria inorgânica na amostra. O valor da matéria seca inorgânica (*MSI*) da amostra é quantidade de resíduo restante após a calcinação no forno mufla, já o teor de matéria seca orgânica (*MSO*) da amostra é calculado entre a diferença do valor matéria seca presente na amostra após umidade menos a quantidade de matéria seca inorgânica.



### 4.2.3. MONTAGEM DOS REATORES EM BATELADA

Nos experimentos foram utilizadas a vinhaça e torta de filtro subprodutos do etanol resultantes da safra do ano 2013/2014 da usina Denusa, e o inóculo a biomassa microbiana necessária para o início de operação do reator é oriundo de um reator anaeróbio de resíduos da indústria alimentício.

Na pesquisa, os experimentos foram realizados em três condições diferentes ocorrido simultaneamente, sendo a) torta de filtro + inóculo; b) vinhaça mais torta de filtro a 50% m/m + inóculo; e c) inóculo. Essas composições foram experimentadas em sistema de três reatores, totalizando nove experimentos.

Conforme pode ser observado na Tabela 6. Na sequência, foi verificado o pH, que se encontrava na faixa boa de operação, que é de pH de 6,8 a 7,2.

**Tabela 6:** Composição dos reatores usados nos experimentos de biogás

Reatores	Composição
1, 2, 3	Somente inóculo
4, 5, 6	Torta de filtro + vinhaça 50% m/m com inóculo
7, 8, 9	Inóculo + torta de filtro

Após o preparo da composição dos reatores, esses foram colocados imersos na água a 37 °C (faixa mesofílica), em “banho-maria”, contendo um termostato digital de controle de temperatura com sensores externos.

O tempo de retenção hidráulica, que consiste no tempo médio de permanência do substrato no reator, foi de 18 dias, e diariamente, num mesmo horário, foi verificada a produção de biogás, junto com a pressão atmosférica e a temperatura no laboratório.

#### 4.2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS E BIOFERTILIZANTES

- Preparo das Amostras para Análise

Nas amostras sólidas previamente homogeneizadas reduzidas por quarteação cerca 250 g foram feitas análises de umidade em estufa de secagem, marca Biomatic, à temperatura de 65 °C por 16 horas ou até peso constante, verificado de hora em hora após o transcurso das 16 horas, até o final da determinação de umidade. Após a retirada da umidade as amostras foram moídas e passadas totalmente em peneira com abertura de malha 0,5 mm (ABNT n° 35). As amostras de vinhaça e os biofertilizantes que estavam no estado líquido foram secas em estufa de secagem, marca Biomatic, até redução de volume de forma que toda parte líquida das amostra evaporasse concentrando os analitos presentes nas amostra.

Todos os procedimentos analíticos usados na pesquisa foram executados conforme a Instrução Normativa IN SDA N° 28, DE 27 DE JULHO DE 2007 que Aprovar os Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes Minerais, Orgânicos, Organo-Minerais e Corretivos.

- Contaminantes Inorgânicos e Micronutrientes

Na pesquisa foram determinados os contaminantes inorgânicos Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Cromo (Cr) e Níquel (Ni). O elemento Níquel é considerado contaminante em adubos orgânicos, contudo em adubos minerais é considerado micronutriente. Os micronutrientes determinados foram o Cobre (Cu) e o Zinco (Zn) e macronutrientes secundários Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg).

A extração das amostras iniciou-se com a pesagem de 1,000 g das amostras e transferiu-se para um frasco de Erlenmeyer de 125 mL; adicionou-se, utilizando uma pipeta volumétrica, 10,0 mL de ácido clorídrico concentrado. A amostra foi levada a uma chapa a-

quecedora e aquecida até o volume ser reduzido próximo a secura do extrato; retirou da chapa e resfriou-se a amostra e, utilizando-se uma proveta, graduada até 25,0 mL, adicionou-se 20,0 mL de água destilada e 5,0 mL de ácido clorídrico concentrado. Em seguida ferveu-se por 10 minutos e esfriou-se. Seguiu-se a filtração com funil de vidro e papel de filtro quantitativo, faixa branca, filtração média, Ø 12,5 cm, Marca UNIFIL para balão volumétrico de 100 mL. O retido foi lavado com água, e o volume completado a 100 mL.

A quantificação dos elementos foi feita pelo método de espectrometria de absorção atômica de chama (EAA) usando lâmpadas de cátodo oco específicas para cada elemento e as linhas específicas dos respectivos elementos no monocromador e fotomultiplicador do espectrofotômetro de absorção atômica da marca VARIAN modelo spectrAA 200.

- Macronutrientes (Nitrogênio, Fósforo e Potássio)

O método de análise de nitrogênio fundamenta-se na amonificação de todas as formas não amoniacais. As amostras foram extraídas em bloco digestor, seguindo-se da destilação alcalina da amônia, que é recebida numa quantidade em excesso de ácido bórico. O borato de amônio formado é titulado com ácido sulfúrico padronizado.

Para análise de fósforo as amostras extraídas conforme procedimento de extração para micronutrientes que sofreram ataque químico fortemente ácido e a quente visando extrair todo o seu conteúdo de fósforo. Em seguida procedeu-se à formação de um complexo colorido entre o fosfato e os reagentes vanadato e molibdato de amônio, de cor amarela, cuja absorvância é medida a 400 nm. As amostras foram analisadas em espectrofotômetro UV-VIS da marca INSTRUTERM UV-1000A.

Utilizando os mesmos extratos das amostras para análises de micronutrientes a determinação do potássio procedeu-se pela quantificação em fotômetro de chama da marca MICRONAL modelo B4621.

Todas as extrações e determinações analíticas foram realizadas no Laboratório Nacional Agropecuário de Goiás (LANAGRO GO).

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A necessidade nutricional da cana-de-açúcar pode variar conforme a classe de lavouras de cana. A cana soca é a classe de lavouras de cana que já passaram por mais de um corte, ou seja, é cana que rebrotou de uma planta ou de uma soca. Já a cana planta é a cana que foi plantada, após a reforma de um canavial, que irá passar pelo primeiro corte de cana tornando-se uma soqueira (LOMANTO, 2011). A quantidade de nutrientes aplicados na adubação da cana-de-açúcar no Brasil (tabela 7) demonstra uma maior necessidade da cana planta para fósforo e a cana soca precisa de maiores quantidades de nitrogênio e potássio.

Tabela 7: Nutrientes aplicados na adubação da cana-de-açúcar no Brasil

<b>Nutrientes</b>	<b>Cana Planta</b>	<b>Cana Soca</b>
	<b>kg. ha<sup>-1</sup></b>	
N	42	81
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	123	34
K <sub>2</sub> O	109	114
Total	274	229

Fonte: LOMANTO, 2011.

No cultivo da cana-de-açúcar os déficits nutricionais causados pela falta de nutrientes exigidos pela cana podem acarretar sérios problemas no crescimento e desenvolvimento vegetativo da cultura. A escassez de fósforo pode proporcionar nas folhas aspectos anormais que inicialmente apresentam uma cor verde-escura ou verde azulada com largura e comprimento reduzidos levando a secagem nas pontas, os colmos finos e curtos diminuindo no perfilhamento e no desenvolvimento das raízes. A falta de nitrogênio além de alterar as características normais da folhagem pode paralisar por completo o crescimento da planta. A

carência de potássio é indicada pela perda gradual da cor verde na folhagem da cana, apresentado manchas amareladas, pequenas e numerosas que depois ficam pardas e mortas no centro, com mais concentração nas pontas e margens, e o crescimento diminui, os colmos são finos e curtos (MALAVOLTA; KLIEMANN, 1985). Portanto é indispensável à utilização de fertilizantes em quantidades ideais para desenvolvimento adequado da plantação da cana-de-a ugar.

Atualmente o reaproveitamento de resíduos (subprodutos) do etanol como fertilizantes orgânicos apresenta-se como uma fonte natural de nutrientes importantes para a produ o de cana-de-a ugar. A vinhaça que   obtida no final da etapa de destila o tem seu uso exclusivamente na fertirriga o, principalmente por apresentar em sua constitui o química alta concentra o de água verificada pelo teor de umidade de 97,83 % conforme a composi o química da vinhaça (Tabela 8).

**Tabela 8:** Composi o química da vinhaça

<b>Elemento</b>	<b>Vinhaça</b>
	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>
Nitrogênio (N)	0,40
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,35
Potássio (K <sub>2</sub> O)	2,80
Cálcio (Ca)	1,10
Magnésio (Mg)	0,41
Umidade %	97, 83
Matéria orgânica %	41,00
	<b>Ppm</b>
Cobre (Cu)	45,00
Zinco (Zn)	50,00
Potencial de hidrogênio (pH)	4,10

**Fonte:** Elaborac o própria.

Os teores de potássio são significantes 2,80 Kg/m<sup>3</sup> e em menores quantidades tem-se o nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio, cobre e zinco. No entanto considerando a grande quantidade de vinhaça gerada durante a última safra da usina Denusa (2013/2014) fo-

ram produzidos 1.099.905 m<sup>3</sup> vinhaça que foi totalmente aplicada ao solo. Com base na quantidade de nutrientes aplicados na adubação da cana-de-açúcar no Brasil (tabela 7) e da composição química da vinhaça (tabela 8) foi possível calcular as áreas que poderiam ser fertilizadas, com as classes de cana planta e soca caso se a fertirrigação fosse distribuída de forma homogênea sem excesso na aplicação. Os dados obtidos na tabela 9 indicam que conforme a necessidade nutricional da cana-de-açúcar a vinhaça gerada pela Denusa na última safra daria para fertilizar maiores áreas do que área atual usada pela usina na produção de cana que é cerca de 2.000 hectares.

**Tabela 9:** Relação entre os nutrientes presentes na vinhaça durante a safra 2013/2014 da usina Denusa com a quantidade de áreas que poderia ser fertilizadas

Elemento (Nutriente)	Concentração na vinhaça (kg/m <sup>3</sup> )	Nutrientes disponíveis na vinhaça (kg)	Área fertilizada com cana planta (ha)	Área fertilizada cana soca (ha)
Nitrogênio (N)	0,40	439.962	10.475	5.431
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,35	384.967	3.129	11.322
Potássio (K <sub>2</sub> O)	2,80	3.079.734	28.254	27.015

**Fonte:** Elaboração do próprio autor

Em estudo realizado por LOMANTO, 2011 foi comparado o ganho econômico na utilização da vinhaça *in natura* aplicada ao solo em relação a economia na aquisição de fertilizantes comerciais. O autor verificou que com a prática da fertirrigação uma usina poderia deixar de gastar 1,67 milhões de Reais com a compra de fertilizantes comerciais, ressaltando que um gerenciamento mais adequado da disposição final da vinhaça poderia otimizar as taxas de aplicação de vinhaça ao solo e potencializar a sua distribuição no campo e consequentemente os ganhos econômicos e ambientais para o setor sucroenergético.

A torta de filtro e resíduo da produção do etanol obtido após etapa de tratamento de caldo etapa do processo de produção do álcool combustível, a sua constituição depende de vários fatores agroindustriais, tais como o tipo de solo, a variedade da cana-de-açúcar utiliza-

da, o tipo de colheita (mecanizada ou manual), o grau de extração de filtração, o tamanho dos furos dos coadores do caldo, dentre outros. O tipo de solo é de suma importância para a especificação qualitativa dos componentes químicos presentes na cana de açúcar e, consequentemente, na torta de filtro. A variedade da cana-de-açúcar contribui diretamente com a especificação quantitativa dos compostos químicos existentes na torta de filtro, o que caracteriza a parte mais importante na verificação através de análise química dos minerais constituintes desse resíduo gerado com a produção do etanol. Já o tipo de colheita pode ser de duas formas, manual ou mecanizada, sendo a mecanizada a que mais interfere na composição química da torta; pois o incremento na mecanização aumenta as matérias estranhas que entra na usina e, portanto, incrementa o conteúdo de cinzas, matéria orgânica e outros sedimentos (RIBEIRO, 2003).

A torta de filtro é um composto orgânico rico em nutrientes como cálcio, magnésio, potássio, fósforo, nitrogênio, cobre e zinco cujas concentrações variam conforme a maturação e a variedade da cana. A aplicação da torta de filtro nos solos cultivados é realizada nas entrelinhas da cana-soca (40-50 toneladas  $ha^{-1}$ ), no sulco de plantio (15-30 toneladas  $ha^{-1}$ ) ou é incorporada ao solo antes do plantio (80-100 Toneladas  $ha^{-1}$ ). (SZYMANSKI, M.S. e BABINOT, R, 2008).

A composição química da torta de filtro (tabela 10) demonstra as quantidades consideráveis de nitrogênio, fósforo, potássio, magnésio e principalmente de cálcio, e em concentrações inferiores cobre e zinco o pH levemente ácido 6,8 são características que fazem da torta de filtro um importante subproduto do etanol.

**Tabela 10:** Composição química da torta de filtro

<b>Elemento</b>	<b>Torta de Filtro</b>
<b>g Kg<sup>-1</sup></b>	
Nitrogênio (N)	12
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	22
Potássio (K <sub>2</sub> O)	16
cálcio (Ca)	36
Magnésio (Mg)	5,0
Umidade %	71,11
Matéria orgânica %	83,14
<b>Ppm</b>	
Cobre (Cu)	166,47
Zinco (Zn)	247,50
Potencial de hidrogênio (pH)	6,8

**Fonte:** Elaboração própria.

No custo da produção agrícola a compra de insumos como fertilizantes comerciais tem participação expressiva na relação entre custo e rentabilidade. Na cadeia produtiva do etanol a aquisição de fertilizantes representa 18% dos custos de produção de cana-de-açúcar durante a safra 2013/2014 na região nordeste do Brasil corresponde ao uso de fertilizantes (CNA, 2014). Desta forma o reaproveitamento de subprodutos (resíduos) da produção do etanol apresenta-se como uma forma economicamente rentável em especial para a lucratividade do setor sucroalcooleiro.

#### **4.3.1. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE BIODIGESTÃO**

O biorreator operado com a torta de filtro e o inóculo demonstrou-se eficiente na produção de biogás e na redução de matéria orgânica. O mesmo foi observado nas condições experimentais de combinação do inóculo e a composição de 50% de vinhaça e torta de filtro. A composição química desta composição 50% vinhaça/torta esta apresentada na Tabela 11.



**Tabela 11:** Composição química da mistura da torta de filtro e vinhaça a 50% em massa.

Elemento	Torta de Filtro + Vinhaça 50% (m/m)	
	g kg <sup>-1</sup>	
Nitrogênio (N)	6,2	
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	4,20	
Potássio (K <sub>2</sub> O)	9,00	
Cálcio (CaO)	4,6	
Magnésio (MgO)	1,10	
Umidade %	84,92	
Matéria orgânica %	65,57	
mg kg <sup>-1</sup>		
Cobre (Cu)	27,90	
Zinco (Zn)	223,00	
Potencial de hidrogênio (pH)	6,3	

Os resultados da Tabela 11 demonstram que o fertilizante orgânico produzido a partir da torta de filtro tem quantidades de fósforo, magnésio, cálcio, cobre e zinco superior aos outros reatores.

Os parâmetros importantes de contaminantes para uso como fertilizante orgânico podem ser observados na Tabela 12.

**Tabela 12:** Contaminantes inorgânicos presentes nas composições dos bioreatores.

Teor do Resíduo	Cádmio (Cd)	Chumbo (Pb)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)
mg kg <sup>-1</sup>				
<b>*Limite Máximo</b>	3,00	150,00	200,00	70,00
<b>Torta de Filtro</b>	< 5,00	< 25,00	63,38	62,47
<b>Vinhaça</b>	< 5,00	< 25,00	52,00	45,31
<b>Torta + Vinhaça 50%</b>	< 5,00	<25,00	49,40	20,20
Teor após a biodigestão mgL <sup>-1</sup>				
<b>Inóculo</b>	< 0,50	< 2,00	0,82	0,89
<b>Torta + Vinhaça e inóculo</b>	< 0,50	< 2,00	1,69	2, 61
<b>Torta + inóculo</b>	<0,50	< 2,00	1,59	3, 03

**Legenda:** \* Limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos conforme a Instrução Normativa SDA N° 27, de 5 junho de 2006.

Após o processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica, as propriedades químicas iniciais dos subprodutos do etanol ainda são mantidas, nutrientes e pH (Tabela 10 e 11). São parâmetros importantes para avaliação da qualidade nutricional do biofertilizante que poderá ser aplicado ao solo, e ainda o processo mostra-se eficiente na remoção do material orgânico.

**Tabela 13:** Concentração de nutrientes, pH e a eficiência de remoção de matéria orgânica (E.R.) no Biofertilizante (digestato):

Reatores	N	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mg	Ca	Cu	Zn	pH	E.R. (%)*
	mg L <sup>-1</sup>								
<b>Inóculo</b>	154,53	3,87	376,00	0,64	1,00	1,53	9,81	6,8	96,28%
<b>Torta+Vinhaça 50%</b>	458,01	8,17	312,33	1,29	2,02	6,25	9,30	7,0	84,28%
<b>Torta + inóculo</b>	360,33	8,70	360,33	1,35	2,31	7,16	10,57	7,2	79,97%

**Legenda:** \*E. R: Eficiência de Remoção de matéria orgânica e em conversão em biogás.

As quantidades de adubação orgânica aplicadas devem ser levadas em conta ao se fazer planos de adubação das culturas. O nitrogênio (N) pode ocorrer em formas inorgânicas e orgânicas, sendo que a mineralização da fração de nitrogênio orgânico depende da temperatura e teor de umidade do solo, práticas de cultivo, e do teor geral de matéria orgânica. Os teores de nitrogênio presente no biofertilizante indicam maior presença no reator cujo substrato é composto pela mistura de torta + vinhaça a 50%. Para fósforo, o reator que entrou em operação somente com torta de filtro apresentou superioridade frente os demais, porém as diferenças nos teores entre os reatores foram pequenas.

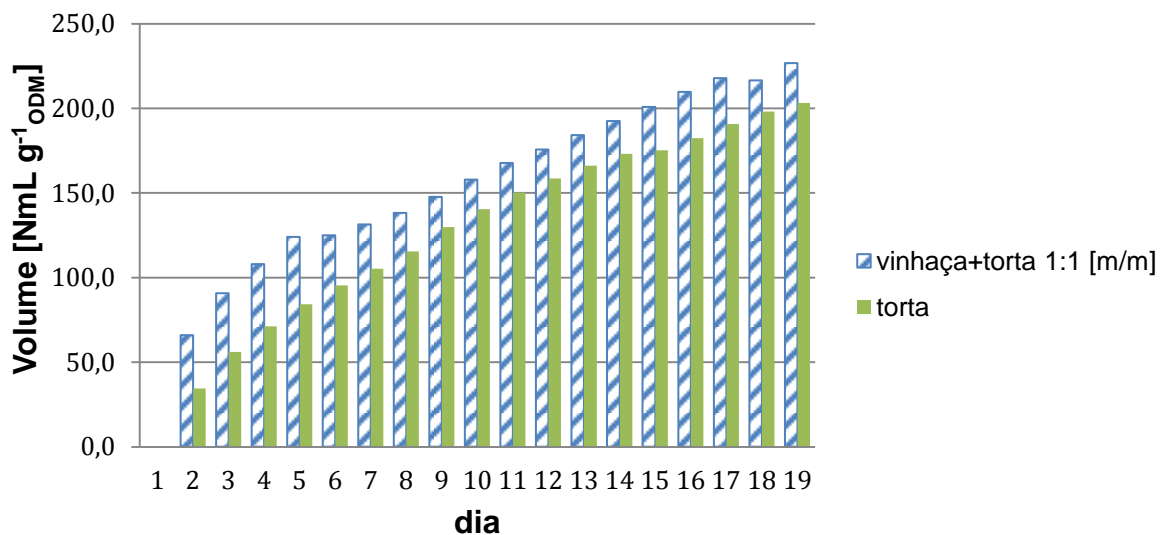
Os valores de pH dos três reatores estão próximos da neutralidade e fazendo uma comparação com potencial de hidrogênio (pH) da torta e da vinhaça “in natura” nota-se um aumento significativo de valores de pH, principalmente para vinhaça que tem seu pH de 4,1 conforme Tabela 13.

A quantidade de matéria orgânica convertida em biogás pela ação das bactérias anaeróbias indica uma taxa de conversão significativa para todos os reatores. Entre as condi-

ções experimentadas, a mistura entre a torta de filtro e vinhaça na proporção de 50% (m/m) mostrou-se mais eficiente, como pode ser observado por meio da taxa de conversão da matéria orgânica presente no substrato em biogás.

O gráfico 4 indica o volume acumulado de produção de biogás nos três reatores, com os valores obtidos durante os 18 dias de operação dos reatores, mostra uma maior produção de biogás da mistura entre a vinhaça e torta de filtro (50% m/m) 226 NmL/g<sub>mso</sub> frente a produção da torta de filtro 203 NmL/g<sub>mso</sub>. Os dados apresentados no gráfico indicam que para os reatores com torta de filtro e vinhaça a produção de biogás foi crescente até o último dia de operação. Desta forma, pode se concluir que o experimento foi interrompido antes da finalização da produção de biogás (tempo de retenção deveria ter sido maior).

### Volume acumulado de biogás produzido



**Gráfico 4** – Potencial de produção de biogás a partir dos subprodutos do etanol.

Informações pessoais (LEITE Jr., 2014) sobre produção de biogás de vinhaça utilizando o Sistema Automático de Teste Potencial Metano (AMPTS II), que é um dispositivo de análise desenvolvido para medições on-line de metano produzido em fluxo a partir da digestão anaeróbia de substratos degradáveis biologicamente, os resultados de produção de bio-

gas alcançam 200 NmL/g COD (COD = chemical oxygen demand, demanda química de oxigênio) em 28 dias de experimento. Os resultados de produção de biogás obtidos na pesquisa comparados ao obtidos por Leite demonstram a eficiência dos reatores desenvolvidos.

### ***Discussão sobre a aplicação dos resíduos como fertilizante e condicionador de solo***

A utilização dos subprodutos vinhaça e torta de filtro com a possibilidade da presença de metais potencialmente tóxicos pode acarretar sérios problemas ao solo e até ser absorvido pelas plantas. É necessário que se faça o monitoramento desses elementos no meio ambiente, pois a alta toxicidade e sua concentração ao longo da cadeia alimentar poderão acarretar impactos toxicológicos (BOTKIN; KELLER, 2011; BAIRD; CANN, 2011).

O Ministério da Agricultura e Pecuária e Abastecimento (MAPA) é órgão federal responsável pela fiscalização do comércio de fertilizantes no Brasil e por meio da Instrução Normativa SDA N° 27, de 5 junho de 2006 estabeleceu os limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos. A presença de contaminantes inorgânicos nos resíduos do etanol está em concentrações abaixo dos limites máximos permitidos pelo MAPA, no entanto a quantidade de Níquel pode apresenta-se como problema futuro, pois na torta de filtro e na vinhaça as concentrações estão próximas do limite máximo permitido conforme a Tabela 12 dos contaminantes inorgânicos presentes em subprodutos do etanol e biofertilizantes. Nos resíduos do biorreator – digestados -, após a biodigestão anaeróbia, foram detectadas também concentrações baixas de elementos contaminantes, como o processo somente transforma matéria orgânica em metano CH<sub>4</sub>, possíveis contaminantes inorgânicos não são removidos.

#### 4.3.1.1 CÁLCULO DO POTENCIAL DE METANO DA SAFRA 2013/2014

A partir das quantidades tortas de filtro e vinhaça geradas na safra do ano 2013/2014 na usina Denusa juntamente com os dados de produção de biogás obtidos durante a pesquisa, foi possível calcular (estimar) o potencial de geração de energia e o equivalente em litros de etanol.

Para a determinação da geração do potencial do biogás é necessário considerar o teor da matéria seca orgânica determinada nos resíduos pesquisados, multiplicando este valor pela quantidade de resíduos gerados na safra considerada, o qual gera a massa seca orgânica (MSO) total disponível. Conforme as equações a seguir, tem-se o cálculo para torta de filtro e vinhaça, respectivamente, referentes aos resíduos da Denusa. Os resultados dos cálculos são resumidos nas Tabelas 14 e 15.

a) **Cálculo da massa total da matéria seca orgânica da torta de filtro:**

Massa seca  $MS_{torta}$ : 28,89 %,

Massa seca orgânica  $MSO_{torta}$ : 83,14% da  $MS_{torta}$  ou 24,02 % da massa total  $M_{torta}$

Quantidade de torta gerada na safra 2013/2014 na usina Denusa:  $M_{torta} = 39.266$  t

Matéria orgânica total =  $M_{torta} \times MSO_{torta}$  ou

$$\boxed{39.266 \text{ t} \cdot 24,02\% = 9.432 \text{ t}} \quad (1)$$

b) **Cálculo da massa total da matéria seca orgânica da vinhaça:**

Massa seca orgânica  $MSO_{vinhaça} = 41,00$  kg/m<sup>3</sup>

Quantidade de vinhaça produzida na safra 2013/2014 na usina Denusa  $V_{vinhaça} = 1.099.905$  m<sup>3</sup>

Matéria orgânica total =  $V_{vinhaça} \times MSO_{vinhaça} = 1.099.905 \text{ m}^3 \cdot 41,00 \text{ kg/m}^3 =$

$$\boxed{45.096.100 \text{ kg} = 45096,1 \text{ t}} \quad (2)$$

**Tabela 14:** Matéria seca orgânica disponível para geração de biogás a partir dos resíduos vinhaça e torta de filtro da Denusa na safra de 2013/2014

Resíduo	Quantidade	MSO	MSO total	E.R %	MSO disponível
Vinhaça	1099905 m <sup>3</sup>	41 kg/m <sup>3</sup>	45.096.105 kg	84,28 %	38006997 kg
Torta	39266 t	24,02 %	9.431.693 kg	79,97 %	7542525 kg

MSO: matéria seca orgânica, E.R.: Eficiência de remoção da MSO e a transformação para biogás;

MSO<sub>dis</sub>: MSO disponível para geração de biogás.

Observando a o fator da eficiência E.R. observada nos experimentos da transformação da MSO para biogás o MSO<sub>disponível</sub> pode ser calculado, depois multiplicado pelo potencial de geração de biogás PGB para conseguir o potencial total de geração de biogás usando todos os respectivos resíduos.

**Tabela 15:** Capacidade de geração de biogás a partir dos resíduos vinhaça e torta de filtro da Denusa na safra de 2013/2014

Resíduo	MSO <sub>disponível</sub>	PGB	PGB <sub>total</sub>	P.C.I.	P.C.I. <sub>total</sub>
Vinhaça	38006997 kg	203,6 Ncm <sup>3</sup> /gmso	7.739.607 m <sup>3</sup>	20,8	160.983.820
Torta	7542525 kg	203,1 Ncm <sup>3</sup> /gmso	1.532.102 m <sup>3</sup>	20,8	31.867.712
Soma			9.271.708 m <sup>3</sup>	20,8	192.851.532

PGB: Potencial de geração de biogás, PGB<sub>total</sub>: Potencial total de geração de biogás usando todos o respectivos resíduos. P.C.I: Poder calorífico inferior.

Como mostra a tabela 14 um potencial total de geração de biogás a partir da vinhaça e da torta de filtro de mais que 9,271 milhões de m<sup>3</sup> de biogás pode ser calculado.

Baseado numa composição média de biogás de 55% de concentração de metano (CORTEZ, 1998), um m<sup>3</sup> de biogás tem um poder calorífico de ignição inferior PCI cerca de 20,8 MJ/m<sup>3</sup>.

Multiplicando o PGB<sub>total</sub> com o PCI do biogás gerado, temos um potencial energético no biogás gerado de P.C.I.<sub>total</sub>= **192.851.532 MJ**.

Para comparar este valor com o potencial energético do etanol gerado, necessitamos os seguintes valores:

P.C.I.<sub>etanol</sub> = 29,7 MJ kg<sup>-1</sup> (NIST, 2011), densidade de etanol  $\rho = 0,7894 \text{ kg L}^{-1}$ ,

$$\Rightarrow \boxed{\text{P.C.I.} \cdot \rho = 29,7 \text{ MJ kg}^{-1} \cdot 0,7894 \text{ kg L}^{-1} = \mathbf{23,45 \text{ MJ L}^{-1}}} \quad (3)$$

O valor de  $23,45 \text{ MJ L}^{-1}$  mostra o P.C.I. de um litro de etanol puro.

Dividindo o P.C.I.<sub>total</sub> do biogás gerado pelo P.C.I.<sub>etanol</sub> pode ser calculado a quantidade do equivalente energético de etanol puro (anidro).

$\text{P.C.I.}_{\text{total}} : \text{P.C.I.}_{\text{etanol}} = \text{quantidade de equivalente energético de etanol}$

$$\boxed{192.851.532 \text{ MJ} : 23,45 \text{ MJ L}^{-1} = \mathbf{8.223.946 \text{ L}}} \quad (4)$$

O total de reaproveitamento da torta de filtro e vinhaça gerada na usina Denusa durante a safra do ano 2013/2014 para geração de biogás, representa, segundo a função (4), um ganho de energia equivalente a 8.223.946 L de etanol.

A produção de bioenergia a partir da biodigestão dos subprodutos do etanol pode representar uma oferta a mais de energia renovável para o Brasil.

As unidades produtoras de etanol poderão operar com sistemas híbridos de energia com várias fontes advindas dos subprodutos do etanol.

Além disso, ao final do processo de biodigestão tem-se o biofertilizante que pode ser utilizado como orgânica fonte de nutrientes para o solo cultivado com cana-de-açúcar.

## CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A utilização da tecnologia de biodigestão anaeróbia como forma de tratamento da torta de filtro e da vinhaça antes da sua disposição final no solo, mostra-se como alternativa eficiente na remoção de matéria orgânica e seu aproveitamento energético na forma de biogás como uma fonte alternativa de energia nos complexos sucroalcooleiros.

A pesquisa conclui ainda que a utilização da vinhaça e da torta de filtro na fertilização nos canaviais do Brasil representa um ganho econômico importante para a produção do

etanol. Porém são necessárias novas pesquisas para avaliar o comportamento do solo após vários anos de aplicação desses resíduos.

O uso da tecnologia de biodigestão anaeróbia de resíduos da produção do etanol a nível industrial ainda não é muito difundido no Brasil. Serão necessárias novas pesquisas que poderão demonstrar a eficiência e a importância do tratamento dos resíduos do etanol. E ainda proporcionar conhecimentos que poderão solucionar problemas de controle nas etapas da biodigestão.

Cabe aos órgãos ambientais a níveis municipal, estadual e federal estabelecer formas de controle e fiscalização do gerenciamento de resíduos do etanol. As indústrias do setor sucroalcooleiro devem adotar medidas que garantam uma melhor forma de gerenciamento desses resíduos, para que no futuro a cadeia de produção do etanol seja totalmente sustentável.

Os resultados mostram perspectivas do uso da biodigestão anaeróbia para o tratamento dos resíduos do etanol, tipo vinhaça e torta de filtro, no entanto, fazem-se necessários desdobramentos, no sentido de nortear a tomada de decisão pela usina, quanto a utilizar ou não essa tecnologia.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, (2009). **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucoenergética. Brasília: Agencia Nacional das Águas:** Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; União da Indústria da Cana-de-açúcar; centro de Tecnologia Canavieira.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETROLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTIVEIS: **Boletim do Etanol.** Brasília, 2014. 23 p.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental.** 4ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844p.



CNA – CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Relatório de Inteligência do Bagaço do Posto**. Brasília 2013. Disponível em <<http://www.icna.org.br/relatorio/relatorio-de-inteligencia-do-bagaco-ao-posto>> Acesso em: 15/07/2014

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-**Acompanhamento da safra Brasileira-Cana-de-açúcar**. Safra 2013/2014 Quarto levantamento Brasília, Abril de 2014. Em<[http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&ordem=produto&Pagina\\_objcmsconteudos=4#A\\_objcmsconteudos](http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&ordem=produto&Pagina_objcmsconteudos=4#A_objcmsconteudos)> Acesso em 15 de junho 2014.

CORTEZ, L.A.B, FREIRA, W.J., ROSILLO-CALLE, F. **Biodigestion of vinasse in Brazil**. International Sugar Journal, 100, 1998, pp 403-413.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V. (FNR)/GIZ: **Guia Prático do Biogás Geração e Utilização**. 2010. Disponível em: <<http://mediathek.fnr.de/broschuren/fremdsprachige-publikationen/portugues/guia-pratico-do-biogas.html>>

FILHO; G. Z, PICCIRILLI, J. P. **O processo de fabricação do açúcar e álcool desde a lavoura da cana até o produto acabado**. Santa Cruz do Rio Pardo-SP: Editora Viena, 2012.

KELLER, E.; BOTKIN, D. **Ciência Ambiental: Terra, um planeta vivo**. 7ª edição. LTC, 2011. 716p.

LOMANTO, L. F. S. C. **Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento). Escola de Engenharia de São Paulo, São Carlos/SP, 2011.

MALAVOLTA; E. KLIEMANN, H. J. **Desordens Nutricionais no Cerrado**. Piracicaba: Editora K P POTAFOS, 1985.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 27 de 05/06/2006.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. IN SDA nº 28-**Métodos Analíticos Oficiais Para Fertilizantes Minerais, Orgânico-Minerais e Corretivos**.

NIST – National Institute of Standards and Technology. **NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69**, EUA. 2011. Disponível em <<http://webbook.nist.gov>>, acesso em 5/11/2014.

SHULTZ, N. **Efeito Residual da Adubação em Cana Planta e Adubação Nitrogenada em Cana de Primeira Soca com Aplicação de Vinhaça**. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo). Instituto de Agronomia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009.

SZYMANSKI, M.S. e BABINOT, R, 2008. **Utilização do sistema de biodigestão anaeróbia para vinhaça: Uma revisão sobre os potenciais energéticos e créditos de carbono**. Dispo-

nível em <[http://www.unicentro.br/graduacao/deamb/semana\\_estudos/pdf\\_08/UTILIZA%C7%C3O%20DO%20SISTEMA%20DE%20BIODIGEST%C3O%20AN AER%D3BIA.pdf](http://www.unicentro.br/graduacao/deamb/semana_estudos/pdf_08/UTILIZA%C7%C3O%20DO%20SISTEMA%20DE%20BIODIGEST%C3O%20AN AER%D3BIA.pdf)> acesso em: 15/07/2014.

RIBEIRO, R. **A usina de açúcar e sua automação**. São Paulo, BRASIL, 2. edição, 2003.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR- **Moagem de Cana-de-açúcar e Produção de Açúcar e Etanol**. Brasília, 2010. Em<<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4> > Acesso em 12 de junho 2014.

UNIVERSITY FÜR BODENKULTUR WIEN. **Manual do Usuário**. Alemanha, 2011.

VDI 4630, VDLUFA-Verbandsmethode: Fermentation of organic materials  
Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. 4.1  
**Determinação da produção de biogás e metano em testes de fermentação. Alemanha.**  
2006.

KELLER, E. BOTKIN, D. **Ciência Ambiental: Terra, um planeta vivo**. 7ª edição. LTC, 2011. 716p.

## RESUMO DO CURRÍCULO LATTES

Bacharelada e licenciada em Química pelo Centro Universitário de Goiás, Uni-Anhaguera, Goiânia-Go e especialista em Gestão e Química do Meio Ambiente pela Universidade Federal de Goiás. Possui experiência profissional em análise de corretivo de acidez (calcário) e fertilizante adquiridas durante período de estágio no Laboratório de análise Físico-Química de Fertilizantes, Corretivos do LANAGRO-GO (Laboratório Nacional Agropecuário em Goiás). Atualmente é assistente de laboratório sênior no laboratório de físico-química do LANAGRO-GO e aluna do programa de pós-graduação em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto de Federal de Educação, ciência e Tecnologia de Goiás.