

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANDRÉ LUIZ ENCINAS AUDIBERT

**AVALIAÇÃO QUANTITATIVA E ANÁLISE DO POTENCIAL
ENERGÉTICO DO BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA NA INDÚSTRIA
SUCROALCOOLEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2015

ANDRÉ LUIZ ENCINAS AUDIBERT

**AVALIAÇÃO QUANTITATIVA E ANÁLISE DO POTENCIAL
ENERGÉTICO DO BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA NA INDÚSTRIA
SUCROALCOOLEIRA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de “Engenheiro Ambiental”.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi

LONDRINA
2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná



Campus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

AVALIAÇÃO QUANTITATIVA E ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO
BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

por

Andre Luiz Encinas Audibert

Monografia apresentada no dia 17 de novembro de 2015 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____
(aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Dr. Alexandre Sordi
(UTFPR)

Profa. Ma. Raquel Jackeline Ratz
(UTFPR)

Prof. Dr. Ricardo Namagine Costanzi
Orientador

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho. Ao prof. orientador Dr. Ricardo Nagamine Costanzi, aos meus pais, irmãos, namorada e amigos, o meu muito obrigado.

RESUMO

AUDIBERT, André Luiz Encinas. Avaliação quantitativa e análise do potencial energético do biogás a partir da vinhaça na indústria sucroalcooleira. 2015. 66 f. Monografia (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

O presente trabalho tem como finalidade analisar, de forma quantitativa, a produção de biogás proveniente da biodigestão anaeróbia da vinhaça em diferentes concentrações de torta de filtro da usina sucroalcooleira, assim como verificar a viabilidade energética do produto obtido. Este estudo colabora com pesquisas e avanços tecnológicos em desenvolvimento sustentável, pois o biogás é uma fonte limpa e renovável de energia, podendo ser uma alternativa viável na obtenção de calor e eletricidade que descentraliza a fonte hídrica como matriz energética. Para isso, foram coletados 20 litros de vinhaça, 2 kg de torta de filtro e aproximadamente 5 litros de lodo do fundo das lagoas da Usina Alto Alegre (UAA) localizada na cidade de Florestópolis – PR. Estas amostras foram inoculadas em 8 reatores UASB, divididos em duplicatas de 4 concentrações da torta de filtro, sendo elas: (1) somente vinhaça (branco), (2) vinhaça e 50g de torta, (3) vinhaça e 70g de torta, (4) vinhaça e 90g de torta, sendo que em todos os reatores foram acrescentados 200mL de lodo para acelerar a reação. Os parâmetros analisados durante o experimento foram: pH, sólidos totais, sólidos voláteis, condutividade elétrica e análise quantitativa do biogás produzido. O resultado obtido da produção máxima de biogás foi 4,63 litros em 17 dias de operação, resultando no potencial energético equivalente a 214,47 KWh/h e o dimensionamento foi realizado em 4 reatores com capacidade volumétrica diária de 829 m³ de vinhaça.

Palavras-chave: Biogás. Vinhaça. Biodigestão anaeróbia.

ABSTRACT

AUDIBERT, André Luiz Encinas. Quantitative evaluation and analysis of the energy potential of biogas from vinasse in the sugarcane industry. 2015. 66 f. Monografia (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

The present work aims to analyze, in a quantitative way, the production of biogas from the anaerobic digestion of vinasse in different filter cake concentrations of sugarcane plant, as well as verifying the energy viability of the product. This study collaborates to researches and technological advances in sustainable development, since biogas is a clean and renewable source of energy and can be a viable alternative in obtaining heat and electricity, decentralizing hydric source as an energy matrix. For this, were collected 20 liters of vinasse, 2 kg of filter cake and about 5 liters of sludge from the bottom of lakes of Plant Alto Alegre (UAA) located in Florestópolis - PR. These samples were inoculated into 8 UASB reactors, divided into duplicates of 4 filter cake concentrations, which are: (1) only vinasse (blank), (2) vinasse and 50g filter cake, (3) vinasse and 70g filter cake, (4) 90g filter cake and vinasse, whereas in all the reactors were added 200 ml of sludge to accelerate the reaction. The parameters analyzed during the experiment were: pH, total solids, volatile solids, electrical conductivity and quantitative analysis of the biogas produced. The result of the maximum biogas production was 4.63 liters in 17 days of operation, resulting in the potential energy equivalent to 214.47 kWh/h and the dimensioning was performed on 4 reactors with daily volume capacity of 829 m³ of vinasse.

Key words: Biogas. Vinasse. Anaerobic biodigestion.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – OFERTA MUNDIAL DE ENERGIA (2010).....	14
FIGURA 2 – DERIVADOS DO PETRÓLEO APÓS O REFINO (2007)	15
FIGURA 3 – CICLO DO CARBONO	16
FIGURA 4 – OFERTA DE ENERGIA NOS ANOS 2012-2013	17
FIGURA 5 – PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NACIONAL	17
FIGURA 6 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DA FERMENTAÇÃO ETANÓLICA	21
FIGURA 7 – OPÇÕES TECNOLÓGICAS DE DESTINAÇÃO DA VINHAÇA	29
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DE UM REATOR DE FLUXO ASCENDENTE	33
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DA ORDEM METODOLÓGICA SEGUIDA	37
FIGURA 10 – REATORES EM SISTEMA DE BATELADA.....	38
FIGURA 11 – PRODUÇÃO ACUMULADA DE BIOGÁS	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS PRODUTORES DE AÇÚCAR	20
TABELA 2 – COMPONENTES DO CALDO BASEADO EM ANDRADE E CASTRO (2006).....	22
TABELA 3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA VINHAÇA <i>IN NATURA</i>	27
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA VINHAÇA – USINA SÃO MARTINHO	30
TABELA 5 – EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA ENTRE UM M ³ DE BIOGÁS E OUTROS ENERGÉTICOS	31
TABELA 6 – COMPOSIÇÃO MÉDIA DO BIOGÁS PARA DIFERENTES RESÍDUOS ORGÂNICOS	35
TABELA 7 – VOLUME INICIAL DAS AMOSTRAS.....	39
TABELA 8 – ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS.....	47
TABELA 9 – PRODUÇÃO EXPERIMENTAL DE BIOGÁS DA USINA.....	49
TABELA 10 – PRODUÇÃO TEÓRICA DE ENERGIA DA USINA.....	49
TABELA 11 – DADOS INICIAIS DA USINA ALTO ALEGRE.....	52
TABELA 12 – DIMENSIONAMENTO PARA CADA REATOR.....	53
TABELA 13 – CARGA DA VINHAÇA.....	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 JUSTIFICATIVA	13
4 REFERENCIAL TEÓRICO	14
4.1 ENERGIAS	14
4.1.1 Energia Elétrica	18
4.1.2 Usina Sucoenergética	19
4.1.2.1 Processo Produtivo	21
4.1.2.2 Bioetanol	24
4.1.2.3 Subprodutos	25
4.1.2.4 As Características Físico Químicas da Vinhaça	27
4.1.2.5 Utilização da Vinhaça	27
4.1.2.5.1 Biodigestão	32
4.1.2.5.2 Princípio de Funcionamento	33
4.1.2.5.3 Biogás	34
5 MATERIAIS E MÉTODOS	37
5.1 ETAPA 1: INSPEÇÃO NOS REATORES ANAERÓBIOS, TESTES E CORREÇÕES	37
5.2 ETAPA 2: COLETA DE MATERIAIS	38
5.3 ETAPA 3: INOCULAÇÃO NO REATOR	39
5.4 ETAPA 4: ANÁLISES	39
5.4.1 pH	40
5.4.2 Condutividade Elétrica	40
5.4.3 Sólidos Totais	40
5.4.4 Sólidos Fixos e Voláteis	41
5.5 ETAPA 5: DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE	42
6 RESULTADOS	45
6.1 PRODUÇÃO DE BIOGÁS	45
6.2 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	47
6.3 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE	52
7 CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável ocorre nos âmbitos social, econômico e ambiental e considera o avanço tecnológico e o crescimento populacional em conjunto com as atividades humanas (NAGATA et al., 2010). Para atingi-lo faz-se necessário pensar nas diferentes matrizes energéticas que estão movendo o mundo. Nesse contexto, a energia é uma temática bastante discutida atualmente, ao passo que engloba todas as atividades físico-químicas e biológicas e está relacionada a qualquer recurso ou ação que permita transformar a matéria a partir do trabalho (PORTO-GONCALVES, 2008).

De 1970 a 2000, as mudanças que ocorreram no setor energético foram principalmente a inclusão de recursos hídricos, visto que, segundo Tolmasquim (2007), em 1970 o petróleo e a lenha correspondiam a 78% da matriz energética e em 2000, essas duas fontes junto à energia hidráulica correspondiam a 74% da energia produzida. Esse mesmo quadro pode ser observado de maneira acentuada no sistema de geração elétrica brasileiro, em que a participação hídrica na matriz energética o diferencia de qualquer outro país.

Embora os recursos hidráulicos façam parte da matriz energética sustentável, posto que são fontes renováveis de energia, a alta dependência de uma única forma de produção de energia fragiliza a eficiência, tornando-a vulnerável a variáveis que não são passíveis de controle, como as alterações climáticas. Corroborando essa afirmação Vargas et al. (2005), afirma que os sistemas elétricos devem atender a demanda diária e sazonal, no qual por ser tratar de hidroeletricidade deve-se adaptar as oscilações do regime de chuvas, caso contrário pode acarretar a impossibilidade de manutenção do preço da energia em períodos de sazonalidade.

Segundo o estudo "Brasil Sustentável: Desafios do Mercado de Energia", da consultoria Ernest & Young e FGV Projetos, nos próximos 22 anos o Brasil vai se transformar em um dos cinco maiores consumidores de energia do mundo. Para suportar este crescimento acelerado será necessário, até 2030, um investimento estimado em US\$ 310 bilhões em geração de energia, para ampliar sua capacidade de produção (IN PRESS, 2008).

Para 2030 projeta-se que a base da geração de energia seja de origem hidráulica, petrolífera, de biomassa e de gás natural. A utilização de biomassa como matéria prima para a produção de energia é uma das alternativas mais promissoras, visto que, biomassa é um termo muito amplo, incluindo madeira, plantações, algas e até mesmo resíduos agrícolas e florestais (Centro de Estudos e Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas, 2011).

No ano de 2007, de acordo com a *Statistical Review of World Energy*, publicada em 2008, a quantidade de biomassa existente na Terra era suficiente para produzir 55% da energia elétrica gerada no mundo (ANEEL, 2008). Com o aumento da produção dessa fonte de energia países com agroindústria ativa e com grandes dimensões de terra serão os maiores fornecedores de matéria prima, pela alta produção de resíduos agrícolas. O estudo realizado no Plano Nacional de energia 2030 apontou que as faixas tropical e subtropical são as melhores regiões do planeta para a produção de biomassa – entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio, onde estão localizados os Estados Unidos, União Europeia, América Central, continente Africano, Austrália e América do Sul, incluído o Brasil (ANEEL, 2008). Ao relacionar a necessidade de grandes áreas agricultáveis com a posição geográfica, pode-se concluir que o Brasil é um dos principais países neste quesito, juntamente com Estados Unidos, Alemanha dentre outros.

A alternativa empregada no processo de produção do bioetanol é uma nova visão de eficiência de processos ao aproveitar a biomassa para gerar energia térmica e elétrica, além de trazer benefícios ao incorporar o resíduo novamente à cadeia produtiva (LEAL, 2005). Outros subprodutos, como na indústria sucroalcooleira, podem ser reaproveitados de forma mais energeticamente eficiente, como a vinhaça, subproduto comumente utilizado como bio-fertirrigante, que tem uma atuação ambiental questionável (PIRES; FERREIRA, 2008).

Sobre a utilização da vinhaça na fertirrigação, Pires e Ferreira (2008) afirmam que são necessários maiores estudos que analisem as características do solo e a concentração da vinhaça, uma vez que o manejo inadequado pode ocasionar o carreamento de nutrientes ao corpo hídrico. Além disso esse subproduto da cana de açúcar apresenta pH muito baixo, necessitando de tratamento para não prejudicar a produtividade do solo em médio e longo prazo.

Outra alternativa de utilização da vinhaça é a sua biodigestão para a produção de biogás. A vinhaça possui alto poder calorífico, o que representa um

forte potencial como fonte de energia. O calor produzido está relacionado com a umidade do gás e o teor de metano, e este, pode ser estimado de acordo com a carga de matéria orgânica do resíduo (POMPERMAYER; DE PAULA JUNIOR, 2003).

Diante desse contexto, buscou-se no presente trabalho verificar a viabilidade da produção de biogás para o subproduto da usina sucroalcooleira, utilizando um biodigestor anaeróbio, bem como identificar quais os ganhos que esse processo pode oferecer ao meio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Verificar a quantidade de biogás produzido a partir da biodigestão anaeróbia da vinhaça com diferentes concentrações de torta de filtro da usina sucroalcooleira e comparar com dados de literatura.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a revisão bibliográfica acerca do tema de produção de biogás a partir de vinhaça para conhecer os estudos existentes na área e os métodos empregados;
- Analisar as características físico-químicas da vinhaça, do lodo e da torta de filtro antes do processo de biodigestão;
- Estimar o potencial da produção de biogás a partir do teor de sólidos voláteis;
- Dimensionar o biodigestor para produção de biogás.

3 JUSTIFICATIVA

Sendo o biogás uma fonte limpa e renovável de energia, sua utilização pode ser uma alternativa viável na obtenção de calor e eletricidade, a medida que permite a descentralização da fonte hídrica como matriz energética. Além disso, o tratamento da vinhaça a partir da biodigestão produz fertilizantes com características mais adequadas ao solo, uma vez que a utilização desse subproduto como é feita atualmente tem contaminado o solo e o lençol freático. Outro ganho que justifica o estudo da geração de energia a partir do biogás é o valor de mercado dessa fonte energética, que pode ser comercializada.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Energias

Ao longo da história sempre houve uma forma de obtenção de energia de referência que dominasse o setor energético e ocasionasse reflexos significativos na economia mundial. O que torna essa fonte dinâmica e obriga a passar por um ciclo é o desenvolvimento tecnológico. Observa-se que no período pré-industrial a principal fonte era a biomassa, principalmente a lenha e o carvão vegetal, que foram substituídos posteriormente pelo carvão mineral na revolução industrial e há mais de um século o petróleo está no centro do desenvolvimento econômico moderno (COSTA; PRATES, 2005).

Atualmente grande parte da energia produzida é de origem petrolífera. O mercado do petróleo iniciou-se no final do século XIX quando foi constatada a riqueza do combustível a partir de seu fracionamento numa infinidade de hidrocarbonetos com alto poder calorífico além da sua capacidade de produção de polímeros que impulsionou a indústria do plástico (FERNANDES; SANTOS, 2004). Desde então, o chamado ouro negro move a economia, trazendo desenvolvimento a partir da obtenção mais eficiente de energia (PORTO-GONCALVES, 2008). A importância do petróleo e de seus derivados, na oferta de energia está representada na Figura 1:

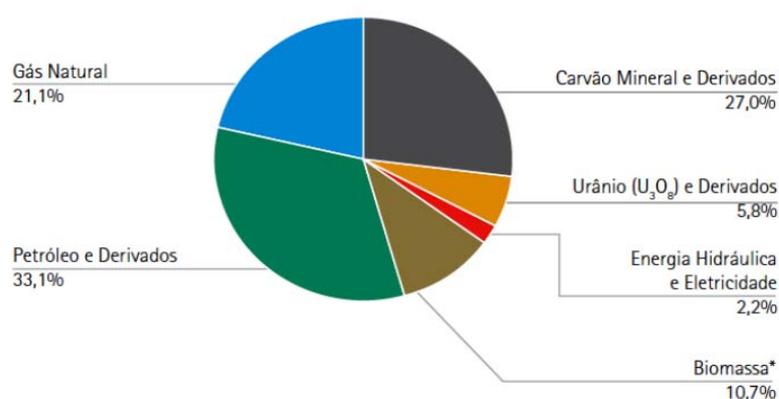


Figura 1 – Oferta Mundial de Energia (2010)
Fonte: MME – Ministério de Minas e Energia (2011).

A primeira aplicação do petróleo foi através da combustão direta deste biocomposto utilizado como combustível, aproveitando seu alto poder calorífico e substituindo outras fontes de energia como óleo de baleia. Posteriormente, iniciou-se o processo de refino em alambiques para a obtenção de querosene e, com a invenção dos motores à combustão a diesel, passou-se a utilizar cada vez mais frações do petróleo (GURGEL et al., 2013). Através de seu refino ainda são obtidos: a gasolina, as naftas, o querosene, asfaltos, lubrificantes, solventes, parafinas, coque de petróleo, gás liquefeito (GLP) ou gás de cozinha e óleo diesel. Dentre eles, destaca-se a produção da gasolina, com 23,4% da derivação do petróleo, conforme apresentado na figura 2, que juntamente com o etanol são responsáveis pelo desempenho dos automóveis (COSTA, 2011).

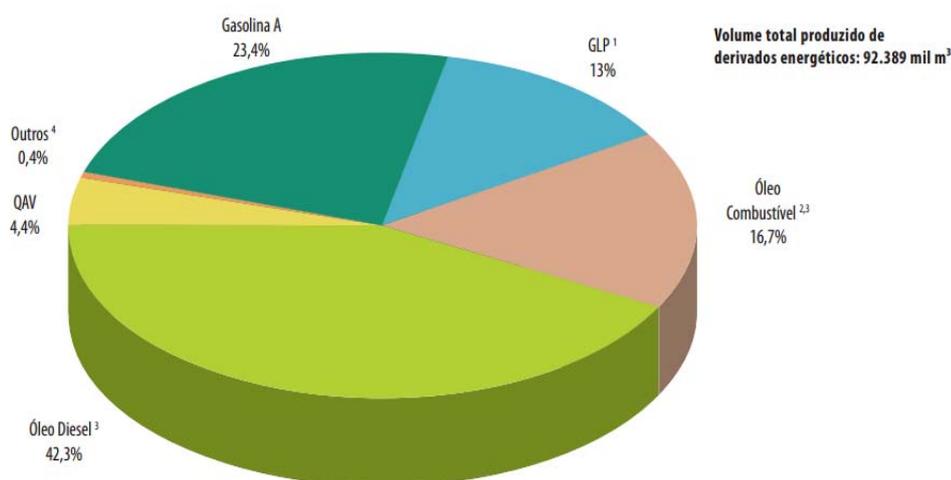


Figura 2 – Derivados do petróleo após o refino (2007)
Fonte: MME – Ministério de Minas e Energia (2008).

Somente em meados do século XX questões ambientais começaram a ser discutidas. Foram levantadas questões sobre as consequências da extração e do uso excessivo desse combustível. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2014), a exploração do petróleo pode ocasionar a redução temporária da pesca, por conta da contaminação da água em função dos fluidos da perfuração, da alta taxa de sedimentos e cascalhos que serão decantados e o risco de contaminação por vazamentos.

Cortez et al. (2008) descrevem que, além dos impactos da extração, a liberação de gases provenientes da combustão do petróleo, alteram o ciclo pré-

existente de carbono. O autor ainda defende que a alternativa mais adequada para a redução dessas emissões é o investimento em fontes renováveis de energia.

Classifica-se por energia renovável aquela provida de fontes capazes de se regenerar por meios naturais, portanto, são consideradas inesgotáveis (ALVES, 2010), dentre elas uma das formas mais utilizadas é a biomassa.

Corroborando tal afirmação, Pacheco (1990) escreve que a biomassa possui a capacidade de absorver gás carbônico (CO_2) através da fotossíntese, sendo capaz de restaurar o ciclo do carbono e, portanto, tendo papel essencial na redução desse gás na atmosfera, conforme apresentado na Figura 3.

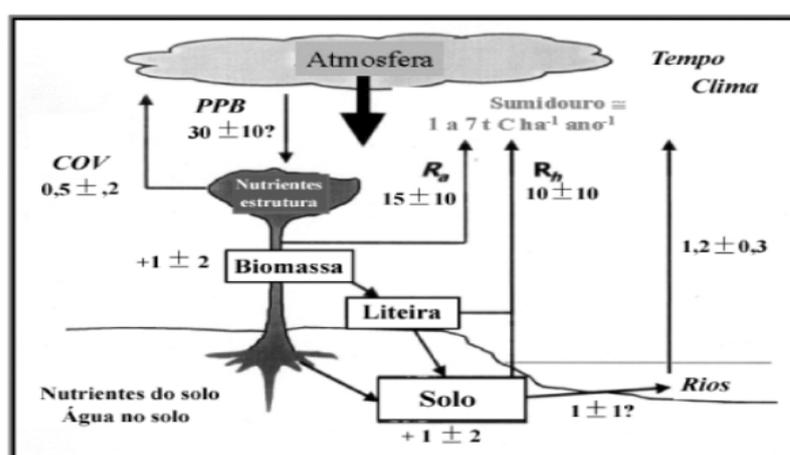


Figura 3 – Ciclo do carbono
Fonte: Nobre e Nobre (2002).

Unidades: t C/ha/ano. PPB = produtividade primária bruta; R_a = respiração autotrófica; R_h = respiração heterotrófica; COV = compostos orgânicos voláteis.

Se tratando de fontes renováveis de energia o bioetanol se destaca como a alternativa com maior maturidade e mais inserida nas matrizes energéticas de diferentes países (BNDES; CGEE, 2008).

O Balanço Energético Nacional de 2014 (BEN), formulado pelo Ministério de Minas e Energia, constatou que a matriz energética brasileira é, atualmente, repartida em 41% renovável e o restante não renovável como mostrado na Figura 4. Entre as fontes de energia renováveis destacam-se a biomassa da cana, a lenha e o carvão vegetal, a hidráulica e a lixívia. Enquanto o petróleo e seus derivados, gás natural, carvão mineral e urânio compõem a não renovável.

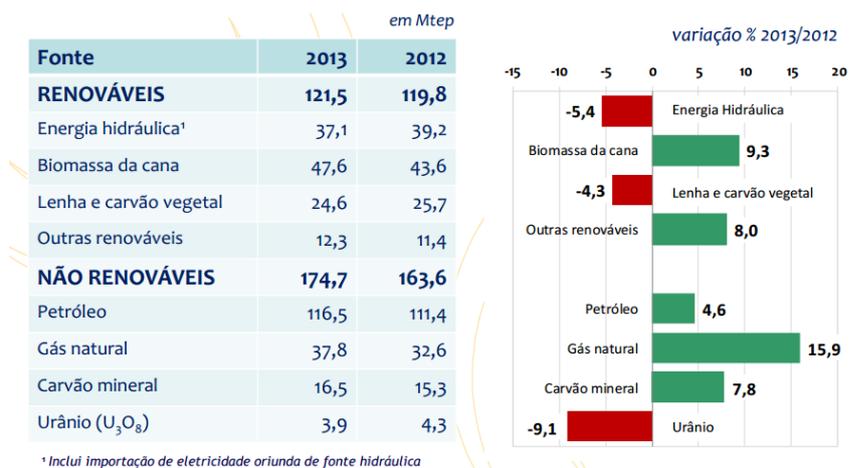


Figura 4 – Oferta de energia nos anos 2012-2013
Fonte: MME – Ministério de Minas e Energia (2014).

Ainda de acordo com o BEN (MME, 2014), a participação de energia renovável no Brasil manteve-se no ano de 2013 entre as maiores do mundo, no qual a participação dessa energia na média mundial representa somente 13%. No entanto, segundo esse balanço, houve a redução de 1,3% da produção renovável de energia no país após 2012. Essa ocorrência pode ser explicada pela falta de chuva que acarretou a redução da produção de energia hidráulica, principal fonte energética do país, como ilustrado na Figura 5.

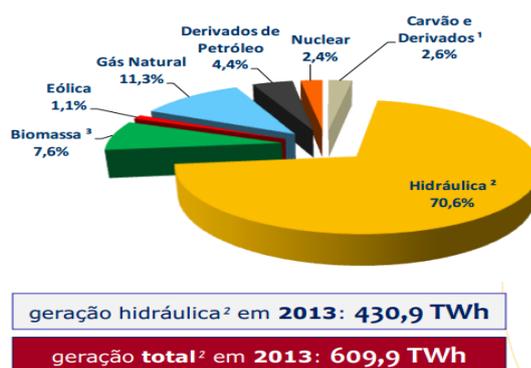


Figura 5 – Produção de energia elétrica nacional
Fonte: Ministério de Minas e Energia (2014).

As características geomorfológicas do Brasil fizeram com que a energia hidráulica sempre fosse dominante, tendo capacidade instalada de aproximadamente 70.000 megawatts. Por esse motivo o estímulo a outras fontes de energia é pequeno comparado à média mundial e isso fez com que se criassem

incentivos governamentais como o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Eletricidade – Proinfa (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Em 2001 o Brasil passou por uma crise no setor energético devido à falta de políticas e investimentos provenientes de uma gestão de 20 anos (ARAÚJO, 2001). Segundo Araújo (2001), a solução naquela época seria desenvolver uma política de gerenciamento e investimentos em longo prazo e a sugestão destacada seria a geração de gás natural como fonte alternativa de energia. Ou seja, há 13 anos a descentralização de energia elétrica no Brasil ganhou destaque, o que justifica-se diante da necessidade representada na Figura 5.

Segundo a Agência Nacional de Energia e Eletricidade - Aneel, em seu atlas de energia elétrica do Brasil disponibilizado em 2008, o Proinfa foi fundamentado na lei nº 10.438 de abril de 2002, onde assegurou parceria de 20 anos com a Eletrobrás. O programa consiste na instalação de 3,3 mil Megawatts (MW), distribuídos em 1,2 mil MW a pequenas centrais elétricas, 1,4 mil MW a usinas eólicas e 685 MW a usinas à base de biomassa.

4.1.1 Energia Elétrica

A geração de eletricidade no Brasil cresceu em média 4,2% ao ano entre 1980 e 2002. Por esse motivo, a fim de garantir a distribuição de energia identificou-se a necessidade de aperfeiçoar o modelo de gerenciamento do setor de energia elétrica do país, criando em 2002 a EPE – Empresa de Planejamento Energético, em trabalho conjunto com o Ministério de Minas e Energia. Esse novo modelo baseia-se em leiloar empreendimentos que garantam a demanda de energia nos próximos 5 anos. Contudo, a modelagem da demanda futura leva em consideração o crescimento do mercado, o crescimento do país (PIB) e a demanda elástica de energia, tornando-se vulnerável e partindo muitas vezes de premissas equivocadas. Uma das consequências desse modelo é que impulsionou o comércio de energia oriunda de usinas térmicas, o que, além de encarecer a energia, intensifica os problemas ambientais (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Segundo Goldemberg e Lucon (2007), o país está na contramão da história, pois enquanto os demais países buscam formas de reduzir a participação de fontes poluentes na matriz energética, o Brasil é impulsionado pela política de urgência descartando sua capacidade sustentável de produzir energia limpa.

Os autores ainda destacam a consolidação da garantia de energia alcançada em 2006, quando o Brasil tornou-se auto-suficiente na produção de petróleo ao atingir 1,763 milhão de barris por dia, o que representou a redução de gastos financeiros com importação. No entanto, para atingir esse objetivo e manter a política de independência, o país investe boa parte da renda disponível o que além de não garantir essa segurança em longo prazo por se tratar de um recurso finito, impede o desenvolvimento de outros fins econômicos mais produtivos. Um exemplo que contribui na suficiência do país quanto ao petróleo é a substituição da gasolina pelo álcool.

Outra fonte que vem sendo estudada para essa questão é o gás natural que mesmo encontrado em grandes quantidades no Sudeste, tem sua utilização dificultada, pois precisa de elevados investimentos na estrutura básica principalmente em dutos de transporte do biocombustível (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Além dela, o carvão há muito tempo desempenha um papel secundário na matriz energética nacional, pois a baixa qualidade encontrada no Brasil torna necessário o processamento das impurezas antes do uso nas indústrias siderúrgicas e termoelétricas, dependendo de importações (GOLDEMBERG, 1998).

Uma alternativa a esse cenário é o uso da biomassa no sistema de cogeração baseado na realidade nacional, em que se destaca a indústria sucroalcooleira como grande potencial de energia. Para tal, necessita-se entender melhor essa agroindústria.

4.1.2 Usina Sucroenergética

Atualmente, a o sistema de cogeração – geração de energia térmica e elétrica – a partir da biomassa é comum nas indústrias com alta demanda de energia como sucroalcooleiras e papel/celulose (LEAL, 2005). Segundo dados do Centro de

Gestão e Estudos Estratégicos (BNDES; CGEE, 2008), há no país 308 usinas de açúcar e álcool, com a produção anual média de um milhão de toneladas de cana por usina, em que cada tonelada produz cerca de 140 kg de bagaço, dos quais 90% são utilizados para a produção de energia térmica e elétrica (o que representa aproximadamente 40 mil toneladas de bagaço). Como cada 6,5 toneladas de bagaço são capazes de produzir 1 MWh (ALVES, 2006), o aproveitamento do bagaço é capaz de gerar cerca de 6000 GWh.

Segundo dados do International Sugar Statistics (2009), mais de 100 países produzem açúcar e 80% dessa produção é proveniente da cana-de-açúcar cultivada principalmente em zonas tropicais e sub-tropicais. Segundo Illovo (2009), o Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar conforme mostra a Tabela 1, sendo a produção em milhões de toneladas, população em milhões de habitantes e o consumo per capita em quilos.

Tabela 1 – Principais produtores de açúcar

PAÍSES	PRODUÇÃO	EXPORTAÇÃO	POPULAÇÃO	CONSUMO PER CAPTA
Brasil	38.633	23.685 (1º)	198	58
India	16.304	0.237 (15º)	1.166	19
EUA	14.865	0.707 (9º)	500	34
China	13.387	-	1.338	10
Tailândia	7.717	5.004 (2º)	66	36

Fonte: Illovo Sugar LTD (2009).

A agroindústria canavieira tem se desenvolvido de forma acelerada, fazendo com que grandes investimentos sejam feitos nesse setor, principalmente no aproveitamento do bagaço e da palha de cana como fonte energética (SANTOS et al., 2012).

Segundo o Instituto de Economia Agrícola – IEA houve um acréscimo de 200% na exportação de álcool, que corresponde a venda de 2,4 bilhões de litros, entre janeiro de 2004 e setembro de 2005 (TORQUATO; FRONZAGLIA, 2005). Para Santos et al. (2012), esse acréscimo justifica-se por cumprir um dos principais objetivos de se utilizar bicompostíveis: a substituição do petróleo como a maior fonte de energia que tem por consequências o prolongamento da utilização de recursos não renováveis e a redução de poluentes atmosféricos.

De acordo com o Balanço Energético realizado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2014), a produção de etanol aumentou 20% no ano de 2012. O etanol no Brasil é produzido a partir da cana de açúcar e pode ser produzido em destilarias autônomas, nas quais toda a produção é convertida em álcool, ou em plantas anexas, onde parte do caldo é utilizado na produção do açúcar (DIAS et al., 2011).

4.1.2.1 Processo Produtivo

Uma das maneiras de se produzir etanol é a partir das destilarias autônomas. Segundo Dias et al. (2011), para uma destilaria autônoma são considerados processos como a limpeza e preparação da cana, extração do caldo, concentração e tratamento do caldo, fermentação, destilação e desidratação do etanol. As etapas necessárias para se obter o bioetanol estão representadas na Figura 6.

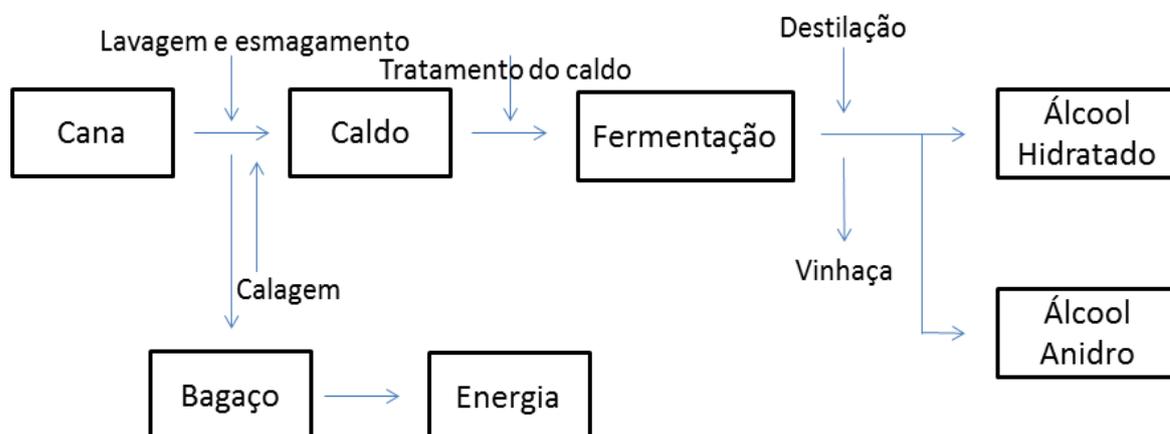


Figura 6 – Processo de produção da fermentação etanólica
Fonte: Adaptado de Rodriguez, 2011.

A limpeza e preparação da cana são essenciais para a remoção das impurezas minerais e vegetais oriundas da colheita, principalmente em tempo úmido onde a queima é ineficiente tornando comum grandes quantidades de materiais fibrosos (PAYNE, 1989).

Segundo Andrade e Castro (2006), ocorrem duas perdas de açúcar no processo de limpeza. A primeira é a mecânica e responde por uma perda de aproximadamente 2% de todo açúcar proveniente na cana e a segunda é proveniente da lavagem da cana, em que depende dos danos causados na cana durante o carregamento e o corte chegam a perdas próximas a 1%.

A partir da matéria prima limpa inicia-se o processo de extração do caldo, onde pode ser utilizada a moenda ou o difusor (FERRI et al., 2014). Segundo Nazato et al. (2011), o difusor mostra-se mais viável à novas usinas, pelo menor preço de instalação e manutenção, além de maior eficiência na ruptura das células da cana – 94%, no entanto, para as usinas que já possuem instalação por moagem não é tão interessante. A composição dessa matéria prima da indústria açucareira obtida em uma cana sadia está representada na Tabela 2.

Tabela 2 – Componentes do caldo baseado em Andrade e Castro (2006)

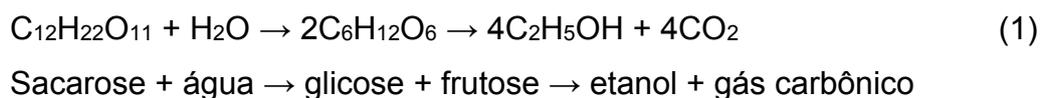
Componentes	Porcentagem (%)
Água	75,0 - 82,0
Sólidos totais dissolvidos	18,0 - 25,0
Açúcares	15,4 - 24,0
Sacarose	14,5 - 23,5
Glicose	0,2 - 1,0
Levulose	0,0 - 0,5
Não açúcares	1,0 - 2,5
Substâncias orgânicas	0,8 - 1,5
Substâncias inorgânicas	0,2 - 0,7

Fonte: Autoria Própria (2014).

Além da riqueza de compostos, o caldo após ser extraído pelo conjunto de esmagamento, possui cor variante e é um líquido turvo que contém grande quantidade de ar misturado. Para eliminação das impurezas são necessários métodos físicos, químicos e físico-químicos. Na primeira clarificação simples, o caldo caledado é aquecido e o que não evapora, é decantado e forma o xarope. O material mais grosso e disperso no caldo consiste principalmente em terra, pedaços de bagaço, ceras, gorduras, proteínas, gomas, substâncias corantes, pectinas e taninos (ANDRADE; CASTRO, 2006).

Após o clareamento o caldo é filtrado a fim de separar o lodo decantado do caldo tratado. Segundo Pellegrini (2008), o filtro mais comum utilizado para a separação é o filtro rotativo a vácuo, onde a seção do filtro é imersa no lodo fazendo com que o líquido se desloque através da tela perfurada e a torta fique contida. A torta apresenta alto grau de umidade – cerca de 70%, e elevado teor de fosfatos e matéria orgânica, tornando-se muito útil como fertilizantes.

A etapa seguinte é a fermentação do caldo filtrado, onde o mosto – caldo misturado com o mel final proveniente da produção do açúcar – é enviado às dornas de fermentação. Nessa fase ocorre por meio da ação das leveduras, o processo de fermentação onde há a transformação do açúcar em etanol e subprodutos como álcoois secundários, glicerol e aldeídos, liberando na reação grande quantidade de dióxido de carbono (FINGUERUT, 2004). A reação global da fermentação da sacarose em etanol e gás carbônico esta representada na equação 1:



Para a fermentação mais eficiente, é ideal que o caldo filtrado tenha a concentração próxima a 18% de sólidos, caso contrário torna-se necessário passar por um conjunto simples de evaporadores (RAMOS, 2010). Esse produto resultado da fermentação é conhecido por vinho levedurado.

O vinho produzido na fermentação é constituído de substâncias líquidas, sólidas e gasosas em frações variáveis devido a sua diluição e a presença de subprodutos. Para recuperar toda parcela de etanol é necessário que se processe o vinho na etapa de destilação, no qual, primeiramente, através da destilação azeotrópica se obtém o etanol hidratado e a partir da segunda destilação atinge concentrações mais altas e denomina-se etanol anidro (VENTURA, 2007).

No Brasil, o álcool hidratado é usualmente utilizado como combustíveis de veículos e por isso recebe o nome de álcool etílico hidratado carburante (AEHC), em que sua concentração é de 92,6 a 93,8 INP ou 95,1 a 96,0 graus GL. O álcool anidro por sua maior pureza é empregado como componente da gasolina, que segundo a legislação brasileira, pode variar de 20 a 25% e denomina-se álcool etílico anidro

carburante (AEAC), com concentração alcoólica entre 99,3 e 99,8 graus GL (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2002).

O principal desafio da produção de bioetanol é o custo elevado da energia necessária para a separação do etanol e água, o que atualmente na maior parte do país é realizado pelo processo de destilação fracionada complementada pela adição de solventes ou peneiras moleculares, em virtude do ponto azeotrópico. Para Carvalho (2010) a utilização de processos de desidratação como adsorção com peneiras moleculares, utiliza menos energia além de evitar a contaminação e reduzir perdas de produção do etanol.

No processo de desidratação alcoólica das indústrias brasileiras, são utilizadas peneiras moleculares ou produtos químicos como ciclohexano e monoetilenoglicol, capazes de acelerar o processo de desidratação.

4.1.2.2 Bioetanol

O Bioetanol pode ser produzido por diferentes formas denominadas de primeira, segunda e terceira geração. A forma mais comum é a partir de açúcares simples das plantas como é o caso da fermentação do caldo da cana de açúcar, onde recebe o nome de primeira geração.

O reaproveitamento da celulose contida no bagaço da cana como fonte de carboidrato constitui a tecnologia de segunda geração, em que a quebra da celulose ocorre por hidrólise enzimática – reações químicas capazes de quebrar polissacarídeos para que seja possível posteriormente a fermentação. (RAELE, 2010).

O biocombustível de segunda geração pode ser obtido a partir de qualquer matéria lignocelulósica contida na biomassa vegetal (NAIK et al., 2010). Para o autor a biomassa vegetal apresenta um dos recursos biológicos mais abundantes e subutilizados, não compete com a produção de alimentos e possui mercado promissor como fonte de matéria prima e combustível. No entanto, atualmente, este método não é muito rentável, pois há uma série de barreiras tecnológicas para a comercialização do subproduto. Corroborando essa afirmação

Raele (2010) defende a expansão da produção do etanol de segunda geração, pois ainda aumenta a eficiência energética e fortalece a competitividade nacional em bioenergia.

A fim de se produzir etanol em escalas maiores tem-se desenvolvido outro método de extração do combustível por culturas de microalgas – denominado etanol de terceira geração, onde ocorre a fermentação etanólica da biomassa das algas. Porém, devido a barreiras tecnológicas esse processo encontra-se em escala laboratorial (KLEIN, 2013).

Segundo Dragone et al. (2010), a microalga é a matéria prima ideal para se produzir etanol devido à capacidade acelerada de crescimento e de fixação de gás carbônico, gerando grande quantidade de biomassa em pequeno tempo, ou seja, possui elevado potencial de metabolizar carboidratos e lipídeos. Essas propriedades a torna adequada para a obtenção de combustíveis líquidos como biodiesel e bioetanol, além de não fornecer riscos de competitividade.

4.1.2.3 Subprodutos

A indústria sucroalcooleira possui uma característica sustentável quanto às demais por reutilizar seus subprodutos na própria cadeia da cana de açúcar. Segundo Pellegrini (2008) os subprodutos e seus respectivos reusos na agroindústria canavieira são:

1. O bagaço é considerado subproduto do sistema de moagem ao ser utilizado como fonte energética e suprir a necessidade de uso de outro combustível. Para cada tonelada de cana são gerados 140 kg de bagaço seco.
2. O mel resultante do processo de produção do açúcar, após ser centrifugado é novamente usado para produção do etanol.
3. As pontas e folhas são deixadas na área agrícola como fertilizantes orgânicos, no entanto, poderiam ser utilizadas na produção de ração animal ou ainda no sistema de cogeração como fonte energética.

4. A torta de filtro é produzida na etapa de filtração do melaço e o lodo proveniente da separação tem como característica alto índice de fosfato e material orgânico, usa-se como fertilizante ou até para a produção de ração animal. Para cada tonelada de cana de açúcar processada é gerado em média 35 kg de torta.
5. Vinhaça é derivada da fermentação e destilação do etanol e possui alto índice de potássio e DQO – Demanda Química de Oxigênio. Esse resíduo destina-se mais comumente para o campo de plantio para aproveitar seu potencial de fertilizante orgânico.
6. Cinzas da caldeira são produzidas pela queima incompleta do combustível e são utilizadas como fertilizante, pois possuem alto teor de potássio. Para cada tonelada de cana são gerados 5-6 kg de cinza.
7. Condensados são obtidos através dos vapores extraídos da etapa de aquecimento e engrossamento do caldo e normalmente são utilizados no processo de lavagem do açúcar nos filtros, nas centrifugas e na preparação de soluções para o tratamento químico.
8. Águas residuais são resultantes da limpeza dos equipamentos e por possuírem características semelhantes a do caldo, variando apenas na concentração, são utilizadas na fertirrigação.
9. Água de lavagem da cana é usada na primeira etapa para a limpeza do material agregado como terra e material vegetal e consiste em um ciclo fechado.

A vinhaça também chamada de vinhoto é um subproduto altamente gerado, segundo Salomon (2007), para cada litro de etanol se produz aproximadamente 13 litros de vinhaça. A sua alta taxa de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) faz com que sua capacidade poluente possa ser 100 vezes superior a de um esgoto doméstico. Por esse motivo, a vinhaça enquadra-se na portaria Minter nº 323, de 29 de novembro de 1978, que rege sobre Tratamento de Resíduos Água e Álcool, Energia e Combustível. Tal portaria proíbe, a partir da safra de 1979/1980, o lançamento direto ou indireto da vinhaça em qualquer corpo hídrico, seja pelas destilarias estabelecidas ou que venham a se estabelecer no país (SALOMON, 2007).

4.1.2.4 As Características Físico Químicas da Vinhaça

O constituinte principal da vinhaça é matéria orgânica na forma de ácidos orgânicos e cátions como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K), no entanto a característica química da vinhaça depende de sua origem (LYRA et al., 2003). Para o Brasil normalmente são encontrados valores semelhantes aos descritos na Tabela 3, no qual DBO corresponde a Demanda Bioquímica de Oxigênio, CE consiste em Condutividade Elétrica e SDT à Sólidos Dissolvidos Totais.

Tabela 3 – Caracterização físico-química da vinhaça *in natura*

Parâmetro	Unidade	Amostra 1	Amostra 2
DBO	mg.L ⁻¹	21.450	21.500
CE	dS.m ⁻¹	14,12	13,75
SDT	mg.L ⁻¹	7.940	7.690
pH	-	4,5	4,4
Nitrogênio (N)	mg.L ⁻¹	410	440
Fósforo (P)	mg.L ⁻¹	160	140
Potássio (K)	mg.L ⁻¹	3.100	3.000
Sódio (Na)	mg.L ⁻¹	350	300
Cálcio (Ca)	mg.L ⁻¹	640	560
Magnésio (Mg)	mg.L ⁻¹	340	280

Fonte: LYRA et al. (2003).

Destaca-se o elevado teor de potássio desse resíduo, o que impulsiona seu uso como fertilizante, apesar de características passíveis de impactos ambientais, como a acidez e o índice de demanda de oxigênio.

4.1.2.5 Utilização da Vinhaça

Com a portaria Minter nº 323, de 29 de novembro de 1978, o despejo da vinhaça no corpo hídrico foi abolido, havendo assim a necessidade de desenvolver outras técnicas de descarte. A primeira solução encontrada – em meados dos anos 80 – foi o reuso na fertirrigação, onde, além de aproveitar o potencial nutritivo do resíduo, otimizava os processos de redução de custos do manejo (PENHABEL, 2010).

Essa alternativa encontrada no processo de produção do bioetanol é um exemplo de incorporação do resíduo novamente na cadeia produtiva, apesar de questionável do ponto de vista ambiental (PIRES; FERREIRA, 2008).

A Fertirrigação trata-se do aproveitamento da vinhaça como biofertilizante. É um processo bem comum nas usinas brasileiras e em alguns casos atingem 70% da área de cultivo. Segundo Penhabel (2010) o uso da vinhaça como fertilizante traz inúmeros benefícios à produção como:

- Melhoria na qualidade físico-química do solo e conseqüente aumento da produtividade agrícola;
- Redução de custo com adubação mineral;
- Aumento atenuado da produtividade de acordo com o número de cortes;

As desvantagens desse método estão relacionadas com o risco de impacto ambiental proveniente basicamente de três características da vinhaça (PENHABEL, 2010).

- Poluente orgânico: Alta concentração de substâncias orgânicas, ou seja, presença de sólidos orgânicos suspensos com elevada Demanda química de Oxigênio (DQO);
- Poluente físico: perdas energéticas de calor pela temperatura elevada;
- Poluente químico: baixo pH que faz com que o resíduo tenha elevada capacidade corrosiva.

O estudo realizado por Hassuda et al. (1991) afirma que o impacto gerado no lençol é causado principalmente pelos cátions Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), no qual devido a grande concentração torna a água inadequada para o consumo humano.

Outro impacto alertado por Lyra et al. (2003) é a elevação na concentração de sais no solo e o potencial risco de salinização proveniente da aplicação desse fertilizante ao longo dos anos. Ainda, segundo Cortez et al. (1992), essa prática tem grandes perdas financeiras quanto ao transporte da biomassa.

Os autores afirmam que para o uso do bio-fertirrigante da cana de açúcar são necessários estudos de caracterização do solo e da concentração da vinhaça

bem como seu manejo adequado. Isso porque o resíduo apesar de apresentar alto potencial nutritivo com elevadas taxas de fósforo e nitrogênio, possibilita o carreamento desses nutrientes e compromete o corpo hídrico, além de possuir pH muito baixo e portanto, necessitar de tratamento a fim de não prejudicar a produtividade do solo.

Por essas desvantagens tem-se iniciado estudos a fim de avaliar o real potencial poluidor da vinhaça ao longo dos anos, levando-se em consideração a concentração de sais no solo, a relação entre a taxa de absorção do potássio pela planta e a concentração desse e demais compostos da vinhaça, os indicativos de lixiviação e a percolação do resíduo no lençol freático (LYRA et al., 2003).

Atualmente, novas técnicas de manejo desse resíduo vêm sendo estudadas e aperfeiçoadas. Corazza (2001) identificou quatro grupos de opções tecnológicas para destinação da vinhaça: evaporação, fermentação aeróbia, digestão anaeróbia e outros usos (fertirrigação e reciclagem na fermentação alcoólica), conforme pode ser observado na Figura 7.

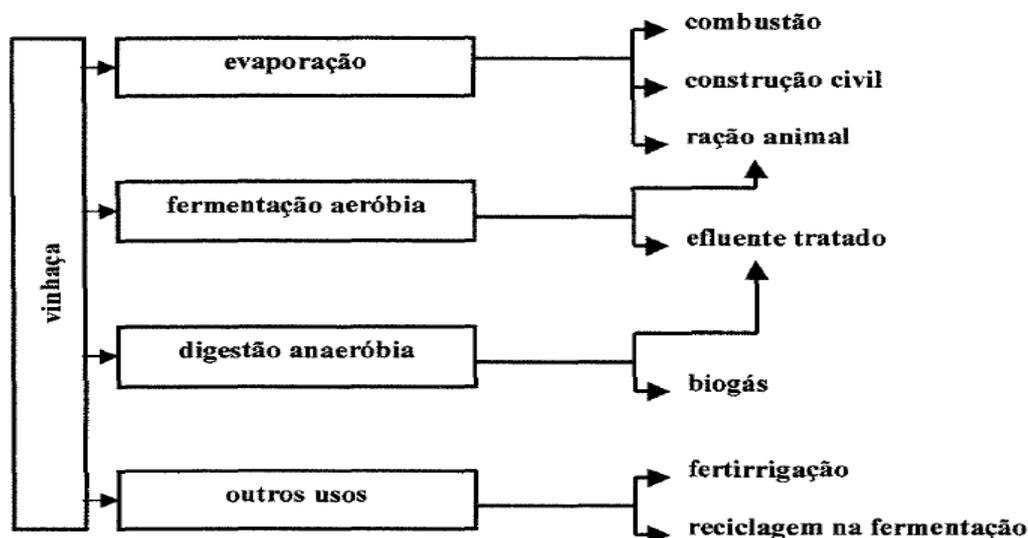


Figura 7 – Opções tecnológicas de destinação da vinhaça
Fonte: Corazza (2001).

Seguem algumas considerações de cada tópico ilustrado na Figura 7:

Evaporação da vinhaça: trata-se de um processo físico de redução do volume e concentração da vinhaça, que potencializa a capacidade energética, possibilitando que a vinhaça seja utilizada como combustível na caldeira (PELLEGRINI, 2008). Esse processo torna-se interessante pelo uso completo do

material, seja na transformação em energia ou na recuperação do potássio nas cinzas utilizadas como fertilizantes, além da possibilidade e facilidade de se produzir ração animal (CORTEZ et al., 1992).

Transformação da vinhaça: os processos de fermentação e de digestão anaeróbia são processos que exigem a transformação química do material. No entanto, a fermentação reduz a quantidade de vinhaça a fim de produzir proteínas unicelulares através de microrganismos (VITTI, 2005). Segundo Cortez et al. (1992), apesar de se produzir alimento e não gerar resíduo é um processo caro e que exige mais estudos. Já na digestão anaeróbia: ocorre a produção de biogás e, portanto, ganho na eficiência energética (PELLEGRINI, 2008). A degradação da matéria orgânica por meio da atividade microbiana na ausência de oxigênio além de produzir gases como metano e dióxido de carbono – mostrados na reação da degradação anaeróbia (Equação 2), gera, no caso da vinhaça, um resíduo de melhor qualidade para ser lançado novamente na cultura (GRANATO, 2003).



Corroborando essa afirmação, Cortez et al. (1998) realizaram um estudo na Usina de São Martinho, localizada na cidade de Pradópolis – SP, considerada a maior processadora de cana do mundo, na qual foram feitas análises como pH, DQO e potássio antes e depois da biodigestão. Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 4:

Tabela 4 – Características físico-químicas da vinhaça – Usina São Martinho

Parâmetro	Vinhaça (Antes da biodigestão)	Vinhaça (depois da biodigestão)
pH	4,0	6,9
DQO (mg/l)	29.000	9.000
Nitrogênio total (mg/l)	550	600
Nitrogênio Amon. (mg/l)	40	220
Fósforo P ₂ O ₅ (mg/l)	17	32
Sulfato (mg/l)	450	32
Potássio K ₂ O (mg/l)	1.400	1.400

Fonte: Cortez et al. (1998) apud Salomon (2007).

Observa-se que o processamento da vinhaça pelo biodigestor anaeróbio a torna mais adequada para o uso direto no solo, principalmente por reduzir a DQO e elevar o pH até ficar neutro.

Além desse motivo a biodigestão anaeróbia da vinhaça apresenta-se como uma alternativa diante do ciclo de vida da cana, pois o biogás produzido possui alto poder calorífico o que o torna atrativo como fonte de energia. Segundo Pompermayer e de Paula Junior (2003), o poder calorífico relaciona-se com a umidade do gás e o teor de metano, que por sua vez, pode ser estimado de acordo com a carga de matéria orgânica do resíduo. No caso da vinhaça é encontrada a média de 60% de metano (CH₄) no biogás final, o que torna a produção desse combustível viável quando comparado a outros energéticos como mostra a Tabela 5:

Tabela 5 – Equivalência Energética entre um m³ de Biogás e outros Energéticos

ENERGÉTICO	NOGUEIRA (1986)	MOTTA (1986)	FERRAZ&MARRIEL (1980)
Gasolina (L)	0,61	0,7	0,61
Querosene (L)	0,62	-	0,58
Óleo Diesel (L)	0,55	-	0,55
GLP (Kg)	1,43	0,40	0,45
Álcool (L)	0,80	-	-
Carvão Mineral (Kg)	0,74	-	-
Lenha (Kg)	3,50	-	-
Eletricidade (KWh)	-	1,25	1,43

Fonte: Pompermayer e de Paula Junior (2003).

Se tratando do potencial energético, Cortez et al. (1992) afirmam que da energia total disponível em uma tonelada de cana, o bagaço representa 560.000 Kcal – considerando 250 Kg de bagaço úmido, os 70 litros obtidos de etanol correspondem a 392.000 Kcal e o biogás com 65% de metano produz 60.000 Kcal. Ou seja, há mais energia na cana de açúcar e seus subprodutos do que no etanol isoladamente.

Atualmente novas técnicas estão sendo desenvolvidas e estudadas quanto ao reuso da vinhaça como fornecedor de nutrientes para outros sistemas. Segundo Machado Junior et al. (2013), a vinhaça usada em baixa concentração potencializa o cultivo de microalgas, que conservam em sua estrutura grande

quantidade de lipídio e de carboidrato. Isso possibilita a geração de combustíveis líquidos, bioplásticos e intermediários químicos do setor petroquímico.

A utilização de microalgas como matéria prima é aceita como a solução mais eco-compatível, tornando-se necessária a utilização de resíduos domésticos ou industriais como fonte nutritiva para redução dos custos (MARQUES, 2012).

De acordo com a fonte de carbono envolvida, classificam-se os cultivos de microalgas como heterotrófico – que utiliza compostos orgânicos; mixotrófico – que utiliza compostos orgânicos e CO₂ atmosférico; e autotrófico – utiliza CO₂ inorgânico como fonte única. Dentre esses, o cultivo mais usado é o autotrófico, principalmente se tratando de larga escala (VIEIRA, 2013).

Os biocombustíveis de segunda e terceira geração estão desenvolvendo um novo mercado em que o investimento estimado para 2050 é em torno de US\$ 500 bilhões. Quando comparado entre eles o sistema de terceira geração não necessita de recursos tecnológicos avançados como o de segunda, o que o torna mais alcançável em curto prazo (MARQUES, 2012).

Para Marques (2012), a utilização dessa técnica em grande escala ainda é limitada pelo custo de produção e disponibilidade da água.

4.1.2.5.1 Biodigestão

Biodigestor é um sistema de tratamento baseado na degradação anaeróbia responsável pela conversão da matéria orgânica em biogás. Comumente é empregado em efluentes orgânicos a fim de se obter a valorização do biocomposto como fertilizantes e adubos para as lavouras (HENN, 2005).

Segundo Lamonica (2006), para a produção nacional de álcool no ano de 2004 o potencial de produção de energia elétrica a partir do biogás obtido na biodigestão da vinhaça comporta-se na faixa de 2,6 TWh/ano, o que equivale a 75% do consumo nacional de energia elétrica referente ao ano de 2003. No entanto, o autor afirma que o preço para a produção de e energia elétrica através dessa fonte ainda é elevado, com valores próximos a R\$ 324/MWh, o que representa a o quanto esse mercado necessita se desenvolver.

A principal barreira técnica nos sistemas de digestão conduzidos em reatores convencionais está no elevado tempo de retenção hidráulica do resíduo, tornando o processo mais lento (vários dias ou mesmo semanas) e por isso menos atrativo economicamente (GRANATO, 2003).

Segundo o Granato (2003), a tecnologia recente utilizada no mundo inteiro e que mais se adapta ao processo de biodigestão anaeróbia da vinhaça é o reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA), também chamado de reatores UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, que é composto por um tanque que contém o digestor localizado na sustentação e na extremidade e o decantador seguido do sistema de separação de gases como mostrado na Figura 8.

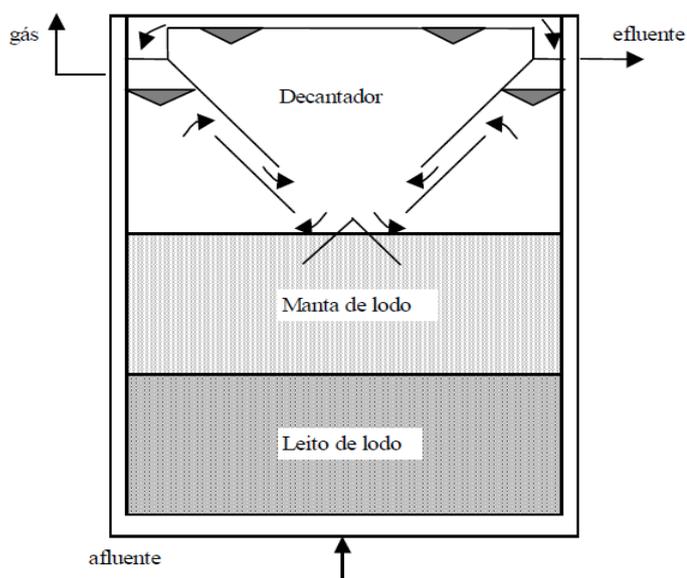


Figura 8 – Representação de um reator de fluxo ascendente
Fonte: Pinto (1999).

4.1.2.5.2 Princípio de Funcionamento

A composição básica do biodigestor é a câmara de fermentação, a campânula responsável por armazenar o gás produzido e controlar sua saída, a entrada do substrato a ser fermentado e a saída de efluente gerado no processo. No sistema UASB o efluente é bombeado lentamente de baixo para cima em condições restritas de oxigênio para que permita a formação de conglomerados de

microrganismos anaeróbios denominados grânulos. Essa quantidade de bactérias tem a função de agir como biocatalíticos que convertem de maneira rápida e completa a matéria orgânica em biogás (PINTO, 1999).

Segundo Pinto (1999), a formação satisfatória dos grânulos e o contato entre o resíduo e o lodo estão relacionados ao grau de sucesso do reator, pois garantem a eficiência da conversão da matéria degradável em biogás por reter a biomassa ativa no processo independentemente da velocidade do fluxo.

Para Granato (2003), para se obter um digestor com alta eficiência e produtividade deve-se levar em conta o saneamento, o atendimento da demanda energética e a utilização do composto biodegradado final como fertilizante, o que observa-se na aplicação da vinhaça como biomassa de entrada.

4.1.2.5.3 Biogás

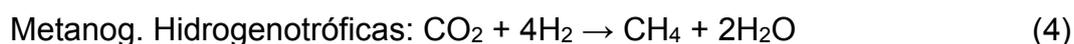
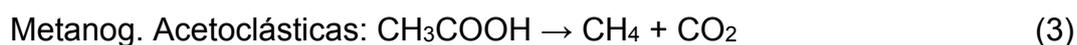
Para a produção de biogás é necessário que a matéria orgânica seja decomposta sem a presença de oxigênio de forma que passe pelas quatro fases da biodigestão anaeróbia, sendo elas: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese (CHERNICHARO, 2000). Segundo o autor essas fases consistem em:

1. Hidrólise: ocorre o surgimento de novos compostos a partir da troca de componentes realizada pela água, onde o conjunto de bactérias denominadas fermentativas é responsável pela bioquímica do processo.
2. Acidogênese: relacionada com a ação das bactérias fermentativas acidogênicas no metabolismo de monômeros resultantes da hidrólise em compostos menores como álcoois, ácidos graxos voláteis, ácido láctico, gás carbônico, amônia, hidrogênio.
3. Acetogênese: conversão dos compostos mais simples em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio, obtendo papel essencial na geração dos gases, pois à depender do tamanho da população das bactérias o hidrogênio pode ser produzido em excesso, tornando o meio ácido. As condições

ideais para essa etapa são temperaturas na faixa de 29 °C e 45 °C e pH entre 5,2 e 6,5.

4. Metanogênese: fase na qual os substratos anteriores são metabolizados em metano por dois grupos principais de bactérias denominadas acetoclásticas, que metabolizam o acetato, e hidrogenotróficas, que utilizam o hidrogênio para reduzir o dióxido de carbono. As condições ideais para essa etapa consistem em temperaturas entre 22 °C e 37 °C e pH na faixa de 6,8 a 7,2.

As respectivas reações oriundas da produção de metano estão representadas pelas equações (3) e (4):



A qualidade do biogás está intimamente ligada com a quantidade de metano produzido na fase metanogênica, sendo que, quanto maior a carga orgânica, melhor será a caracterização do gás desejado. A Tabela 6 representa a constituição do gás para diferentes fontes orgânicas.

Tabela 6 – Composição média do biogás para diferentes resíduos orgânicos

GÁS	PORCENTAGEM (%)
Metano (CH ₄)	40 – 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 – 40
Nitrogênio (N)	0,5 – 2,5
Oxigênio (O)	0,1 – 1
Ácido Sulfídrico (H ₂ S)	0,1 – 0,5
Amoníaco (NH ₃)	0,1 – 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 – 0,1
Hidrogênio (H)	1 – 3

Fonte: Salomon (2007).

Segundo Granato (2002), a biodigestão da vinhaça produz cerca de 55-65% de metano na composição final do biogás, o que garante a viabilidade teórica

de se produzir biogás usando essa matéria prima. A relação entre o metabolismo do metano e a carga orgânica total é de 0,30 litros de CH₄/gDQO consumida.

O biogás pode ser empregado em aplicações termodinâmicas como geração de frio, calor e potência. Seu uso pode ser direto em equipamentos estacionários como fogões, lampiões e conjuntos geradores ou ainda indireto em motores estacionários, mas, para essa aplicação, é indicado que passe por uma depuração dos contaminantes oriundos da produção (PINTO, 1999). Os equipamentos mais utilizados indicados por Granato (2002) são bombas, filtros, compressores e resfriadores.

Diante do contexto descrito, que considera a produção da vinhaça como subproduto da produção do etanol e a sua utilização na fertirrigação com ganhos e perdas para o solo, pretende-se verificar a viabilidade de construir e utilizar um biodigestor anaeróbio na produção de biogás – analisando quali-quantitativamente o biogás gerado no processo, e identificar os ganhos que esse processo pode oferecer ao meio ambiente. A seguir será descrito o procedimento para se alcançar tal objetivo.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em 5 etapas conforme descrito pela Figura 9.



Figura 9 - Fluxograma da ordem metodológica seguida
Fonte: Autoria própria (2015).

5.1 Etapa 1: Inspeção Nos Reatores Anaeróbios, Testes e Correções

Na primeira etapa, denominada 'Inspeção nos reatores anaeróbios, testes e correções' foram verificados os reatores e gasômetros disponíveis para pesquisa, levantando-se a quantidade de reatores e sua correta numeração. Para avaliar seu estado de conservação e realizar as intervenções necessárias no

equipamento foi feita a simulação de seu funcionamento no sistema. A simulação foi realizada com os tubos preenchidos com ar e a partir do resultado iniciou-se o processo de vedação e conserto dos reatores a fim de garantir a confiabilidade do experimento.

A figura 10 mostra um biodigestor em sistema de batelada, com os tubos de 100 mm de diâmetro para o reator e 75 mm para os gasômetros, no qual os volumes respectivos são de 2,75 e 2,21 litros. As mangueiras e os conectores de engate rápido são responsáveis por transportar o gás em alta pressão para o gasômetro e a quantidade de biogás produzida é medida pelo deslocamento vertical da cúpula do gasômetro.

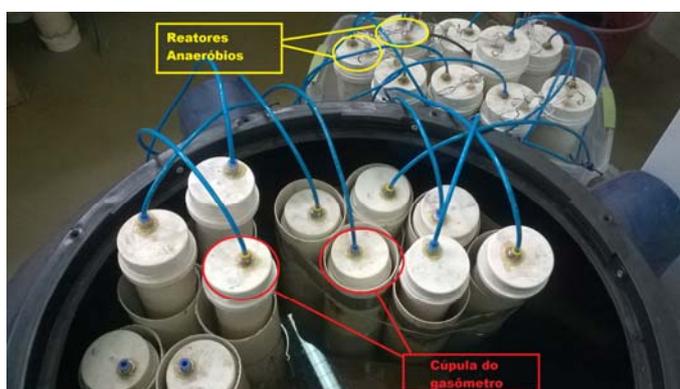


Figura 10 – Reatores em sistema de batelada
Fonte: Autoria própria (2015).

5.2 Etapa 2: Coleta De Materiais

Para a coleta do material a ser analisado foi estabelecido contato com a indústria sucroalcooleira Usina Alto Alegre (UAA) localizada na cidade de Florestópolis, a 83 quilômetros de Londrina, no norte do Paraná, de onde se retirou a vinhaça utilizada na pesquisa. Nesse processo foram empregadas bombonas, baldes e funil para transportar 20 litros de vinhaça, 2 kg de torta de filtro e aproximadamente 5 litros de lodo do fundo das lagoas. O cálculo da quantidade necessária foi baseado em Orlando Filho, Macedo e Tokeshi (1994) que afirma que em uma tonelada de cana se obtém 35 kg de torta de filtro e de 700 a 900 litros de vinhaça, como foi adotando o valor de 700 litros, a proporção é de 20 litros para 1 kg.

5.3 Etapa 3: Inoculação No Reator

Nesta etapa iniciaram-se as reações e o processo de produção de biogás. Os reatores foram divididos em 4 concentrações diferentes da torta de filtro, sendo elas: (1) somente vinhaça (branco), (2) vinhaça mais a adição de 50g de torta, (3) vinhaça mais a adição de 70g de torta e (4) vinhaça mais a adição de 90g de torta. Cada processo desse foi realizado em duplicata e em todos os reatores foi acrescentado 200 mL de lodo a fim de acelerar a reação.

Para controlar a acidez da solução foi adicionado inicialmente 25 mL de hidróxido de sódio (NaOH) em concentração 6 molar e 60 mL de bicarbonato de sódio. A utilização de hidróxido de sódio deveu-se à insuficiência de volume livre no reator para utilização de bicarbonato apenas. Para realizar o controle do pH foram coletadas amostras de um reator mantido ativo ao longo de todo o experimento.

Na tabela 7, abaixo, apresenta-se o volume inicial de cada amostra:

Tabela 7 – Volume Inicial das Amostras

REATORES	VOLUME INICIAL
1 e 2	1,6 L de vinhaça + 0,2 L de lodo + 0,085 L de alcalinizante
3 e 4	1,6 L de vinhaça + 0,2 L de lodo + 50 g de torta + 0,085 L de alcalinizante
6 e 7	1,6 L de vinhaça + 0,2 L de lodo + 70 g de torta + 0,085 L de alcalinizante
10 e 11	1,6 L de vinhaça + 0,2 L de lodo + 90 g de torta + 0,085 L de alcalinizante

Fonte: A autoria própria (2015).

5.4 Etapa 4: Análises

Na quarta etapa o resultado de pH e sólidos totais, sólidos voláteis e condutividade elétrica para a vinhaça e o lodo, descritos foram analisados. Além disso foi realizada análise quantitativa do biogás gerado no sistema.

Os equipamentos utilizados para as análises foram:

- pHmetro – ION, modelo pHB 500;
- Condutímetro elétrico – modelo mCA 150;

- Balança analítica – SHIMADZU, modelo AW 220;
- Estufa – SOLAB, modelo SL 100;
- Forno Mufla – modelo MA-385;
- Sensor de temperatura e umidade – modelo HOBO U23.

5.4.1 pH

Para análise do pH, como indicado por Standard (2012), foi realizada a calibração do equipamento conforme as orientações do fabricante e verificada a precisão da leitura com o dispositivo de correção de temperatura.

O pH foi analisado no início do tratamento biológico e seguiu os critérios indicados no método para resíduos líquidos 4500-H+ B de Standard (2012) para a vinhaça e o lodo.

5.4.2 Condutividade elétrica

A análise da condutividade elétrica foi realizada por leitura direta com condutímetro, sendo realizada a calibração do equipamento e seguindo a mesma metodologia para a leitura do pH descritas no item 5.6.1.

5.4.3 Sólidos Totais

Para a análise de sólidos totais, como descreve Standard (2012) 2540 B, foi utilizada a estufa entre 103-105 °C para evaporar a água da amostra. No caso da torta do filtro, por se classificar como resíduo sólido, necessitou passar pelo processo de secagem na estufa sob temperatura de 65°C devido a presença de compostos voláteis.

Para todas as amostras foram adotadas o tempo de 48 horas de permanência em estufa para secagem e calculado o teor de sólidos totais a partir da equação 5.

$$ST(\text{mg.L}^{-1}) = [(A-B) \times 1000] / \text{volume da amostra (mL)} \quad (5)$$

Onde: ST (Sólidos Totais);

A (peso do resíduo seco + recipiente em mg);

B (peso do recipiente em mg).

5.4.4 Sólidos fixos e voláteis

Para determinar os sólidos voláteis, como afirma Standard (2012) no procedimento 2540 E, utilizou-se a mufla em 550°C por uma hora a fim de volatilizar principalmente os compostos a base de carbono. Após a calcinação na mufla, o residual de massa de cinzas aferido na balança de precisão é denominado sólidos fixos, e pode ser representado na equação 6.

$$SF(\text{mg.L}^{-1}) = [(A-B) \times 1000] / \text{volume da amostra (mL)} \quad (6)$$

Onde: SF (Sólidos Fixos);

A (peso do recipiente + cinzas em mg);

B (peso do recipiente em mg).

O peso aferido da amostra subtraído pelo peso obtido após a calcinação em 550°C são os sólidos que foram volatilizados. Observa-se na equação 7 o teor de sólidos voláteis.

$$SV(\text{mg.L}^{-1}) = [(A-B) \times 1000] / \text{volume da amostra (mL)} \quad (7)$$

Onde: SV (Sólidos Voláteis);

A (peso do resíduo seco + amostra em mg);

B (peso do recipiente + cinzas em mg).

5.5 Etapa 5: Dimensionamento Do Biodigestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente

A quinta etapa 'dimensionamento do biodigestor anaeróbio de fluxo ascendente' foi realizada conforme a metodologia adaptada de Chernicharo (2007), na qual as equações de 8 a 15 representam os cálculos de dimensionamento de um reator UASB em escala real para o tratamento de vinhaça.

- a. A estimativa da carga diária a partir da concentração de DBO ou DQO no afluente em relação à vazão média são obtidas através da equação 8:

$$C_{diária} = Q_{média} * C \quad (8)$$

Onde: $C_{diária}$ (concentração diária de DBO ou DQO no afluente (Kg/dia));
 $Q_{média}$ (taxa de aplicação volumétrica (m³/dia));
 C (concentração de DBO ou DQO (Kg/m³)).

- b. O tempo de detenção hidráulica (TDH) varia conforme a temperatura do ambiente, sendo mais utilizado para efluentes domésticos na faixa de 8 a 10 horas. Considerando uma temperatura média anual em torno de 23°C o TDH recomendado para efluentes domésticos é de 8 horas. No caso da vinhaça, foi baseada no trabalho de Pompermayer e de Paula Junior et al (2003) que utilizou o TDH médio de 10,8 horas. Consequentemente, o volume é calculado em função do tempo de detenção hidráulica do sistema como observa-se na equação 9:

$$V = TDH * Q_{média} \quad (9)$$

Onde: V (volume total do reator (m³));
 TDH (tempo de detenção hidráulico (h));
 $Q_{média}$ (taxa de aplicação volumétrica (m³/h)).

- c. A carga hidráulica volumétrica (CHV) é o volume de resíduo aplicado diariamente ao reator, representada pela equação 10:

$$CHV=Q_{média} \cdot V^{-1} \quad (10)$$

Onde: CHV (carga hidráulica volumétrica ($m^3/m^3 \cdot d$));

$Q_{média}$ (vazão média afluyente (m^3/dia));

V (volume total do reator (m^3)).

- d. A carga orgânica volumétrica (COV) é a quantidade de massa de matéria orgânica aplicada diariamente ao reator, explicitada pela equação 11:

$$COV=Q_{média} \cdot S_o \cdot V \quad (11)$$

Onde: COV (carga orgânica volumétrica ($KgDQO/m^3 \cdot d^{-1}$));

$Q_{média}$ (vazão média afluyente (m^3/dia));

V (volume total do reator (m^3));

S_o (concentração de substrato afluyente ($KgDQO/m^3$));

- e. A velocidade de escoamento adotada foi o valor médio de 0,6 m/h, pois segundo Chernicharo (2007), ela pode variar de 0,5 m/h a 0,7 m/h. A partir da velocidade foi calculada a altura do reator UASB como mostra a equação 12:

$$H=v \cdot TDH \quad (12)$$

Onde: H (altura útil (m));

v (velocidade (m/h));

TDH (tempo de detenção hidráulico (horas)).

- f. Da mesma forma, calculou-se a área total do reator cilíndrico, de acordo com a equação 13:

$$A=V*H^{-1} \quad (13)$$

Onde: A (área útil do reator (m²));

H (altura útil (m));

V (volume útil (m³)).

g. O diâmetro do reator foi obtido em função da área pela equação 14:

$$A=(\pi*d^2)/4 \quad (14)$$

Onde: A (área útil do reator (m²));

d (diâmetro do reator (m));

π (3,14).

h. Para garantir o contato efetivo da biomassa do reator com o resíduo tornou-se necessário distribuir o afluyente de forma correta. Assim, o número adequado de distribuidores dependeu da área da seção transversal do reator e da área de influência adotada para cada distribuidor, calculado pela equação 15:

$$Nd=At*Ad^{-1} \quad (15)$$

Onde: Nd (número de dutos (unidade));

At (área da seção transversal do reator (m²));

Ad (área de influência de cada distribuidor (m²)).

O lodo proveniente do processo de extração do bioetanol foi classificado como denso e floculento, no caso de reatores anaeróbios termofílicos, Ahring et al. (1991) estima a aplicação de vinhaça para cargas orgânicas acima de 30 KgDQO/m³.d⁻¹, para tal a área de influência de cada distribuidor varia de 2 a 3 m², adotando-se a área de 2 m².

6 RESULTADOS

Os resultados obtidos nessa pesquisa avaliam as características dos subprodutos de uma usina sucroalcooleira e auxiliam na análise energética quanto a produção de biogás como resultado final do processo de degradação anaeróbia. A apresentação dos resultados está dividida em análises físico-químicas, produção de biogás e dimensionamento do UASB.

6.1 Análises Físico-químicas

Antes iniciar o processo de degradação anaeróbia foram realizadas análises de sólidos totais e voláteis na vinhaça *in natura*, torta de filtro e no lodo. Os resultados estão descritos na tabela 8.

Tabela 8 – Análises Físico-químicas

Parâmetro	Unidade	Quantidade		
		Vinhaça	Lodo	Torta
Sólidos totais	mg/L	28565,71	184887,81	0,4053
Sólidos voláteis	mg/L	17525,71	50024,39	55,38 (%)
SV/ST	%	61,35	27,06	---
pH		4,19	4,4	---
Condutividade	mS/cm	12,18	9,87	---

Fonte: Aatoria própria (2015).

Como é possível constatar, a condutividade encontrada para a vinhaça foi de 12,8 mS/cm, enquanto para o lodo de 9,87 mS/cm. Segundo Zolin et al (2011) e Vasconcelos et al (2013) a condutividade elétrica da vinhaça é bastante elevada, encontrando valores como 31 e 36 mS/cm.

Para o parâmetro pH as análises apontaram valores abaixo de 4,5 para a vinhaça e para o lodo. Nos estudos realizados pelos autores Nelson e Sommers (1996) e Prata et al. (2000) foram encontrados resultados semelhantes para o pH da vinhaça com valores aproximados de 4,3. Desta forma, existe a necessidade de

correção do pH para que possa ocorrer o processo de produção de biogás a partir de reações bioquímicas anaeróbias.

Segundo Zilotti (2012), o pH influencia diretamente a ação dos microorganismos metanogênicos e deve ser mantido entre 6,5 e 7,5 para a degradação ser eficiente. Para controlar esse parâmetro foi adicionado na fase de inoculação 2g de bicarbonato de sódio (NaHCO_3) diluído em 50 ml de água destilada em cada reator, iniciando o experimento com pH 6,6. Posteriormente, na primeira semana foi acrescentado 4g de NaHCO_3 diluído em 70 ml de água destilada, alterando o pH de 6,1 para 6,5. Já na segunda semana utilizou-se 70 ml de hidróxido de sódio (NaOH) na concentração de 1 molar para alcançar o pH de 6,6.

A variação na concentração de sólidos voláteis influencia diretamente a produção de biogás. Segundo Comastri Filho (1981), quanto maior for a concentração de sólidos voláteis de uma biomassa, maior será a produção de biogás. De acordo com o autor, a proporção mínima necessária é de 120 g de sólidos voláteis por quilo de matéria seca, ou seja, 12% de sólidos voláteis.

Observa-se que o teor encontrado de sólidos totais na vinhaça da usina Alto Alegre foi de 28,56 g/l e a porcentagem de sólidos voláteis de 61,35%. Segundo a relação 0,247 litros de biogás por dia a partir da quantidade de sólidos voláteis encontrada por Morell et al (2014), o experimento poderia produzir 1,173 litros acima do resultado obtido. Esse excedente de biogás seria devido à reação de degradação não ter consumido o teor total de matéria orgânica dos reatores, apresentando a relação de 0,178 litros de biogás.

Na pesquisa desenvolvida por Viana (2004), as análises de vinhaça apresentam características semelhantes com 63,7% de sólidos voláteis e concentração de 35,4 g/l de sólidos totais, removendo 80% da DQO inicial. Salomon e Lora (2009) encontraram outros valores como 84% de sólidos voláteis e a concentração de 23,7 g/l de sólidos totais, produzindo 75% de metano no biogás e remoção de 82% da DQO inicial.

Nota-se que a composição da vinhaça varia para cada estudo. De acordo com Cabello (2009) a composição da vinhaça pode variar devido ao tipo de solo, aos nutrientes disponíveis, ao método de colheita e ao processo de produção.

6.2 Produção de biogás

A medição do volume de biogás foi realizada durante 17 dias e iniciou-se após o período de inoculação das bactérias na forma de Lodo em sistemas de reatores com vinhaça e torta de filtro. A preparação dos reatores e a inoculação foi realizada entre os dias 10 a 12 de outubro.

Diferentes concentrações de subprodutos sucroalcooleiros foram analisadas em duplicatas, divididas em vinhaça (branco), vinhaça com a adição de 50g de torta (concentração 1), vinhaça com a adição de 70g de torta (concentração 2) e vinhaça com a adição de 90g de torta (concentração 3). A figura 11 representa o comportamento do reator para a vinhaça pura.



Figura 11 – Produção Acumulada de Biogás
Fonte: Autoria própria (2015).

Observa-se o comportamento acelerado da produção de biogás na primeira semana, entre os dias 12 a 19, atingindo respectivamente 2,09 e 2,54 litros para os reatores 1 e 2. A diferença acentuada entre os reatores 3 e 4 ocorreu por vazamentos no reator 3 durante o processo de biodigestão.

Para a vinhaça pura e a concentração 1 de torta nota-se que durante os dias 19 a 26 não houve produção de biogás, enquanto a concentração 2 apresentou o mesmo comportamento entre os dias 19 a 23. A obtenção desse resultado pode ter sido influenciada pela alteração dos fatores climáticos durante esse período e pelo desligamento do aquecedor.

Outro fator que pode ter relação com a falta de produção de biogás foi a adição de alcalinizantes nos dias 16 e 21 em todos os reatores a fim de elevar o pH, pois segundo Rizk (2009), a vinhaça que tem seu pH corrigido por hidróxido de sódio e bicarbonato de sódio torna-se mais frágil para a produção de biogás, uma vez que os microrganismos presentes na vinhaça e no lodo podem ser afetados pelo elemento sódio, tornando o meio tóxico. No dia 16 aplicou-se 4g de bicarbonato de sódio (NaHCO_3) e no dia 21 foi utilizado 70 ml de hidróxido de sódio (NaOH) em cada reator.

A média dos reatores de mesma concentração está representada no gráfico 1:

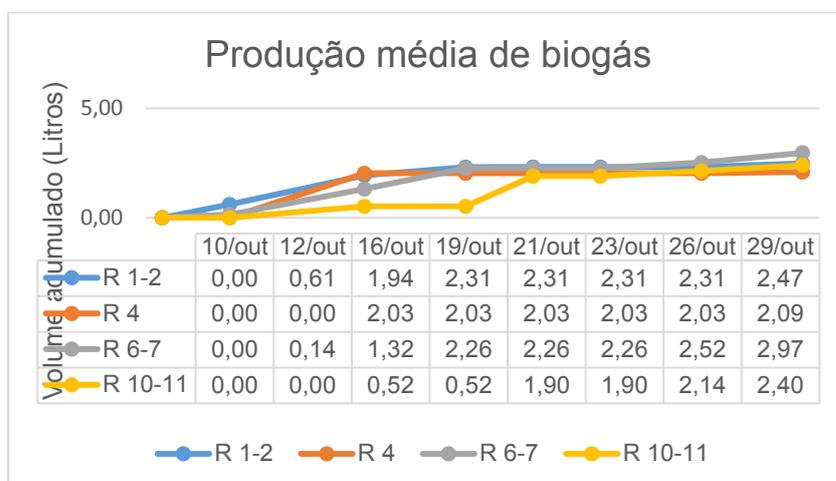


Gráfico 1 – Produção média de biogás
 Fonte: Autoria própria, 2015.

A maior produção média de biogás foi encontrada nos reatores 6 e 7. O reator 7 gerou 4,63 litros em 17 dias. Desta forma, para calcular o potencial de biogás produzido na Usina durante um dia foi utilizada a maior média dos reatores, com valor analítico de 2,97 litros a partir de 1,6 litros de vinhaça. Observa-se na tabela 9 a produção diária de biogás da Usina Alto Alegre, segundo dados em escala laboratorial.

Tabela 9 – Produção experimental de biogás da Usina

PARÂMETRO	QUANTIDADE	UNIDADE
Vinhaça	7370,863	m ³ /d
Reator 6-7	1,85625	l (biogás) / l (vinhaça) em 17 dias
Biogás	804,83316	m ³ /d

Fonte: Autoria própria (2015).

A partir da quantidade de biogás produzida diariamente calculou-se a taxa de energia, considerando a média de 60% de metano. Segundo Nogueira (1986), o poder calorífico do biogás depende da fração de metano e para 60% de metano se obtém 5500 Kcal.m⁻³. Utilizando essa proporção, foi estimado o valor energético de 214,47 KWh.h⁻¹.

Para a análise teórica, Pompermayer e de Paula Junior (2003) calcularam a relação de etanol/biogás a partir de 1 m³ de etanol, a partir do qual é possível produzir 185 m³ de biogás com média de 60% de metano. Na tabela 10 observa-se o potencial teórico de produção de energia a partir do biogás.

Tabela 10 – Produção teórica de energia da Usina

PARÂMETRO	QUANTIDADE	UNIDADE
Etanol	566,9894	m ³ /d
Biogás	104893,0447	m ³ /d
Energia	24037,9894	KWh/h

Fonte: Autoria própria (2015).

Nos dados fornecidos por Lamonica (2006), a empresa Brasmetano (2005) propôs o sistema de biodigestão anaeróbica de fluxo ascendente e a partir desse sistema encontrou a produção de biogás equivalente a 27000 m³/d sobre uma produção de etanol de 250 m³/d. Considerando esses dados, obtém-se a relação de 108 m³ de metano por m³ de etanol produzido no final do processo. Tendo por base essa relação entre a produção de biogás e etanol, a quantidade de biogás gerado diariamente na Usina Alto Alegre seria de 61234,86 m³/d e a energia produzida corresponde de 14032,987 KWh/h.

No estudo realizado por Rego e Hernandez (2006), a média anual de obtenção de energia a partir do biogás produzido pela biodigestão anaeróbica da vinhaça é de 3005 KWh/h. No entanto os autores consideraram a operação prevista no ano de 3960 horas. Esse dado difere dos dados apresentados anteriormente, pois os outros cálculos de produção de energia foram realizados para trabalhar com 8760 horas ao ano. Assim, caso a usina estudada por Rego e Hernandez (2006)

trabalhasse com a média anual de 8760 horas a produção de energia seria 1358,4247 KWh/h.

Outra análise da produção de biogás desenvolvida por Morell et al. (2014), aponta valores mais próximos aos encontrados na presente pesquisa. Os autores trabalharam em escala laboratorial e encontraram o valor de 1456,62 m³/d a partir da relação 1,38 litros obtidos de biogás por litros de vinhaça em um intervalo de tempo de 7 dias.

A partir dos resultados dos estudos descritos, observa-se a dificuldade de se produzir uma estimativa eficiente para produção de biogás e de se padronizar a operação e as condições desse sistema, o que gera diferentes dados. Tendo como referência as proporções apresentadas nessas pesquisas foi possível verificar que a variação de energia térmica foi de 24037,99 KWh/h para 14032,987, 1358,42, 333,809 e 214,47KWh/h para a mesma destilaria.

Segundo EPE (2007), as residências brasileiras consomem em média 144 KWh/mês de eletricidade o que corresponde a 0,2 kWh/h. Considerando os resultados obtidos nas pesquisas citadas acima e as microturbinas como a transformação eficiente de energia térmica em elétrica – adotando 0,3, segundo Corrêa Neto (2001) e Lora e Salomon (2004) – a quantidade de casas abastecidas pela energia obtida através do biogás seriam respectivamente 36057, 21050, 2038, 501 e 322, como ilustrado no gráfico 2:

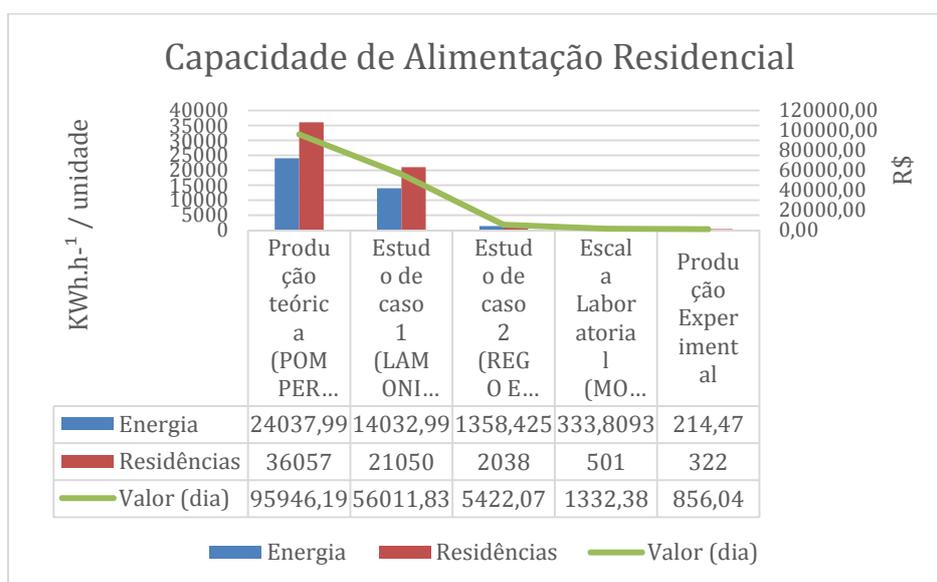


Gráfico 2 – Capacidade de Alimentação Residencial

Fonte: Autoria própria.

Dentre os fatores que devem ser considerados para essa análise de eficiência é necessário considerar a qualidade da vinhaça, a dimensão do reator, a temperatura interna do reator e o pH da reação. No caso da presente pesquisa, as principais variáveis que influenciaram os resultados obtidos foram:

1. Reposição do alcalinizante: Primeiramente por manter o pH sempre próximo de 6,5, posto que a faixa do pH de maior eficiência para reações químicas está entre 6,5 e 7,5 (ZILOTTI, 2012). Além disso, para realizar essa reposição ocorreu a abertura do feixe de silicone, que aumentou o risco de gerar vazamentos no sistema por falha na vedação.
2. Parada de funcionamento do aquecedor: O termômetro e aquecedor dos reatores estava ligado a um temporizador que acionava a energia da rede durante somente 4 horas por dia, influenciando o controle de temperatura.
3. Ausência de agitação: A agitação evita a formação de fases por longo período de tempo no reator e promove a homogeneização dos produtos, garantindo o melhor funcionamento do sistema devido as reações químicas ocorrerem de forma mais completa. Devido a ausência de agitadores nos reatores utilizados para o experimento, esse procedimento não foi realizado.
4. Escolha do alcalinizante: Foram utilizados na pesquisa hidróxido de sódio e bicarbonato de sódio para controlar o pH da solução. A aplicação de produtos a base de sódio pode contaminar e tornar o meio tóxico, prejudicando a ação dos microrganismos.
5. Concentração de lodo: Foi inoculado 1,6 litro de vinhaça com 200 ml de lodo, resultando na concentração de 12,5% de lodo. Segundo Ueno et al. (2011), a melhor concentração de lodo é 50% da amostra inicial, pois permite o tempo de adaptação aos microrganismos e garante o teor de meio nutritivo adequado, além de não intoxicar os microrganismos por

excesso de nutrientes. Porém, no caso dos reatores, este procedimento não é possível devido ao sistema operar em batelada.

O resultado obtido em escala laboratorial foi influenciado por fatores externos e pelos procedimentos adotados. A falta de agitação do sistema pode ter influenciado na menor produção de biogás.

6.3 Dimensionamento do biodigestor anaeróbio de fluxo ascendente

Inicialmente foram levantadas as informações para calcular a vazão do projeto, considerando o informativo da Usina Alto Alegre que aponta a produção de etanol na safra de 2012, como descrito na tabela 11.

Tabela 11 - Dados Iniciais da Usina Alto Alegre

SUBPRODUTO	QUANTIDADE	UNIDADE
Etanol	204116195	L/ano
Etanol	566,989	m ³ /dia
Vinhaça (calculada)	7370,863	m ³ /dia

Fonte: A autoria própria (2015).

Segundo Salomon (2007), para cada litro de etanol se produz aproximadamente 13 litros de vinhaça. Com esses dados foi calculada taxa diária de aplicação volumétrica de 7370,863 m³. A partir dessa vazão foi possível dimensionar o reator.

No entanto, como havia um grande volume de vinhaça a ser processada, foi realizado o cálculo de 4 reatores. Desta forma, foi obtido para cada sistema um volume unitário de 829,22 m³.

Caso o sistema fosse composto por somente um reator as dimensões seriam extensas e poderiam influenciar no processo de biodigestão. O diâmetro calculado para esse reator seria de 25,52 metros, enquanto para 4 reatores foi de 12,77 metros.

A área unitária do reator foi encontrada após a adoção da altura útil, fixada em 6,48 metros. Os resultados do dimensionamento para os 4 reatores estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Dimensionamento para cada reator

DIMENSÃO	QUANTIDADE	UNIDADE
Volume unitário	829,22	m ³
Altura	6,48	M
Área	127,97	m ²
Diâmetro	12,77	M
Dutos dispersantes	64	Unidades

Fonte: Aatoria própria (2015).

Outros resultados como a carga diária de matéria orgânica (C diário), carga orgânica volumétrica (COV) e carga hidráulica volumétrica (CHV) foram obtidos através da DBO da vinhaça – adotado 21,45 kg/m³, segundo os estudos realizados por Lyra et al. (2003), como observado na tabela 13:

Tabela 13 – Carga da Vinhaça

PARÂMETRO	QUANTIDADE	UNIDADE
DBO	21,45	kg/m ³
Carga dia	158105	kg/dia
CHV	2,22	m ³ /m ³ .d
COV	47,66	kgDBO/m ³ .d ⁻¹

Fonte: Aatoria própria (2015).

A quantidade de massa de matéria orgânica aplicada diariamente no reator (COV) foi calculada como 47,66 kgDBO/m³.d. Segundo Brito (2006), o número mais aceito para esse parâmetro no caso de efluentes domésticos está entre 15 e 45 kgDQO/m³.d. De acordo com Doll e Foresti (2010), para testes mesofílicos a carga orgânica volumétrica adotada foi de 36 kgDQO/m³.d e a remoção de DQO obtida foi de 79%.

Ainda, para Brito (2006) a carga hidráulica volumétrica não deve ultrapassar 5 m³/m³.dia para qualquer resíduo, como constatado nos cálculos desse dimensionamento.

Assim, para realizar o dimensionamento do biodigestor empregado na pesquisa foram utilizadas referências de experimentos similares, de modo que, a partir dos cálculos da taxa de aplicação volumétrica de vinhaça da usina foram dimensionados 4 biodigestores com 6,48m de altura e 12,77m de diâmetro.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizados ensaios preliminares visando a obtenção em escala reduzida de reatores anaeróbios para produção de biogás. Foram comparados dados de outros estudos e dados teóricos para determinação da energia potencial a ser gerada em uma usina de álcool.

Desta forma, pode-se concluir que:

- Cada variável da biodigestão anaeróbia é em grande escala responsável pela produção final de biogás. Desse modo, necessita-se de um maior controle (automatização) de sistemas de reatores em escala de bancada para inserção e controle de alcalinidade e para agitação do sistema visando aproximar os resultados obtidos de sistemas de UASB.
- O controle da temperatura do sistema é fundamental para obter um processo mais eficiente de produção de biogás, sendo indicado mantê-la entre 30-35°C.
- O pH da solução deve ser mantido entre 6,5 e 7,5 por uma solução alcalina, preferivelmente que não seja a base de sódio, pois o bicarbonato de sódio produz CO₂ e pode atrapalhar na leitura do gasômetro, enquanto o hidróxido de sódio em concentrações muito elevadas pode tornar o meio tóxico aos microrganismos.
- A agitação da solução neste tipo de experimento mostrou-se relevante pois ao tornar o sistema homogêneo, influencia na velocidade das reações químicas. No estudo realizado a produção de biogás foi muito abaixo do esperado principalmente devido ao reator tornar-se bifásico ao longo do processo de degradação. Um estudo de sistemas bifásicos pode ser proposto a partir desta pesquisa.

- No presente estudo, a produção máxima de biogás foi de 4,63 litros em 17 dias de operação e obteve-se através do reator 7, composto de 1,6 litros de vinhaça, 70 gramas de torta de filtro e 200 ml de lodo. O potencial energético para a média dos reatores 6 e 7 é equivalente a 214,47 KWh/h. O aumento da fração de lodo poderia resultar em uma maior estabilidade das reações e na aceleração do processo de start-up, otimizando a produção de biogás.
- O dimensionamento do UASB para a demanda total de vinhaça foi dividido em 4 reatores com 12,76 m de diâmetro e 6,48 m de altura, comportando um volume unitário de 829,22 m³.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2008, cap.7, p.107-115. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap7.pdf>. Acesso em 27 Out. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Portaria nº 2**. Rio de Janeiro, 16 de Janeiro de 2002. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder_portarias_anp/portarias_anp_tec/2002/janeiro/panp%20%20-%202002.xml>. Acesso em 27 Out 2014.

AHRING, B.; ANGELIDAKI, I.; JOHANSEN, K. Anaerobic treatment of manure together with industrial waste. **Proceedings of the Sixth International Symposium Anaerobic Digestion**. São Paulo, 1991, p.308-311.

ALVES, João P. G. **Requisitos para Certificação PV**. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e de Computadores) – Programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. Disponível em: <http://ee02034.yolasite.com/resources/Tese_VersDef.pdf>. Acesso em 9 Nov. 2014.

ALVES, Josias M. Paradigma técnico e co-geração de energia com bagaço de cana de açúcar em Goiás. **6 Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural – AGRENER GD**. 2006, v.2, n.6. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v2/091.pdf>>. Acesso em 11 Nov. 2014.

ANDRADE, Samara A. C.; CASTRO, Sebastião B. **Engenharia e tecnologia açucareira**. Departamento de Engenharia Química, CTG – UFPE, Pernambuco, 2006. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/106750665/Tecnologia-Acucareira>>. Acesso em 27 Set. 2014.

ARAÚJO, João L. de. A questão do investimento no setor elétrico brasileiro: Reforma e crise. **Nova Economia [online]**. 2001, v.11, n.1, p. 77-96. Disponível em: <http://www.face.ufmg.br/novaeconomia/sumarios/v11n1/LIZARDO.PDF?origin=publication_detail>. Acesso em 29 Set. 2014.

BNDES E CGEE (Organização). **Bioetanol de cana-de-açúcar : energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/publicacoes/conferencia_bioetanol.php>. Acesso em 29 Set. 2014.

BRASMETANO INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, **proposta nº 0057-01-04 de 17/11/2004**, atualizada em abril de 2005.

BRITO, Moacir F. De. **Determinação das frações orgânicas de efluentes de reatores UASB**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.ups.br/disponiveis/3/3147/tde-23042007-212647/>>. Acesso em 27 Out 2015.

CABELLO, P.E; SCOGNAMIGLIO, F.P; TERÁN, F.J.C. **Tratamento de Vinhaça em Reator Anaeróbico de leito fluidizado**. Engenharia ambiental, Presidente Prudente – SP, v.6, n.1, p.321-338, 2009.

CARVALHO, Tulio C. **Redução do Volume de Vinhaça através do Processo de Evaporação**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de São Paulo. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91715/carvalho_tc_me_bauru.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 29 set 2014

CENTRO DE ESTUDOS E SUSTENTABILIDADE DA FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (GVces). **Cartilha de Fontes de Energia e Eficiência Energética**. 2011. Disponível em: <http://www.empresapeloclima.com.br/cms/arquivos/cartilha_epc_energia.pdf>. Acesso em 9 Out. 2014.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2007.

CHERNICHARO C. A. L. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia**. Reatores anaeróbios Cap. 2. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2000.

COMASTRI FILHO, José A. Biogás: independência energética do pantanal mato-grossense. **Embrapa – Circular técnico nº 9**, out 1981. 53 p. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/787706/1/CT09.pdf>>. Acesso em: 27 Out 2015.

CORAZZA, Rosana I. **Políticas públicas para tecnologias mais limpas: uma análise das contribuições da economia do meio ambiente**. 2001. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000220023>>. Acesso em 17 Out. 2014.

CORRÊA NETO, Vicente. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. 2001. 174 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Programa de pós-graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Disponível em:

<<http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/vcneto.pdf>>. Acesso em 28 novembro 2015.

CORTEZ, Luís A. B; LORA, Electo E. S.; GÓMEZ, Edgardo O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2008.

CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J. Principais Subprodutos da Agroindústria Canavieira e Sua Valorização. **Revista Brasileira de Energia**, 1992, v.2, n.2. Disponível em: <www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=45>. Acesso em 29 Set. 2014.

COSTA, Aurélio E. da. **A influência das bandeiras na formação de preços do mercado de gasolina e diesel no Brasil**. 2011. 82 f. Monografia (Bacharelado em Economia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.gee.ie.ufrj.br/arquivos/publicacoes/MONOGRAFIAS/Monografia_Aurelio_Eira_da_Costa.pdf>. Acesso em 11 Out. 2014.

COSTA, Ricardo C. da; PRATES, Cláudia P. T. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. **BNDES – Setor Energético**, 2005. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/4210/BNDES_O-papel-das-fontes-renov%a1veis-de-energia-no-desenvolvimento-do-setor-energ%a9tico-e-barreiras-%a0-sua-penetra%a7%a3o-no-mercado-2005.pdf?sequence=1>. Acesso em 29 Set. 2014.

DIAS, Marina O. S. et al. Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production? **Bioresource Technology**. 2011, v. 102, p. 8964-8971. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411009254>>. Acesso em 31 Set. 2014.

DOLL, Maria M. R.; FORESTI, Eugenio. Efeito do bicarbonato de sódio no tratamento de vinhaça em AnSBBR operado a 55° e 35°C. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v. 15, n. 3, Jul/Set 2010. p. 275-282. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v15n3/v15n3a11.pdf>>. Acesso em 29 Out 2015.

DRAGONE, G.; FERNANDES, B.; VICENTE, A. A.; TEIXEIRA, J. A. Third generation biofuels from microalgae. **Formatex**. 2010, p. 1355-1366. Disponível em: <<http://www.formatex.info/microbiology2/1355-1366.pdf>>. Acesso em 5 Out. 2014.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Estatística e Análise do Mercado de Energia Elétrica Boletim Mensal (mês-base: Dezembro 2006)**. Rio de Janeiro, 2007.

FERNANDES, Flávio; SANTOS, Edimilson M. dos. **Reflexões sobre a história da matriz energética Brasileira e sua importância para a definição de novas estratégias para o gás**. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP 60504.

Informativo BGF Consultoria. 2004. Disponível em:
<http://www.bgfconsultoria.com.br/pag/documents/Rio_Oil_Gas.htm>. Acesso em 25 Set. 2014.

FERRI, Alencar; COSTA, Marcelo A. de S.; BATISTONE, Margarete; NAKA, Marco H. Análise do Perfil de Produção de Etanol em usinas localizadas na região da Grande Dourados – MS. **Enciclopédia Biosfera**. Goiania, 2014, v.10, n. 18, p. 251-268. Disponível em:
<<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2014a/AGRARIAS/analise%20do%20perfil.pdf>>. Acesso em XXXXXX

FINGUERUT, J. **Produção de Álcool: Pesquisa e Desenvolvimento**. Piracicaba, SP, Brasil: CTC. 2004

FORESTI, E; ZAIAT, M; MORAES, E. DE M; ADORNO, M. A. T; PAIM, A. P. S; RODRIGUES, J. A. D; RATUSZNEI, S. M; CANTO, C. S. DO; DAMASCENO, L. H. S Métodos de análises físico-químicas de rotina de águas residuárias tratadas biologicamente. 85 f. Instituto Mauá de Tecnologia. USP, 2005

GOLDEMBERG, José. Energia e desenvolvimento. **Estudos Avançados**. 1998, v.2, n.33, p. 7-15. ISSN 0103-4014. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40141998000200002&script=sci_arttext&tling=es>. Acesso em 5 Out. 2014.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**. 2007, v.21, n.59, p. 7-20. ISSN 0103-4014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142007000100003&script=sci_arttext>. Acesso em 26 Set. 2014.

GRANATO, Eder F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça**. 2003. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Programa de pós-graduação da Universidade Estadual Paulista – UNESP. Disponível em: <http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90820/granato_ef_me_bauru.pdf?sequence=1>. Acesso em 11 Out. 2014.

GRANATO, Eder F. **Geração de energia elétrica a partir do resíduo vinhaça**. 4º Encontro de Energia do Meio Rural. Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial, 2002. Disponível em:
<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000200006&script=sci_arttext>. Acesso em 29 Set. 2014.

GURGEL, C. A. V.; QUEIROZ, G. B. de; SANTOS, E. L. S. C. dos; GALVÃO, M. L. M. Impactos da extração do petróleo (óleo e gás) no Rio Grande do Norte, na região do Alto do Rodrigues/ RN. **Holos [online]**. 2013, ano 29, v. 3, p. 130-147. ISSN 1807-1600. Disponível em:
<<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/viewFile/715/692>>. Acesso em 25 Set. 2014.

HASSUDA, S.; REBOUÇAS, A. da C.; CUNHA, R. C. de A. Impactos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero Bauru. **Boletim IG-USP**. 1991, n.9, ISSN 0202-6275. Disponível em: <http://papegeo.igc.usp.br/scielo.php?pid=S0102-62751991000200035&script=sci_arttext&tlng=en>. Acesso em 15 Out. 2014.

HENN, Alan. **Avaliação de dois sistemas de manejo de dejetos em uma pequena propriedade produtora de suínos - condição de partida**. 2005. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102858/214231.pdf?sequencia=1>>. Acesso em 5 Nov. 2014.

ILLOVO SUGAR LTD. **International Sugar Statistics**. 2009. Disponível em <<http://www.illovosugar.com/worldofsugar>>. Acesso em 29 Set. 2014.

IN PRESS. Mesmo com crise Galp mantém investimentos. **Gazeta Mercantil**. 2008, caderno C, p. 9. Disponível em: <<http://www.inpresspni.com.br/releases-172-CLIPPING-ENERGIA.html>>. Acesso em 4 Nov. 2014.

KLEIN, Bruno C. **Cultivo de microalgas para produção de bioetanol de terceira geração**. 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Química na Universidade Estadual de Campinas – FEQ. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000905464>>. Acesso em 7 Out. 2014.

LAMONICA, Helcio M. **Potencial de geração de excedentes de energia elétrica com o biogás produzido a partir da biodigestão da vinhaça na indústria sucroalcooleira brasileira**. 3º Encontro de Energia do Meio Rural. Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial, 2006. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022006000200027&script=sci_arttext>. Acesso em 18 Out. 2014.

LEAL, Manoel R. L. V. O potencial de aproveitamento da energia da biomassa. **Inovação Uniemp [online]**. 2005, v.1, n.3, p. 40-41. ISSN 1808-2394. Disponível em: <http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1808-23942005000300024&lng=pt&nrm=is>. Acesso em 29 Set. 2014.

LORA, E. E. S.; SALOMON, K. R. **Análise comparativa da utilização da biomassa com tecnologias convencionais de geração aplicando a eficiência ecológica**. 5 Encontro de Energia Meio Rural. 2004. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022004000100009&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em 28 Nov 2015

LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; DA SILVA, J. A. A. Topossequência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2003, v.7, n.3, p. 525-

532. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v7n3/v7n3a20.pdf>>. Acesso em 15 Out. 2014.

MACHADO JUNIOR, Evanir J.; NAKAGAKI, Jelly M.; MINILLO, Alessandro. **Avaliação da Produção de Biodiesel a partir de microalgas em meio contendo vinhaça e cana-de-açúcar**. 4º Encontro de Ensino Pesquisa e Extensão (EPEX) da Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, 2013. Disponível em: <<http://periodicos.uems.br/novo/index.php/enic/article/viewFile/3208/1375>>. Acesso em 20 Out. 2014.

MARQUES, Sheyla S. I. **Microalgas como matéria-prima para geração de biocombustíveis: uso da vinhaça como alternativa de redução de custos e contribuição à sustentabilidade**. 2012. 49 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Programa de pós-graduação em biotecnologia – UFBA. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufba.br:8080/ri/bitstream/ri/11860/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20ICS%20Sheyla%20Marques.pdf>>. Acesso em 5 Out. 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em <www.anp.gov.br/?dw=1089>. Acesso em 28 Set. 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco Nacional Energético**. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acesso em 28 Set. 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco Nacional Energético**. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf>. Acesso em 28 Set. 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Petróleo e Gás**. 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/governanca-ambiental/item/8324-petr%C3%B3leo>>. Acesso em 26 Set. 2014.

MORELL, P.; SANTOS, V.; ZANELLA, T. ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO EM ATERROS SANITÁRIOS. II **Simpósio de Bioenergia e Biocombustíveis do Mercosul**. 2014. Disponível em: <<http://cac-php.unioeste.br/eventos/simbiomercosul/anais/arquivos/125.docx>>. Acesso em 2 Set 2015.

NAGATA, M.; VIEIRA, M. A.; SILVA, R. R.; GIMENES, H. C. **Desenvolvimento Sustentável e Responsabilidade Corporativa. É Possível Ser Sustentável? Caso MAPFRE S.A**. 2010. Disponível em: <<http://www.rumosustentavel.com.br>>. Acesso em 2 Set 2014

NAZATO, C.; SILVA, D. F.C.; FERRAZ, S. C. U.; HARDER, M. N. C. Moenda x difusor: diferentes pontos de vista sobre o assunto. **Revista Bioenergia: Diálogos**. 2011, v.1, p.129-139. Disponível em <http://www.fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/index>>. Acesso em 2 Set. 2014.

NAIK, S.N.; GOUD, V.V.; ROUT, P.K.; DALAI, A.K. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 14, p. 578–597, ISSN 1364-032, 2010. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002342>>. Acesso em 2 Set. 2014.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. **Chemical methods**. Madison, Soil Science of America/American Society of Agronomy, 1996. p.961-1010.

NOBRE, Carlos A.; NOBRE, Antônio D. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados [online]**. 2002, v.16, n.45, p. 81-90. ISSN 0103-4014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142002000200006&script=sci_arttext&tlnq=es>. Acesso em 11 Out. 2014.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão a Alternativa Energética**. Editora Nobel, São Paulo. 93p, 1986.

ORLANDO FILHO, José; MACEDO, Newton; TOKESHI, Hasime. Seja o doutor do seu canal. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 67, p. 10, set. 1994. Disponível em: <http://www.agromac.com.br/arq/201412050917551677045039.pdf>>. Acesso em 25 Set 2015.

PACHECO, Maria R. P. dos S.; HELENE, Maria E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Estudos Avançados [online]**. 1990, v.4, n.9, p. 204-220. ISSN 0103-4014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141990000200010>. Acesso em 26 Set. 2014.

PAYNE, John H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Nobel S.A., 1989. Disponível em: http://books.google.com.br/books?id=eZCmdEvu6i0C&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em 27 Set. 2014.

PELLEGRINI, Luis F. **Análise e Otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade**. 2008. 349 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-14052009-180026/en.php>>. Acesso em 4 Out. 2014.

PENHABEL, Laurence A. Vinhaça: Bio-Fertirrigação e Impacto Ambiental. **Revista Cognitio**. 2010, v.1. Disponível em

<<http://revista.unilins.edu.br/index.php/cognitio/article/view/12/14>>. Acesso em 22 Set. 2014.

PINTO, Claudio P. **Tecnologia da digestão anaerobia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. 1999. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000188461>>. Acesso em 6 Out. 2014.

PIRES, Renata A. P.; FERREIRA, Osmar M. **Utilização da vinhaça na Bio-fertirrigação da cultura da cana de açúcar: estudo de caso em Goiás**. Goiania, 2008. Disponível em: <<http://www.pucgoias.edu.br/ucg/prope/cpqss/ArquivosUpload/36/file/UTILIZA%C3%87%C3%83O%20DA%20VINHA%C3%87A%20NA%20BIO-FERTIRRIGA%C3%87%C3%83O%20DA%20CULTURA%20DA%20CANA-DE-A%C3%87UCAR.pdf>>. Acesso em 13 Out. 2014.

POMPERMAYER, Raquel de S.; DE PAULA JUNIOR, Durval R. **Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos**. 3º Encontro de Energia do Meio Rural. Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial, 2003. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000200055&script=sci_arttext&lng=pt>. Acesso em 18 Out. 2014.

PORTO-GONCALVES, Carlos W. Outra Verdade Inconveniente: a nova geografia política da energia numa perspectiva subalterna. **Universidade Humanist. [online]**. 2008, n.66, p. 327-365. ISSN 0120-4807. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S012048072008000200017&lang=pt>. Acesso em 25 de Set. 2014.

PRATA, Fabio; LAVORENTI, Arquimedes; REGITANO, Jussara B.; TORNISIELO, Valdemir L. Degradação e sorção de ametrina em dois solos com aplicação de vinhaça. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 36, n. 7, p. 975-981, jul. 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v36n7/a07v36n7.pdf>>. Acesso em 27 Out 2015.

RAELE, Ricardo. **A aplicação de um modelo de construção de cenários no setor produtivo de etanol: Um estudo sobre o etanol de segunda geração**. 2010. 154 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Programa de pós-graduação da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da USP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12139/tde-22102010-131657/en.php>>. Acesso em 30 Out. 2014.

RAMOS, Rômulo P. **Modelo matemático para custo e energia na produção de açúcar e álcool**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de pós-graduação da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp154254.pdf>>. Acesso em 26 Set. 2014.

REGO, Erik E.; HERNANDEZ, Francisco D. M. **Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar: contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100053&lng=en&nrm=abn>. Acesso em 29 Out 2015

RICE, Eugene W.; BAIRD, Rodger; EATON, Andrew D.; CLESCERI, Lenore S; BRIDGEWATER, Laura; **Standard Methods for the examination of water & wastewater**. 22 ed. Washington, DC: American Public Health Association. v.1. 2012

RIZK, M. C. **Tratamento de resíduos frutihortícolas**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil. 2009.

RODRIGUEZ José A. R. Do engenho à biorrefinaria. A usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. **Química Nova [online]**. 2011, v.34, n.7, p. 1242-1254. ISSN 0100-4042. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422011000700024&script=sci_arttext#esq1>. Acesso em 15 Out. 2014.

SALOMON, Karina R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. 2007. 247 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/biogas/files/2014/01/salomon.pdf>>. Acesso em 11 Out. 2014.

SALOMON, Karina R.; LORA, Electo E. S. Estimative of the electric energy generating potential for diferente sources of biogás in Brazil. **Biomass and Bioenergy**. v. 33, Set 2009. p. 1101-1107. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195340900052X>>. Acesso em 27 Out 2015.

SANTOS, Fernando A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova [online]**. 2012, v.35, n.5, p. 1004-1010. ISSN 0100-4042. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422012000500025&script=sci_arttext>. Acesso em 31 Set. 2014.

SOTTI, Gustavo de. **Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário**. 2014. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2420>>. Acesso em: 05 out 2015

TOLMASQUIM, Mauricio T.; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos estudos - CEBRAP [online]**. 2007, n.79, p. 47-69. ISSN 0101-3300. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010133002007000300003&lang=pt>. Acesso em 25 Set. 2014.

TORQUATO, Sérgio A; FRONZAGLIA, Thomaz. Tecnologia BIG-GT: energia a partir da gaseificação da biomassa da cana. Novembro de 2005. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=3814>>. Acesso em 25 Set 2014.

UENO, C. R. J.; SALVIATO, A.; FRARE, L. M.; GIMENEZ, M. L.; ZANIN, G. M. **Estudos Preliminares de Produção de Biogás com Diferentes Volumes de Adição de Vinhaça para a Inoculação.** In: OFICINA E SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA (DAAL), 10. 2011, Ouro Preto. Anais. UFMG; UFOP, 2011. Disponível em: <<http://www.desa.ufmg.br/daal2011/anais/pdf/4HTA.pdf>>. Acesso em 27 Out. 2015.

VARGAS, José I.; DA SILVA, Othon L. P.; FERREIRA, Omar C.; EIDELMAN, Frida. **Características dos Sistemas Elétricos Integrados do Brasil e sua Projeção até o Horizonte de 2035.** Um “porto de destino” para o sistema elétrico brasileiro. Economia & Energia. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://ecen.com/eee49/eee49p/1sistema_eletrico.pdf>. Acesso em 4 Nov. 2014.

VASCONCELOS, R. F. B.; SOUZA, E. R.; CANTALICE, J. R.; SILVA, L. S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.381–386, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000400004>>.

VENTURA, Ricardo. **Quantificação do ácido láctico na fermentação etanólica como parâmetro de monitoramento do processo.** 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Programa de pós-graduação do Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp123713.pdf>>. Acesso em 26 Out. 2014.

VIANA, Anderson Bezerra. **Tratamento anaeróbio de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55°C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica.** 2006. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-26032007-125625/>>. Acesso em: 27 Out 2015.

VIEIRA, Tamirez de Q. **Uso de resíduos líquidos no cultivo da microalga *Chlorella sp* com potencial para produção de biocombustíveis.** 2013. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental) apresentado na Universidade Estadual da Paraíba. Disponível em: <<http://dspace.bc.uepb.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2250/PDF%20-%20Tamires%20de%20Queiroz%20Vieira.pdf?sequence=1>>. Acesso em 14 Out. 2014.

VITTI, Godofredo C. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar**. Repositório EMBRAPA. Bebedouro, 2005. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Nutricao+cana+GVitti_000fh3r3vzp02wyiv80rn0etnmc6zamd.pdf>. Acesso 26 Out. 2014.

YIN, Robert K. **Estudo de caso – planejamento e métodos**. (2Ed.). Porto Alegre: Bookman. 2001. Disponível em: <http://saudeglobaldotorg1.files.wordpress.com/2014/02/yin-metodologia_da_pesquisa_estudo_de_caso_yin.pdf>. Acesso em 22 Out. 2014.

ZILOTTI, H. A. R.. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. 2012. 39 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - UNIOESTE, Cascavel, 2012.

ZOLIN, C.A.; PAULINO, J.; BERTONHA, A.; FREITAS, P.S.L.; FOLEGATTI, M.V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. I. Características do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.1, p.22-28, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v15n1/a04v15n01.pdf>>.