

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Especialização em Saneamento e Meio Ambiente

Monografia de final de curso

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DA VINHAÇA EM UMA
USINA SUCROALCOOLEIRA BIOENERGÉTICA: ESTUDO DE VIABILIDADE**

Fernanda Oliveira Mateus Borges

Belo Horizonte

2011

Fernanda Oliveira Mateus Borges

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DA VINHAÇA EM UMA
USINA SUCROALCOOLEIRA BIOENERGÉTICA: ESTUDO DE VIABILIDADE**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Saneamento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial a obtenção do título de Especialista em Saneamento e Meio Ambiente.

Área de concentração: Tratamento de Águas de Abastecimento e Residuárias

Orientadora: Dra. Miriam Cristina Santos Amaral

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Antônio e Clarinda, pelo amor e carinho incondicionais e por serem os responsáveis por tudo que sou hoje.

Á Amanda e Carolina, queridas irmãs e grandes amigas.

Ao meu namorado Lucas, companheiro nas lutas passadas e vindouros.

A toda minha família, em especial, aos meus avós que torceram por mim e pelas preces.

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por ter acompanhado meus caminhos para a conclusão desta monografia.

Aos meus pais, José Antônio e Clarinda, pela sabedoria, preocupação e carinho nos momentos necessários.

Às minhas irmãs, Amanda e Carolina, pela paciência e entendimento do meu comportamento.

Ao meu namorado Lucas pelo apoio e sugestões de pesquisa.

Á todos os colegas de graduação pela amizade, momentos de estudos e descontração, em especial às minhas amigas Juliana, Lenitta e Regiane.

À usina sucroalcooleira bionergética situada no Centro-Oeste de Minas Gerais, pela disponibilidade e prontidão em fornecer os dados utilizados no trabalho em questão.

À Professora Dra. Miriam Cristina Santos Amaral pela orientação, conselhos e compreensão.

Aos demais professores e funcionários da Universidade Federal de Minas Gerais pela grande ajuda.

A todos aqueles que direto e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Processo de Biodigestão Anaeróbia.....	10
Figura 02. Representação esquemática de um biodigestor de fluxo ascendente.....	17
Figura 03. Fluxograma do processo produtivo em uma usina sucroalcooleira.....	22
Figura 04. Esquema Básico da Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça.....	27
Figura 05. Instalação de Biodigestor UASB.....	29
Figura 06. Turbina a Gás Modelo J 320V81.....	29
Figura 07. Gráfico demonstrativo da produção de álcool em 2010.....	33
Figura 08. Gráfico demonstrativo da produção de álcool em 2011.....	33
Figura 09. Foto Tanques de armazenamento.....	34
Figura 10. Foto Destilaria da usina sucroalcooleira.....	34
Figura 11. Gráfico demonstrativo da geração de vinhaça em 2010.....	35
Figura 12. Gráfico demonstrativo da geração de vinhaça em 2011.....	35
Figura 13. Foto Fluxômetro.....	36
Figura 14. Foto Reservatório de armazenamento de vinhaça.....	41
Figura 15. Foto Reservatório.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Balanço energético de uma tonelada de cana.....	08
Tabela 02. Valores de DQO da Vinhaça <i>in natura</i>	21
Tabela 03 Características Físico-químicas da Vinhaça <i>in natura</i> e biodigerida.....	23
Tabela 04. Oferta interna de Energia de 2009 e 2010.....	24
Tabela 05. Eficiência de remoção de DQO em reatores UASB.....	26
Tabela 06. TDH em reatores UASB.....	30
Tabela 07. Avaliação Econômica.....	40

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL = Agência Nacional de Energia Elétrica

CONAMA = Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO = demanda bioquímica de oxigênio

DQO = demanda química de oxigênio

E = eficiência de remoção de DQO

E1 = eficiência da turbina a gás

E_{DQO} = eficiência do reator UASB em termos de remoção de DQO

F = fator de conversão de biogás por DQO removido

GEB = ganho de energia pelo biogás

GEE's = Gases de Efeito Estufa

MDL = Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MME = Ministério de Minas e Energia

PB = produção de biogás

PEEB = produção de energia elétrica pelo biogás

$Q_{méd}$ = Vazão média

RADA = Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental

TDH = tempo de detenção hidráulica

UASB = upflow anaerobic sludge blanket (biodigestor de fluxo ascendente)

V = volume total do reator

VAP = volume de álcool produzido

VVG = volume de vinhaça gerada

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade de aproveitamento energético do biogás obtido no tratamento anaeróbio da vinhaça, numa usina sucroalcooleira bionérgica situada no Centro-Oeste de Minas Gerais. Para tanto, realizou-se uma pesquisa quantitativa acerca da produção de álcool, geração da vinhaça e consumo de energia. Os principais dados necessários ao alcance do objetivo proposto foram obtidos na Central de Informações da referida empresa, tomando-se como referência a safra de 2008, 2010 e 2011. Para a análise e interpretação dos dados coletados foram estabelecidos os seguintes parâmetros: (a) disponibilidade de energia elétrica proporcionada pela biodigestão anaeróbia da vinhaça; (b) representatividade dessa energia elétrica proposta em relação a energia elétrica consumida na empresa e (c) análise dos impactos ambientais proporcionados pela fertirrigação utilizando o resíduo vinhaça “in natura” e após a biodigestão anaeróbia. Assim, foram obtidos os resultados que dentro os principais, destacam-se: a geração de energia elétrica equivalente à 1.358.580 kWh/safra e o pagamento do investimento em 3,4 safras, desconsiderando taxas de juros, depreciação e remuneração de capital.

Palavras-chave: *Álcool. Vinhaça. Biodigestão Anaeróbia. Energia.*

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVOS	4
3. JUSTIFICATIVA	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1 ENERGIA E BIOMASSA	6
4.2 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	8
4.3 BIODIGESTÃO	10
4.3.1 INFLUENCIAS NO PROCESSO	11
4.3.2 BIOGÁS	14
4.4 BIODIGESTORES ANAERÓBIOS	15
4.4.1 BIODIGESTORES DE FLUXO ASCENDENTE	17
4.5 RESÍDUOS NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA	21
4.6 CARACTERIZAÇÃO E GERAÇÃO E TRATAMENTO DA VINHAÇA	23
4.6.1 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA	26
5. METODOLOGIA	28
5.1 PARÂMETROS OBTIDOS NA CENTRAL DE INFORMAÇÕES DA EMPRESA	28
5.1.1 BIODIGESTOR CONSIDERADO PARA CÁLCULO DA GERAÇÃO DE BIOGÁS	28
5.1.2 TURBINA A GÁS CONSIDERADA	29
5.2 CÁLCULOS DO PROJETO	29
5.2.1 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA	30
5.2.2 QUEIMA DO BIOGÁS NAS TURBINAS	31
5.2.3 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA QUANTIDADE DE ENERGIA GERADA	31
5.2.4 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	32
5.2.5 CÁLCULO DE CUSTO DE INSTALAÇÃO E RETORNO DO INVESTIMENTO.	32
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
6.1 DADOS DE ÁLCOOL PRODUZIDO	33
6.1.1 DADOS DA VINHAÇA GERADA	35
6.1.2 DADOS REFERENTES À ENERGIA CONSUMIDA ADQUIRIDA DA CONCESSIONÁRIA	36
6.1.3 DADOS REFERENTES AO CUSTO DA ENERGIA ADQUIRIDA DA CONCESSIONÁRIA	36
6.2 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA	37
6.3 DISPONIBILIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA PELA BIODIGESTÃO	37
6.3.1 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	38
6.4 QUEIMA DO BIOGÁS NAS TURBINAS	39
6.5 CÁLCULO DO RETORNO DE INVESTIMENTO	39
6.6 IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS	41

7. CONCLUSÃO	44
8. BIBLIOGRAFIA	45

1. INTRODUÇÃO

Grande parte da energia mundial é gerada a partir de combustíveis fósseis, considerados escassos e prejudiciais ao meio ambiente e aos seres humanos. Entre os combustíveis alternativos potencialmente cotados para substituir os combustíveis fósseis, surgem os bioenergéticos.

A vinhaça é produzida na razão de 10-14 litros por litro de álcool, constituindo-se no maior efluente da indústria do álcool, com potencial considerável de poluição (BRAUNBECK *et al*, 2005). Os aspectos qualitativos da vinhaça articulados com os quantitativos de geração indicam a necessidade de promover tratamento deste efluente e o seu uso para fins nobres, dentre eles a fertirrigação. Como forma de tratamento emerge com sustentabilidade a digestão anaeróbia que apresenta baixo custo-benefício e proporciona geração e captação de biogás em quantidades consideráveis. Se desperta, assim, grande interesse no aproveitamento do biogás em questão, para a co-geração energética.

A argumentação apresentada motivou a escolha deste tema para a elaboração da monografia voltada à análise da viabilidade de aproveitamento energético do biogás da vinhaça gerado em tratamento anaeróbio.

O foco da pesquisa delimita-se pelo estudo do processo produtivo, com atenção à geração da vinhaça, do tratamento anaeróbio deste efluente e da co-geração de energia com os benefícios advindos dessa prática.

O tema proposto situa-se com muita propriedade no foco da Engenharia Ambiental e Sanitária. Seus aspectos relativos ao gerenciamento de impactos ambientais, ao tratamento de efluentes, ao uso de bioenergias e às tendências atuais de redução do efeito estufa, prestam enorme contribuição à consolidação dos conhecimentos adquiridos no curso.

Define-se, então, o objeto de análise representado pelo estudo da viabilidade de aproveitamento energético do biogás da vinhaça gerado em tratamento anaeróbio.

2. OBJETIVOS

Este projeto tem como objetivo geral estudar a viabilidade de aproveitamento energético do biogás obtido no tratamento anaeróbio da vinhaça. Para tanto, os objetivos específicos deste projeto consistem em:

- ✓ Quantificar teoricamente a disponibilidade de energia elétrica gerada pela biodigestão anaeróbia da vinhaça;
- ✓ Comparar o potencial de geração de energia elétrica pela biodigestão da vinhaça com o total de energia elétrica consumida na empresa;
- ✓ Calcular a viabilidade econômica para a instalação do processo de geração de energia elétrica com a biodigestão anaeróbia;
- ✓ Analisar as implicações ambientais proporcionadas pela geração do resíduo vinhaça “in natura” e após a biodigestão anaeróbia.

3. JUSTIFICATIVA

A relevância social do tema em estudo manifesta-se, principalmente, pelos benefícios indiretos advindos do tratamento adequado da vinhaça e o aproveitamento energético do biogás. A importância social destas ações expressa-se no conforto da circunvizinhança em relação a redução de maus odores promovida pelo aproveitamento do biogás em tratamento criterioso. A didática ambiental proporcionada por um eventual projeto, implantado nos moldes do escopo deste tema, trará aos munícipes e aos colaboradores da indústria a conjugação de visão e esforços sócio-ambientais importantes para o desenvolvimento regional.

A importância ambiental, que justifica o desenvolvimento desse tema, expõe-se na redução dos gases do efeito estufa, da carga orgânica da fertirrigação, de maus odores e do uso da energia da matriz nacional.

O estudo do assunto escolhido poderá trazer contribuições diversas para os problemas em foco, bem como ampliar e consolidar o conhecimento teórico respectivo. O encontro de viabilidade poderá proporcionar ao setor sucroalcooleiro iniciativas de implantação de projetos com fim proposto. Da mesma forma as particularidades estudadas poderão sugerir outros caminhos em caso de não haver viabilidade comprovada.

Em relação à geração elétrica através do biogás pode-se dizer que há, no presente momento, desenvolvimento expressivo e altamente difundido. A junção deste conhecimento tecnológico e a sua conjugação em objetivo prático representam tema ainda em estágio de desenvolvimento, pode-se dizer, tendo como base as últimas décadas. Contudo, afirma-se que o nível de conhecimento referente ao tema é suficiente para desenvolver projetos com tal característica de aproveitamento bioenergético.

No âmbito da realidade analisada poder-se-á propor modificações de processos conhecidos bem como da gestão ambiental respectiva.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 *Energia e Biomassa*

A energia é um fator muito importante para o desenvolvimento sustentável, uma vez que ela é indispensável à sobrevivência. As atuais fontes primárias de energia são quase todas não-renováveis, como o gás natural, petróleo, carvão, turfa e energia nuclear, havendo também as renováveis, como a biomassa dos vegetais, esterco, quedas d'água, fontes geotermiais, energia solar, eólica, das marés e das ondas, além da força muscular animal e humana. Cada forma de energia tem seus custos, benefícios e riscos econômicos, sanitários e ambientais e estes são fatores que interagem ativamente com outras prioridades governamentais e globais. É preciso fazer opções sabendo que a escolha de uma estratégia energética determinará inevitavelmente a escolha de uma estratégia ambiental. Isto porque a maneira do homem lidar com a natureza está estreitamente relacionada às transformações de energia em suas diversas manifestações, tais como energia cinética, elástica, gravitacional, térmica, elétrica, química, radiante ou nuclear (PINTO,1999).

Atualmente, a biomassa é responsável por um terço da energia consumida nos países em desenvolvimento, variando cerca de 90% em países como Uganda, Ruanda e Tanzânia a 45% na Índia, 30% na China e no Brasil e 10% no México e África do Sul. Esses percentuais variam muito pouco, ainda que esses países consumam mais combustíveis fósseis. (HALL *et al*, 2005).

Há um potencial considerável para a modernização do uso dos combustíveis de biomassa na produção de vetores energéticos convenientes, como eletricidade, gases e combustíveis automotivos, ao mesmo tempo em que se preservam usos tradicionais da biomassa. Essa modernização do uso industrial da biomassa já acontece em muitos países. Quando produzida de forma eficiente e sustentável, a energia da biomassa traz inúmeros benefícios ambientais e sociais em comparação com os combustíveis fósseis. Esses benefícios incluem o melhor manejo da terra, a criação de empregos, o uso de áreas agrícolas excedentes nos países industrializados, o fornecimento de vetores energéticos modernos a comunidades rurais nos países em desenvolvimento, a redução dos níveis de emissão de CO₂, o controle de resíduos e a reciclagem de nutrientes. Maiores benefícios ambientais e energéticos podem derivar do cultivo de plantas perenes e florestas antes que de plantações com safras anuais, que são matéria-prima alternativa de curto prazo para a produção de combustíveis. Os sistemas

agroflorestais podem desempenhar um papel importante na obtenção de energia e de vários outros benefícios para os agricultores e as comunidades. Para diminuir os níveis de emissão de CO₂, o uso da biomassa como um substituto dos combustíveis fósseis é mais vantajoso, do ponto de vista socioeconômico. (BAJAY *et al*, 2005).

No decorrer da história, segundo Hall *et al* (2005), o uso da biomassa tem variado consideravelmente, sob a influência de dois fatores principais: a densidade demográfica e a disponibilidade de recursos. Uma vez que a produção fotossintética anual de biomassa é cerca de oito vezes maior que a energia total usada no mundo e que essa energia pode ser produzida e usada de forma ambientalmente sustentável, visto que não libera CO₂, não resta dúvida de que essa fonte potencial de energia armazenada deve ser cuidadosamente levada em consideração em qualquer discussão sobre o fornecimento de energia nos dias atuais e no futuro. O fato de que, no ano de 2050, aproximadamente 90% da população mundial estará vivendo em países em desenvolvimento, sugere que o cultivo da biomassa para fornecer energia estará muito presente entre nós no futuro, a menos que haja mudanças drásticas nos padrões mundiais de comercialização de energia.

De acordo com Bajay *et al* (2005), os custos da bioenergia já são competitivos em determinadas circunstâncias e, à medida que as tecnologias se tornam mais desenvolvidas, continuarão a diminuir. Entretanto, a maioria das tecnologias de obtenção de energia a partir da biomassa ainda não chegou ao estágio em que as forças de mercado possam sozinhas, possibilitar sua adoção. Uma das principais barreiras à comercialização de todas as tecnologias de energia renovável é o fato de os mercados de energia atuais, de forma geral, ignoram os custos sociais e ambientais do uso de combustíveis fósseis e os riscos associados a ele. As tecnologias de energia convencionais podem impor à sociedade vários custos externos, como, por exemplo, a degradação ambiental e os gastos com tratamentos de saúde, difíceis de serem calculados. As fontes de energia renováveis com baixo ou nenhum custo externo e com impacto externos positivos, como a diminuição dos níveis de emissão de SO₂ e CO₂, a criação de empregos, a regeneração de áreas rurais e a economia de divisas, são sistematicamente apresentadas como desvantajosas. Além disso, as fontes de energia convencionais tendem a receber grandes subsídios. A internalização de custos e benefícios externos e a relocação mais equitativa de subsídios devem tornar-se uma prioridade para que todas as energias renováveis possam competir com os combustíveis fósseis em “pé de igualdade”.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2010), os derivados da cana-de-açúcar passaram a uma participação de 44.297 mil toneladas equivalentes de petróleo (tep) em 2010 contra 47.446 mil tep. verificados em 2009, conforme demonstrado na Tabela 1.

Afirma-se ainda que os usos representativos da biomassa na matriz energética brasileira proporcionam indicadores de emissões de CO₂ bem menores do que a média mundial e dos países desenvolvidos.

TABELA 1. Oferta interna de Energia de 2009 e 2010

ESPECIFICAÇÃO	mil tep	
	2009	2010
Não-renovavel	128.572	146.169
Petróleo e derivados	92.422	100.864
Gás natural	21.145	27.564
Carvão mineral e derivados	11.572	13.899
Urânio (U308) e derivados	3.434	3.842
Renovável	115.357	121.235
Hidráulica e eletricidade	37.064	37.790
Lenha e carvão vegetal	24.610	25.428
Derivados da cana-de-açúcar	44.427	47.446
Outras renováveis	9.237	10.570
Total	243.939	267.404

Fonte: Brasil (2010)

4.2 Geração de Energia Elétrica

Para realizar o cálculo da geração torna-se necessário determinar a eficiência do sistema, que depende da tecnologia utilizada na conversão do biogás. Basicamente, consideram-se três diferentes tecnologias: turbinas à gás, microturbinas e motores de ciclo Otto (CORTEZ et. al, 2007).

Sabe-se que, segundo o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2003), a vinhaça produzida a partir de uma tonelada de cana moída (1 m³) após passar pelo processo de biodigestão, apresenta 7,2 kg de metano (poder calorífico de 50 MJ.kg⁻¹). Logo, obtém-se um total de 100 kWh.ton⁻¹ cana. Cabe salientar ainda que, além dos benefícios já descritos para a produção de energia elétrica a partir da biodigestão de efluentes industriais, a Resolução Normativa 217/07 da ANEEL garante a isenção dos encargos de transmissão.

Conforme Costa (2006) pode-se definir conversão energética como o processo que transforma um tipo de energia em outro. Quanto se trata do biogás, submetendo-o a um processo de

combustão controlada, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica, a qual ativa um alternador que a converte em energia elétrica. As tecnologias mais utilizadas neste tipo de conversão são as microturbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo Ciclo-Otto.

Destacam-se como vantagens da geração de energia elétrica a partir do biogás (COSTA, 2006):

- ✓ Vantagens estratégicas: geração descentralizada; próxima aos pontos de carga;
- ✓ Vantagens econômicas: utilização de combustível disponível no local e de baixo custo (resíduo de processo).

O mesmo autor comenta ainda, que as turbinas a gás são constituídas de compressor, câmara de combustão e turbina de expansão (ciclo Brayton). O processo de funcionamento consiste na injeção de oxigênio na câmara de combustão para a queima do combustível. Esta reação transfere energia química para os gases, provocando uma elevação em sua temperatura. O gás resultante é expandido na turbina, resultando em energia mecânica para acionamento do compressor e da carga acoplada ao eixo da turbina, a qual pode ser constituída por um gerador de energia elétrica, bomba, entre outros.

A maior eficiência da turbina a gás está relacionada com a elevada temperatura e pressão dos gases na entrada do primeiro estágio da turbina e a reduzida temperatura dos gases de exaustão. A faixa de potência das microturbinas pode variar de algumas centenas de kW até quase 300 MW (COSTA, 2006).

De acordo com Costa (2006), os motores de combustão consistem na conversão de energia térmica de um combustível em energia mecânica pelo acionamento de pistões confinados em cilindros. Os mais comumente usados são os ciclos Otto e Diesel. Este tipo de motor pode ser aplicado tanto para a geração de energia elétrica, acoplando-se um gerador ao motor, quanto para geração de energia mecânica.

A principal diferença entre o ciclo Otto e Diesel refere-se à forma em que ocorre a combustão. No ciclo Otto a combustão ocorre pela explosão do combustível, na câmara de combustão, por meio de uma fagulha. Enquanto que no ciclo Diesel a combustão ocorre pela compressão do combustível na câmara de combustão (COSTA, 2006).

4.3 Biodigestão

O processo de biodigestão anaeróbia (Figura 1) consiste no processamento da carga orgânica de um resíduo. Este processo gera biogás e vinhaça biodigerida com reduzida carga orgânica, no entanto, sem alterações em suas propriedades fertilizantes (LAMONICA, 2006).

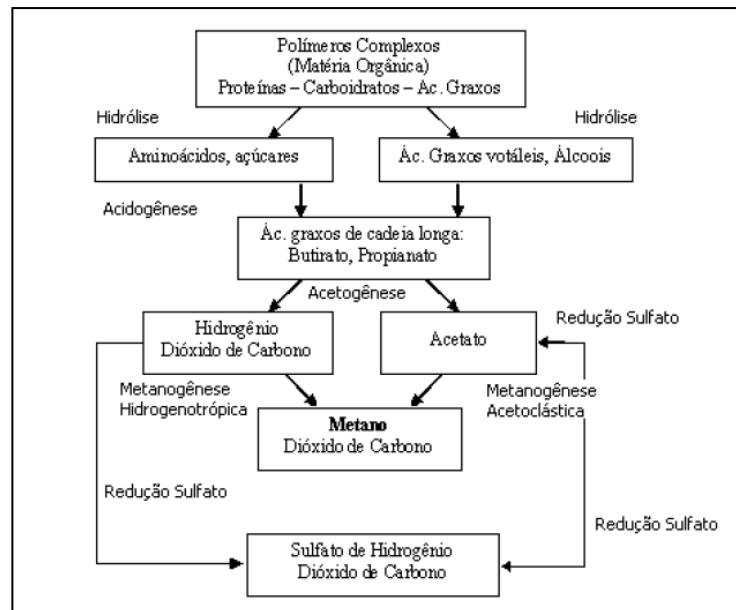


Figura 1. Processo de Biodigestão Anaeróbia.
Fonte: Salomon (2007).

O processo anaeróbio de biodigestão se desenvolve em duas principais etapas: uma acidogênica e outra metanogênica. Na primeira etapa, os compostos orgânicos de cadeias complexas, como gorduras carboidratos e proteínas, são hidrolisados até a formação de compostos de cadeias carbônicas menores, ou seja, mais simples. Estes compostos de cadeias menores são então oxidados biologicamente e convertidos em ácidos orgânicos, como ácido acético (CH_3COOH) e propiônico ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$) por meio de bactérias facultativas e estritamente anaeróbias. A redução da carga orgânica do efluente se processa nesta fase (CORTEZ et. al, 2007).

Os mesmos autores afirmam ainda, que na fase metanogênica ocorre a conversão de ácidos em metano, dióxido de carbono e ácidos orgânicos, ou redução de dióxido de carbono até a formação de metano, por meio de microorganismos anaeróbios. Esta é a etapa mais lenta do processo e, portanto controla as taxas de conversão, o que torna importante a manutenção de condições adequadas a fim de favorecê-la.

Em países limitados pela falta ou distribuição inadequada de energia, os biodigestores têm sido adaptados para atender as necessidades rurais. Na Índia comprovou-se que a utilização do esterco de gado para a produção de combustível não ocasiona a perda de suas características como adubo orgânico. A partir de 1939, o Instituto Indiano de Pesquisa Agrícola, em Kanpur, desenvolveu a primeira usina de gás de esterco. O sucesso da experiência levou a uma grande popularização do processo e, em 1950, formou-se o Gobar Gas Institute, cujas pesquisas conduziram a uma enorme difusão do biodigestor como forma de tratar o esterco e obter combustível sem perder o efeito fertilizante (GRANATO, 2003).

Outra utilização intensa das possibilidades da biodigestão deu-se na China, a partir de 1958, ampliando-se em 1980, com a instalação de cinco milhões de biodigestores de uma nova concepção, o modelo chinês, todos eles localizados ao sul do Rio Amarelo, onde as condições climáticas eram mais favoráveis à produção do biogás. Atualmente, cerca de 25 milhões de chineses usam biogás, principalmente para iluminação e cozimento. Aproximadamente 10.000 digestores de médio e grande porte se encontram em funcionamento em fábricas de alimentos, destilarias, fazendas de gado, entre outros. O biogás produzido em grandes unidades é transferido para estações centralizadas, onde é aproveitado na geração de potência mecânica (existem cerca de 422 estações com capacidade instalada de 5.849 HP) e potência elétrica (822 estações responsáveis pela produção total de 7.836 kW). Análises mostram que a taxa de retorno de investimento em biogás na China é elevada, com o período variando de um a quatro anos (FIORE, 1994).

Nas décadas recentes, a digestão anaeróbica de resíduos poluentes vem despertando grande interesse e sendo utilizada, com sucesso, para vários tipos de efluentes, tanto industriais quanto domésticos, em diversas partes do mundo (Pinto, 1999).

4.3.1 Influências no processo

Segundo Pinto (1999), são quatro os fatores que influenciam no processo de biodigestão anaeróbica, descritos a seguir (itens a, b, c, e d):

a) Temperatura

As várias experiências já realizadas indicam uma correlação entre a produtividade do processo de digestão anaeróbica e a faixa de temperatura de operação. Os microorganismos devem ser adaptados à faixa de temperatura de trabalho, o que permite classificá-los também

com relação a este parâmetro. As bactérias operando numa faixa inferior a 20°C são chamadas psicofílicas; outras operando entre 20 a 45°C são chamadas mesofílicas; acima de 45°C operam as bactérias termofílicas. Abaixo de 10°C o processo é, em geral, interrompido, visto que a produção de gás aumenta com a elevação da temperatura.

A faixa termofílica, portanto, apresenta taxas de conversão maiores e, assim, um menor tempo de residência do resíduo no digestor, além do seu volume poder ser menor, reduzindo-se os custos iniciais. Na faixa de 55 a 70°C, foi constatado que a celulose e outros polímeros alcançam as maiores taxa de hidrólise. Apesar disso, a maior parte dos digestores trabalha na faixa mesofílica, por estes serem mais confiáveis, não necessitando de controle de temperatura.

Assim a digestão termofílica é descrita como mais crítica e mais sensível devido à vulnerabilidade das bactérias, principalmente as metanogênicas, às variações de temperatura.

b) pH e acidez do meio

Os microorganismos são seres vivos que necessitam de um meio propício ao seu desenvolvimento; por isso, a acidez e a alcalinidade são fatores importantes no processo de digestão anaeróbia. O pH do processo deve ser mantido entre 6 e 8, podendo ser considerado ótimo de 7 a 7,2; seu controle é função do acúmulo de bicarbonato, da fração de CO₂ da parte gasosa, da concentração em ácidos voláteis ionizados e da concentração de nitrogênio sob a forma de amônia.

Inicialmente, as bactérias formadoras de ácidos fracionam a matéria orgânica e produzem ácidos voláteis. Daí resulta um aumento da acidez do meio e uma redução do pH. Quando as bactérias metanogênicas começam a agir, transformam os ácidos em metano, neutralizando o meio e elevando o pH. Outro fator que tende a elevar o pH é o teor de amônia, que aumenta quando as proteínas começam a ser digeridas. Um terceiro fator atuante sobre o pH do meio, agindo de modo a estabilizá-lo, é o bicarbonato. A concentração do íon bicarbonato é diretamente proporcional ao teor de dióxido de carbono e ao pH do meio. Assim, se as bactérias do primeiro grupo são muito rápidas e produzem mais alimentos do que as metanogênicas conseguem digerir, o dióxido de carbono liberando tornará maior a concentração de bicarbonato, o que impede a queda acentuada no pH.

Se o conteúdo de um digestor em operação torna-se muito ácido, o método mais comum de restaurar o pH ideal é interromper sua alimentação por alguns dias. Isto dá um tempo para as

bactérias metanogênicas reduzirem a concentração dos ácidos voláteis. Em digestores de grande porte, nos quais a interrupção da alimentação é complicada devido a problemas de estocagem do resíduo, o pH é usualmente elevado pela adição de hidróxido de cálcio, altamente alcalino.

c) Composição e Concentração do Resíduo

A composição do resíduo a ser tratado afeta a produção de biogás na proporção direta: quanto maior for o conteúdo de sólidos voláteis, os quais representam a quantidade de sólidos orgânicos presentes na amostra, e a disponibilidade de nitratos, fosfatos e sulfatos, maior será a produção de biogás.

Nota-se, também que a produção de metano é diretamente proporcional à demanda química de oxigênio (DQO). A presença de nitrogênio sob a forma de proteína é favorável, pois a mineralização conduz à amônia, que é útil no estabelecimento da alcalinidade.

Elementos nutrientes essenciais, como o ferro, e os micronutrientes, como o níquel e o cobalto, demonstram efeitos positivos na produtividade de metano. Já o enxofre em grande quantidade aumenta a produção de H_2S . Certos íons, como o K^+ , o Na^+ , o Ca^{2+} , a amônia iônica NH_4^+ , o Mg^{2+} e o S apresentam, na fermentação, uma propriedade singular: quando em quantidade diminutas são excitantes do metabolismo celular, manifestando, porém, propriedades inibidoras do mesmo metabolismo quando em concentrações mais elevadas. Ainda não é completamente conhecido o fenômeno da inibição; acredita-se que, em maiores concentrações, os íons atravessem a membrana celular, interferindo no mecanismo biológico da célula.

Alguns materiais orgânicos, especialmente os sintéticos, são também tóxicos para as bactérias. De um modo geral, os detergentes não biodegradáveis e aqueles à base de cloro são fortes inibidores do metabolismo bacteriano. O amoníaco (NH_3), em concentrações da ordem de 150 mg/l, é, igualmente, um forte inibidor. Também se deve cuidar para que não penetrem no digestor, resíduos de animais que tenham sido tratados com antibióticos ou água de lavagem contendo pesticidas.

d) Agitação

A agitação propicia um maior contato do substrato com as bactérias, distribuindo melhor o calor na biomassa e dando maior uniformidade dos produtos intermediários e finais da biodigestão, além de evitar a produção de uma crosta que pode obstruir a parte superior do biodigestor. A obtenção de boas condições hidráulicas no digestor é um ponto fundamental para o sucesso da exploração em longo prazo.

Vários são os casos de entupimentos nas tubulações causados pela formação de crostas em condições hidráulicas insatisfatórias.

Para a agitação pode-se utilizar mecanismos de acionamento direto com um eixo e hélice em contato com a biomassa ou pelo borbulhamento de biogás.

4.3.2 Biogás

É o gás obtido em biodigestores anaeróbicos, que resultam da conversão da biomassa em energia secundária, pelo processo de biodigestão anaeróbia de resíduos agro-industriais e domésticos, segundo LAMO (1991).

Segundo Granato (2003), além da proposta de se criar uma fonte de energia alternativa, a queima do biogás é muito mais vantajosa em relação a queima dos combustíveis fósseis porque no segundo caso a taxa de CO₂ na atmosfera sofre um aumento, o que não ocorre na primeira queima, pois a produção de CO₂ é equilibrada com o consumo do mesmo na fotossíntese da cana de açúcar.

Devido ao processo de fabricação e composição do efluente, o biogás apresenta contaminantes imediatamente após a produção, como o H₂S, sendo necessária a depuração do mesmo através de processo de filtração (GRANATO, 2003).

Devido à elevada concentração de metano no biogás produzido e, conseqüente potencial inflamável, as principais aplicações são geração de calor, frio e potência. O poder calorífico do biogás se situa em torno de 5.000 a 7.000 kcal.m⁻³, no entanto, este potencial poderia atingir 12.000 kcal.m⁻³ caso o CO₂ fosse retirado da mistura (CORTEZ et. al, 2007).

Na indústria sucroalcooleira, conforme Granato (2003), as opções para o aproveitamento do biogás são as seguintes:

- ✓ Queimado, em sua totalidade, na caldeira para geração de vapor e acionamento da moagem da cana. Procedendo-se assim, cerca de 25 a 28% do bagaço atualmente queimado nas caldeiras pode ser destinado para outros fins;
- ✓ Utilização da terça parte do biogás, após purificação e produção de gás metano em substituição aos combustíveis utilizados na agroindústria durante o período da safra e, o restante queimado nas caldeiras provocando uma sobra de 18% do bagaço;
- ✓ Utilizar a totalidade do biogás para acionar uma turbina a gás, conjugada a um gerador elétrico. Este tipo de tecnologia produz 2,5 vezes o total de energia elétrica necessária em uma destilaria autônoma.

Fernandes (2007) afirma que o potencial de geração de biogás a partir da vinhaça é variável conforme seu conteúdo de matéria orgânica biodegradável durante o processo. A aplicação do processo fermentativo anaeróbio tem envolvido a utilização de reatores de grandes volumes devido à incapacidade desses sistemas convencionais na retenção da população microbiana de elevado tempo de duplicação. Se um sistema estiver submetido a um tempo de retenção celular menor que o tempo de duplicação médio das bactérias limitantes do processo, ocorrerá a lavagem das bactérias e a conseqüente impossibilidade de realização do processo.

Se o processo em estudo for utilizado em escala nacional pode-se gerar em torno de três bilhões de m³/ano de metano, obtendo-se assim uma fonte de energia alternativa que representa 1,27 % da energia elétrica consumida nacionalmente, segundo informativo do Ministério de Minas e Energia (1998).

De acordo com Granato (2003), a Biodigestão Anaeróbia da vinhaça torna-se interessante, pois, além de fonte de geração de energia elétrica, a vinhaça não perde seu valor nutritivo como adubação orgânica, mantendo os teores de potássio, podendo assim após a biodigestão ser utilizada normalmente na fertirrigação.

4.4 Biodigestores anaeróbios

Os biodigestores consistem basicamente numa câmara de fermentação na qual, fora do contato com a luz e o ar, é processada a biodigestão da matéria orgânica, numa campânula que armazena o gás produzido ou, simplesmente, numa saída para esse gás, numa entrada do substrato a ser fermentado e numa saída para o efluente produzido pelo processo. É uma tecnologia simples, cuja principal preocupação é a manutenção das propriedades

fermentativas da biomassa bacteriana. São muitos os modelos de biodigestores, alguns com importantes detalhes construtivos, que dependem do tipo de aplicação a que são destinados e, também, do nível tecnológico disponível. Eles visam satisfazer determinadas demandas específicas para cada caso, como, por exemplo, o saneamento, o atendimento de uma demanda energética e a utilização do material biodegradado como fertilizante. O biodigestor deve ser concebido com o objetivo de proporcionar essas vantagens citadas, embora seja reconhecidamente difícil atender as três de forma integrada e otimizada (LETTINGA, 1991).

Conforme Gomes (1980), um biodigestor consta essencialmente de:

- ✓ Um tanque digestor que contém a biomassa e no qual se realizam as ações fermentadoras, acidogênicas e metanogênicas dos diversos tipos de bactérias;
- ✓ Um armazenador para o biogás produzido, que pode ser um gasômetro de abóbada fixa ou de campânula flutuante.

Os biodigestores classificam-se, conforme o sistema de alimentação dos mesmos, em:

- ✓ Biodigestores de alimentação contínua: Recebem a carga de biomassa sob forma “semilíquida” diariamente ou periodicamente, e a remoção do biofertilizante se faz com o biodigestor em funcionamento. O suprimento de gás e biofertilizante realiza-se de forma contínua. São os mais simples, práticos e difundidos. Os modelos mais empregados são o chinês e o indiano. Adaptações dos dois modelos, com a utilização de invólucros plásticos infláveis, estão sendo usadas em escala cada vez maior.
- ✓ Biodigestores de alimentação intermitente ou de batelada: São carregados com a carga total de biomassa, a qual fica retida até que seja completado o processo de biodigestão. Este processo é lento, porque o material lançado é, no caso, de biodecomposição demorada. Esgotada a capacidade de produção da biomassa colocada, o biodigestor é esvaziado e despejada nova carga de matéria-prima. Esse tipo não é usado em instalações de pequeno porte, pois deverá haver uma unidade paralela, que entre em operação quando a outra estiver sendo esvaziada, recarregada e entre na fase de produção de biogás. Usa-se quando não existe continuidade no suprimento das biomassas que nele devem ser colocadas.

4.4.1 Biodigestores de fluxo ascendente

O reator de fluxo ascendente com leito de lodo (UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket) é um biodigestor de elevada eficiência mais estudado e aplicado em todo mundo. Seu princípio é bem simples: o efluente é bombeado de baixo para cima, através do reator, que se encontra sob estritas condições anaeróbias, a uma velocidade de ascensão que varia de 0,5 a 1,5 m/h; dentro dele ocorre um processo de seleção que pode resultar no crescimento de microorganismos anaeróbios em conglomerados compactos (grânulos) de tamanho variando entre 0,5 e 5 mm. Estes grânulos são poderosos biocatalíticos que podem converter a matéria orgânica degradável em biogás, de maneira rápida e completa, com cargas de DQO variando de 10 a 25 kg DQO por m³ de reator por dia. A representação esquemática de um reator do tipo UASB é mostrada na Figura 2 (PINTO, 1999)

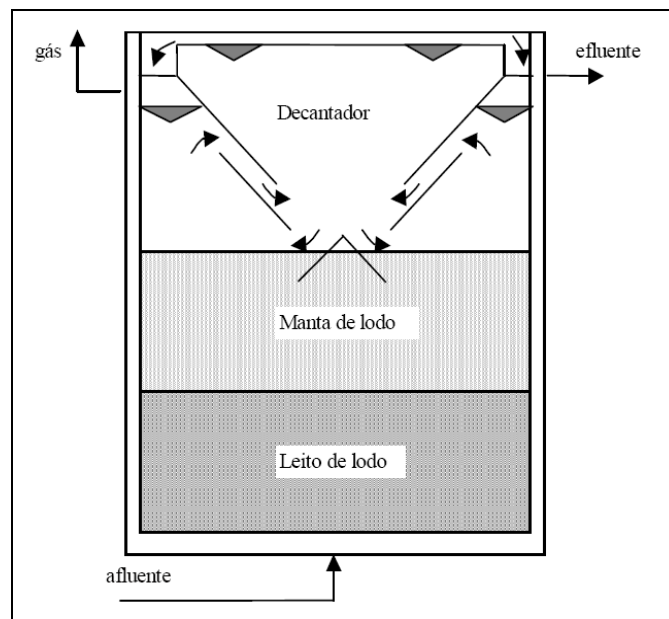


Figura 2. Representação esquemática de um biodigestor de fluxo ascendente.
Fonte: IPT (1990).

O sucesso da operação do reator, de acordo com Granato (2003), depende da formação satisfatória dos grânulos no início do processo, pois ela permite à biomassa ativa ficar no interior do reator independentemente da velocidade do fluxo, mantendo-se uma boa eficiência de conversão a taxas de alimentação relativamente elevadas. Assim, o problema da formação dos grânulos em biodigestores de fluxo ascendente consiste em se conseguir uma ligação, entre as espécies bacterianas envolvidas, da ordem de nanômetros de proximidade. O

desenvolvimento de grânulos se dá através de uma combinação das bactérias metanogênicas no interior e das bactérias acidogênicas nos 200 microns externos.

O mesmo autor alega ainda que, as principais características do reator UASB são o sistema de distribuição do afluente e o chamado separador de três fases. O substrato a ser tratado é distribuído ao longo da parte inferior, através de uma densa camada de lodo anaeróbico. O resíduo flui na direção da parte superior, passando pelo leito de lodo, no qual sua DQO é parcialmente convertida em biogás. No topo do reator, o separador de três fases atua sobre o efluente tratado, o lodo bacteriano granulado, mais pesado, volta a se depositar no fundo e o efluente sai pela parte mais alta do reator.

Segundo Pinto (1999), um bom contato entre o resíduo a ser tratado e o lodo anaeróbico é de fundamental importância para o desempenho do reator, por isso é necessário um sistema de entupimento. Em geral, os reatores UASB podem ser limpos durante a operação, não sendo preciso esvaziá-los para realizar a manutenção.

Conforme o autor supracitado, a retenção da biomassa dentro do reator influi de maneira decisiva na capacidade de conversão da DQO em biogás, o que chama atenção, também, para a importância do separador. Este deve ser construído com um material de qualidade para minimizar os riscos de corrosão, causada quase sempre pelo H_2S , presente em pequenas quantidades no biogás, e permitir a inspeção e, quando necessário, a limpeza.

Várias modificações na configuração dos reatores UASB foram propostas para aperfeiçoar o desempenho do tratamento, o que tem proporcionado uma maior velocidade de ascensão do material em tratamento, em consequência, um menor tempo de retenção e, também, um crescimento na taxa de carga orgânica processada. A principal alteração vem acompanhando a tendência de um aumento na relação altura/diâmetro nos reatores UASB, com objetivo de melhoria do desempenho e economia de espaço, que consiste na expansão ou ampliação do leito de lodo e, portanto, maior contato do resíduo com a biomassa bacteriana. Esta idéia deu origem a uma nova família de reatores chamados reatores de leito de lodo granular expandido (EGSB), dentre os quais está o reator de circulação interna (IC) 24, mais moderno e com melhor desempenho (DRIESSEN, 1996).

A tecnologia de circulação interna, de acordo com Granato (2003), é um desenvolvimento da empresa holandesa PAQUES BV, que possui sua patente e utiliza o mesmo processo de separação realizado pelo separador de três fases para a retenção da biomassa. De fato, o reator IC consiste de dois reatores UASB superpostos um sobre o outro, um alimentado com alta

carga orgânica e o outro com uma carga menor. Sua característica especial é a separação do biogás em dois estágios dentro do reator.

Afirma ainda que o gás coletado no primeiro estágio, na metade da altura do reator, produz uma pressão ascendente que é usada para promover uma circulação interna do substrato. O sistema IC é um reator delgado com altura entre 16 e 24 m e superfície de área relativamente pequena.

O afluente é bombeado para dentro do reator via sistema de distribuição, onde se mistura entre o lodo reciclado e o efluente. O primeiro compartimento contém o leito de lodo granular expandido, onde a maior parte da DQO é convertida em biogás. O biogás produzido nesse compartimento é coletado pelo primeiro conjunto de separadores e usado para gerar a pressão que permite que a mistura de resíduo em processamento e lodo bacteriano sejam carregadas pelo primeiro duto de fluxo ascendente, até um separador gás/líquido no topo, onde ocorre a separação. O biogás, livre da mistura, deixa o sistema. A mistura é direcionada, pelo primeiro duto de fluxo descendente, de volta ao fundo do reator, onde é novamente misturada ao leito de lodo e ao afluente que entra no reator. O efluente do primeiro compartimento sofre um pós-tratamento no segundo (compartimento de polimento), onde a DQO restante é removida. O biogás produzido nesse compartimento é coletado no separador superior, enquanto que o efluente transborda, deixando o reator (VERSTRAETE, 1996).

Segundo Pinto (1999), a taxa de recirculação dos reatores IC depende da DQO do afluente, pois é proporcionada, como já foi dito, pela produção de biogás, sendo, portanto, autorregulada: quanto maior a concentração de DQO do afluente, maior a pressão do biogás produzido no primeiro compartimento e mais resíduo em processamento e lodo são recirculados pelo primeiro duto de fluxo ascendente; e, similarmente, quanto menor a concentração de DQO do afluente, menor a pressão do biogás e menor a taxa de recirculação interna do efluente.

A recirculação permite uma diluição e uma efetiva mistura do afluente adentrando no reator, ou seja, um melhor condicionamento do resíduo a ser processado. O leito concentrado de lodo anaeróbio no primeiro compartimento é expandido e fluidizado pelo fluxo elevado de afluente, da recirculação e da produção de gás. O contato eficaz entre a biomassa e a matéria a ser processada resulta em grande atividade bacteriana, permitindo maior carga orgânica e maiores taxas de conversão. Testes comparativos mostraram que os grânulos de microorganismos nos sistemas IC chegam a apresentar até o dobro de atividade metanogênica em relação aos grânulos provenientes de reatores UASB simples (Pinto, 1999).

A retenção de biomassa bacteriana dentro do reator, conforme Granato (2003), é realizada no compartimento superior facilitada por uma menor taxa de alimentação desse compartimento e, portanto, num tempo de retenção relativamente maior, o que contribui, também, para a remoção quase completa da DQO. Note que a pressão do biogás produzido no segundo compartimento, embora menor que a do primeiro, também contribui para o processo de recirculação através do segundo duto de fluxo ascendente.

A turbulência produzida pelo biogás nesse compartimento é relativamente baixa, assim como a velocidade superficial do líquido, já não ativa a recirculação interna nessa seção. Ambos os fatores proporcionam boa retenção da biomassa, quando comparada com as condições nos reatores UASB, apesar de uma maior taxa de alimentação do afluente. Já os reatores UASB trabalham com taxa de alimentação e velocidade de ascensão de, no máximo, 15 a 20 kgDQO/m³.dia e 1,5 m/h, espera-se que os reatores IC possam trabalhar com taxas de alimentação de até 40 kgDQO/m³.dia e velocidade de ascensão de 8 a 10 m/h (GRANATO, 2003).

De acordo com Lamo (1991), para o caso da biodigestão da vinhaça, estão em operação biodigestores UASB, com sucesso comprovado, sendo que este equipamento é dimensionado levando-se em conta:

- ✓ Produção máxima diária de álcool da destilaria em estudo;
- ✓ Volume de vinhaça a ser gerado em consequência dessa produção;
- ✓ DQO do efluente, dado devido a sua origem do processo de fabricação;
- ✓ Carga orgânica a ser removida por dia.

A partir desses dados determina-se o volume do reator (diâmetro e altura), possibilitando o fornecimento da produção de biogás para o sistema.

Na tabela 2, mostram-se valores provais da eficiência de remoção de DQO em processos com reator UASB.

TABELA 2. Eficiência de remoção de DQO em reatores UASB

DQO vinhaça (Kg DQO/m³.dia)	Eficiência (%)	Referências
19,5	57,1	Cabello et all, 2009
15,0	65,0	Szymanski et all, 2010
40,0	70,0	Granato, 2003
27,5	72,0	Souza, 2000
29,0	69,0	Salomon, 2007

Cortez et al. (2007) citam como principais inconvenientes do processo de biodigestão anaeróbia:

- ✓ Maior tempo de detenção, em comparação com sistemas aeróbios;
- ✓ Produção de gases com odor desagradável e corrosivos, que podem ser inconvenientes se o reator não for bem projetado.

4.5 Resíduos na Indústria Sucroalcooleira

Os processos produtivos em uma usina sucroalcooleira compreendem diversas fases de produção, conforme Figura 3.

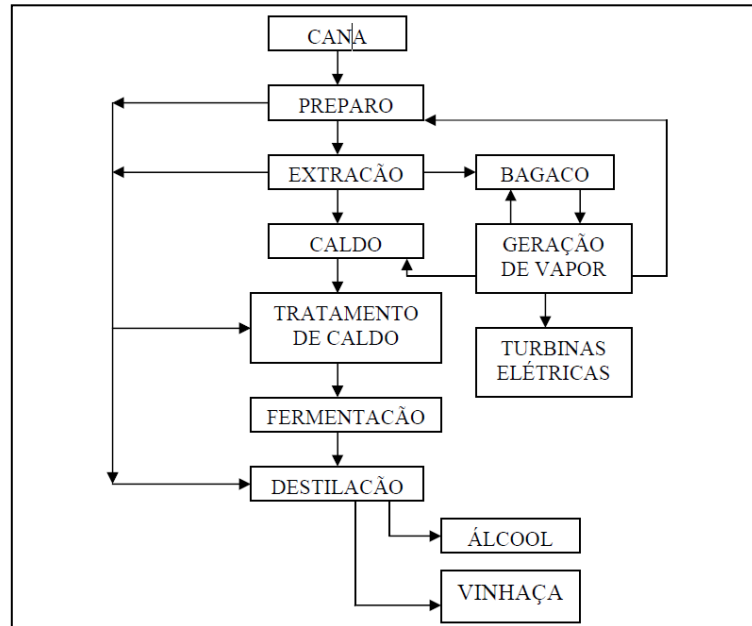


Figura 3. Fluxograma do processo produtivo em uma usina sucroalcooleira.

Fonte: Camilo (2006).

As atividades relacionadas com esse processo, segundo Roberto (2007), são as seguintes:

✓ Recepção da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é transportada da lavoura à usina onde primeiramente é pesada e, em seguida, retirada uma amostra para análise do teor de sacarose. A cana é então descarregada no pátio enquanto aguarda processamento.

✓ Lavagem da cana-de-açúcar

Com o objetivo de diminuir a quantidade de detritos (areia e terra) que danificam equipamentos e interferem na qualidade do caldo, a cana passa pelo processo de lavagem na mesa alimentadora onde a cana é descarregada. Na maioria dos casos, a água de lavagem passa por reuso até saturação, onde é encaminhada aos tanques de vinhaça.

✓ Moagem

A cana é encaminhada para moendas compostas por rolos que a esmagam extraindo o caldo e obtendo o bagaço, o qual é encaminhado à caldeira e queimada para geração de vapor.

✓ Tratamento do caldo

Nesta fase as impurezas contidas no caldo são removidas através de processos de floculação e decantação, as quais ficam retidos em filtros de tela, vindo a compor a torta de filtro, utilizada como fertilizante em áreas de plantio.

✓ Destilação

Após o tratamento do caldo, segue-se o processo de fermentação onde os açúcares são transformados em álcool. Nesta fase do processo é gerada a vinhaça.

É possível afirmar que para cada 1.000 t de cana processada gera-se, durante todo o processo produtivo, 270 t de bagaço; 35 t de torta de filtro e 360 m³ de vinhaça (THEODORO, 2005).

O principal resíduo da cana é a palha, constituída por ponteiros e folhas. A palha representa aproximadamente 25% a 30% da energia total na planta, rendendo até 10 t/ha/ano de matéria seca. Os resíduos da cana-de-açúcar, o bagaço e o vinhoto, são gerados em grandes quantidades e possuem alto valor econômico como produtos derivados (BRAUNBECK et al, 2005).

Lamo (1991) demonstrou o potencial energético de uma tonelada de cana pela Tabela 3. Observa-se que uma tonelada de cana pode gerar 909,90x10³ kcal de energia (álcool + biogás), porém caso não se aproveite o biogás resultante da biodigestão da vinhaça deixa-se de recuperar 7,5% do total de energia disponível em uma tonelada de cana.

TABELA 3. Balanço energético de uma tonelada de cana.

OBTENÇÃO/TONELADA DE CANA	VALOR ENERGÉTICO (KCAL)	%
250 kg de bagaço	450 x 10 ³	49,5
70 litros de álcool	392 x 10 ³	43,0
11,83 m ³ de biogás	67 x 10 ³	7,5
Energia Total	909 x 10 ³	100,0

Fonte: Lamo (1991)

4.6 Caracterização e Geração e Tratamento da Vinhaça

A vinhaça é considerada o principal subproduto da indústria sucroalcooleira, devido ao seu elevado volume e potencial poluidor (LUDOVICE, 1997).

Quimicamente, a composição varia de acordo com o tipo de solo, a espécie da cana, o método de colheita e o processo industrial usado na produção do etanol. A cor, o conteúdo sólido total e a acidez são parâmetros que podem variar de acordo com o tipo de vinhoto e o processo empregado (BRAUNBECK *et al*, 2005).

A vinhaça é produzida na razão de 10-14 litros por litro de álcool, constituindo-se no maior efluente da indústria do álcool, é rica em nutrientes minerais como potássio, cálcio e enxofre, representa um problema ecológico devido à sua alta DBO (Demanda Biológica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio).

Valores de DQO da vinhaça *in natura* são demonstrados na Tabela 4.

TABELA 4. Valores de DQO da Vinhaça *in natura*.

DQO (mg/L)	Referências
15.000	Szymanski et all, 2010
19.500	Cabello et all, 2009
21.475	Lyra, 2003
25.000	Pinto, 1999
26.771	Brito, 2010
27.500	Souza, 2000
28.000	Barros,2008
28.450	Lamonica, 2006
29.000	Salomon, 2007
31.350	Sabbad et all, 2006
40.000	Granato, 2003
45.000	Shultz, 2009
45.000	Camargo, 1990

Ela é composta basicamente por todas as substâncias introduzidas na produção e transformação da cana-de-açúcar, com exceção de açúcar e álcool. Foi considerada uma

ameaça ambiental no início do Proálcool por causa do grande potencial de poluição (MACEDO *et al*, 2005).

Admite-se que os sólidos suspensos na vinhaça equivalem, em geral, a menos de 10% dos sólidos totais e que sua carga orgânica corresponda, em média, a 300 g.DQO.L⁻¹álcool (ELIA NETO, 2007).

A fim de regulamentar a prática de disposição final da vinhaça o governo federal, através da Portaria MINTER nº 323, de 29/11/1978, proibiu a disposição ou eliminação da vinhaça em leitos d' água, estando sujeito à multa a usina que descumprir a proibição (CORAZZA, 1996).

A Resolução CONAMA nº 002/34 (BRASIL, 1984) determina a realização de estudos e apresentação de resolução contendo normas para controle da poluição causada pelos efluentes das destilarias de álcool e pelas águas de lavagem da cana.

Pela Resolução CONAMA nº 001/86 (BRASIL, 1986) determina a obrigatoriedade da realização da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) para novas indústrias instaladas ou qualquer ampliação efetuada nas já existentes.

Através dos resultados obtidos e publicados pela Copersucar (1997), obtém-se que dos resíduos da fabricação do álcool, a vinhaça é sem dúvida, o mais importante, não só em termos de volume gerado, mas também em potencial poluidor. Sua eliminação vem se apresentando como um grande problema desde o início da fabricação do álcool no Brasil. Inúmeros problemas ecológicos, sociais, políticos e econômicos gerados pela eliminação da vinhaça em leitos d'água estão registrados em literaturas que listam as disputas que envolvem usineiros e população. Tal prática é vetada por dispositivos legais desde 1934, por diversos artigos do Código Penal Brasileiro, Leis Estaduais e Portarias. Já a partir de novembro de 1978, após o Proálcool estar implantado o Ministério do Interior publicou a Portaria n.º 323 proibindo terminantemente o lançamento direto e indireto de vinhaça em qualquer coleção hídrica pelas destilarias, obrigando as indústrias a apresentarem projetos para a implantação de sistemas para utilização da vinhaça. Inúmeras alternativas para utilização da vinhaça foram propostas, tais como: concentração do resíduo, fertirrigação, ração animal, fabricação de tijolos, vinhodutos marítimos e geração de biogás através da Digestão Anaeróbia.

Uma das melhores tecnologias de aproveitamento do vinhoto é a biodigestão. Tem a vantagem do recolhimento nas próprias instalações das destilarias e usinas, ao mesmo em que se produz um bom fertilizante e se recupera energia por meio da geração de biogás. Esse método do recolhimento é muito interessante do ponto de vista da substituição de energia,

porque a indústria da cana-de-açúcar produz uma grande quantidade de vinhoto e ainda depende do óleo diesel para o transporte da cana. O óleo diesel pode ser substituído por biogás nos caminhões com motores a diesel. (BRAUNBECK et al, 2005).

As características físico-químicas apresentadas pela vinhaça, salvo variações, estão expressas na Tabela 5.

TABELA 5. Características Físico-químicas da Vinhaça *in natura* e biodigerida.

Parâmetro	Vinhaça (antes da biodigestão)	Vinhaça (depois da biodigestão)
pH	4,0	6,9
DQO (mg/l)	29.000	9.000
N Amoniacal (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

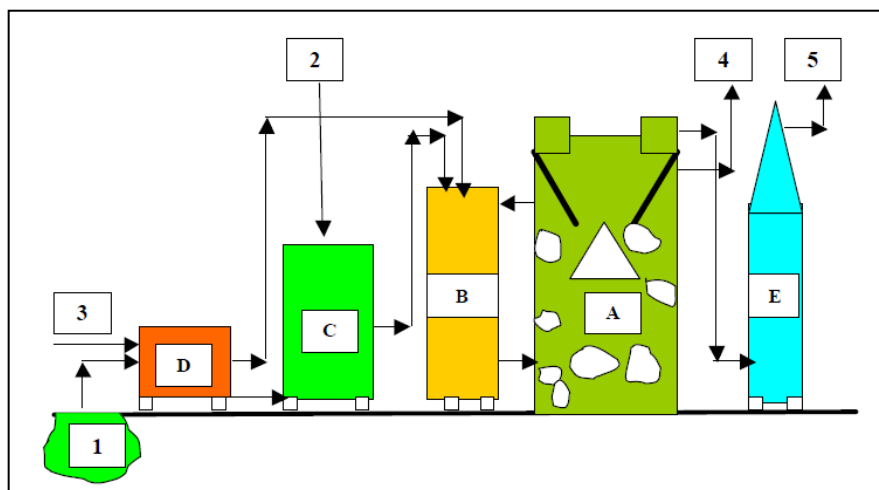
Fonte: Salomon (2007).

4.6.1 Biodigestão anaeróbia da vinhaça

A tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça é o que se chama de “tecnologia limpa”, porque possui as características de auxiliar no uso do recurso natural, no caso a biomassa da cana, da maneira mais eficiente possível, e gerar produtos e rejeitos com reduzido potencial de danos ecológicos (OECD, 1995). Além disso, ela pode ser uma tecnologia lucrativa, dependendo da utilização que se fizer do biogás, ou da estrutura de contabilização dos custos, e este é, sem dúvida, fato importante para a sua difusão e sucesso (PINTO, 1999).

Na prática através da vinhaça, obtemos 0,30 litros de CH₄/gDQO consumida, sendo que a proporção de CH₄ no biogás é 55% a 65% (sendo o restante principalmente CO₂), conforme o fluxo básico para produção do biogás através da biodigestão anaeróbia. Como o Biogás apresenta alguns contaminantes imediatamente após a sua produção, é necessário que seja feita uma depuração do mesmo utilizando filtros, compressores, resfriadores, bombas e outros equipamentos (GRANATO, 2003).

A Figura 4 demonstra, segundo Lamo (1991), o esquema básico da biodigestão anaeróbia da vinhaça, descrevendo as etapas principais pelas quais o efluente deverá passar, para se obter um biogás de qualidade aceitável, não contendo contaminantes como normalmente ocorre em outros processos de biodigestão.



- | | | | |
|----|--------------------------------|----|----------------------|
| 1- | Vinhaça | A- | Reator Anaeróbico |
| 2- | Nutrientes e Álcalis | B- | Tanque Equalizador |
| 3- | Água do Trocador de Calor | C- | Tanque de Nutrientes |
| 4- | Efluentes do Reator Anaeróbico | D- | Trocador de Calor |
| 5- | Biogás | E- | Gasômetro |

Figura 4. Esquema Básico da Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça.
Fonte: Lamo (1991).

Para o controle a operação de um biodigestor, o critério utilizado deve ser a estimativa da produção potencial de biogás a partir de um resíduo, considerando os seguintes fatores (CORTEZ et. al, 2007):

- ✓ A produção de metano, mantendo-se constantes os demais fatores intervenientes, é proporcional a DQO consumida no reator. Adota-se o valor médio de 0,35 l de CH₄ produzidos por 1 g de DQO consumida (CNTP);
- ✓ Parte do biogás produzido é dissolvido no efluente;
- ✓ Parte da DQO é convertida em biomassa.

5. METODOLOGIA

Para a realização do presente trabalho, foram utilizados dados de uma usina sucroalcooleira bioenergética, localizada no Centro-Oeste do Estado de Minas Gerais, cuja capacidade média de produção de álcool, durante as safras de 2008, 2010 e 2011 foram respectivamente de 576, 299 e 221 m³ por dia.

Destaca-se que a safra de 2009 não foi avaliada devido à ausência de um medidor de vazão da vinhaça. As informações da safra de 2008 foram retiradas do Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental (RADA).

Os dados referentes a volumes de produção de álcool, geração de vinhaça e consumo de energia elétrica foram obtidos na Central de Informações da referida empresa.

Vale ressaltar que foi avaliada somente a energia consumida na planta industrial, devido à dificuldade de armazenamento desta para uso na área agrícola, a partir da instalação do processo de biodigestão.

Os dados referentes ao dimensionamento de biodigestores e turbinas a gás foram obtidos junto a fabricantes e fornecedores detentores da tecnologia.

5.1 Parâmetros obtidos na Central de Informações da empresa

Os parâmetros utilizados na presente pesquisa fornecem dados de álcool produzido, vinhaça gerada, energia elétrica consumida adquirida da concessionária, o custo da energia adquirida e resultados gerados.

5.1.1 Biodigestor considerado para cálculo da geração de biogás

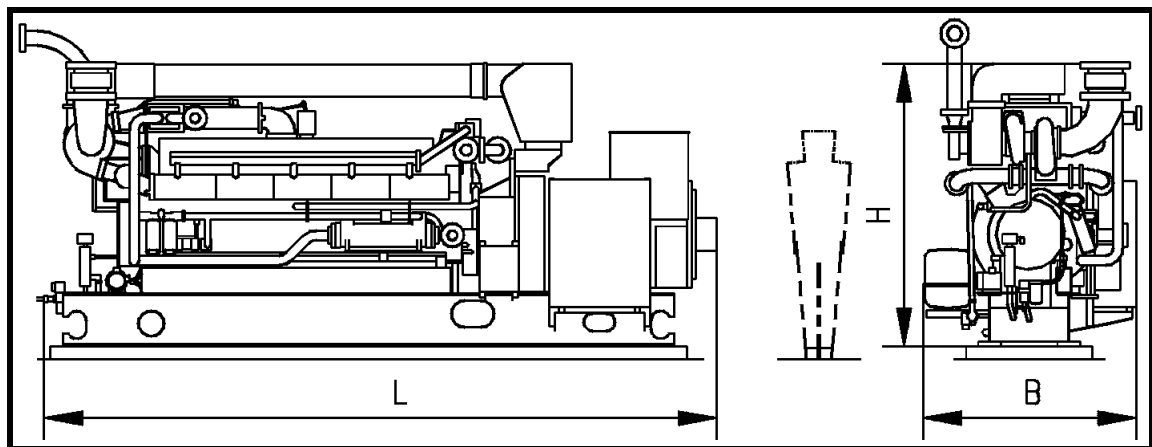
De acordo com fornecedores detentores desta tecnologia, recomenda-se a utilização de reatores de fluxo ascendente com leito de lodo (UASB), de 2.500 m³ de volume unitário, com 26,0 m de diâmetro e 4,75 m de altura, conforme demonstrado na Figura 5.



Figura 5. Instalação de Biodigestor UASB.
Fonte: Granato (2003).

5.1.2 Turbina a Gás Considerada

Neste trabalho foi considerado o uso de uma turbina a gás modelo J 320V81 – Container, com capacidade de 1.000 kWh, conforme demonstrado na Figura 6.



$L = 12.192 \text{ mm}$ $B = 2.438 \text{ mm}$ $H = 2.591 \text{ mm}$ Peso do conjunto = 27.000 kg

Figura 6. Turbina a Gás Modelo J 320V81.
Fonte: Granato, 2003.

5.2 Cálculos do projeto

5.2.1 Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça

O processo de Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça será avaliado para instalações com Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) de 20,78 horas, média dos valores encontrados nas referências descritas Tabela 6.

TABELA 6. TDH em reatores UASB

TDH (horas)	Referências
24,00	Cabello <i>et al</i> , 2009
51,12	Szymanski <i>et al</i> , 2010
12,00	Granato, 2003
10,80	Souza, 2000
6,00	Salomon, 2007

A eficiência de remoção de DQO foi adotada a partir da média dos valores mencionados na revisão bibliográfica.

A vazão média informada para o dimensionamento do biodigestor UASB é 11.520 m³/dia, correspondente a safra de 2008, onde se obteve maior geração de vinhaça. Este valor equivale à média horária de 480 m³/h. Então o volume total de biodigestão será calculado pela seguinte equação:

$$V = Q_{\text{méd}} \times \text{TDH}$$

onde:

V = volume total do reator (m³);

Q_{méd} = vazão média (m³/h);

5.2.2 Queima do Biogás nas Turbinas

Para queima total do biogás gerado foi considerado a instalação de conjuntos de turbinas a gás modelo J 320V81 – Container –, com capacidade de 1.000 kWh cada.

5.2.3 Metodologia para cálculo da Quantidade de Energia Gerada

A metodologia utilizada para cálculo da obtenção da quantidade de energia gerada pela biodigestão anaeróbica da vinhaça segue o procedimento sugerido por Lamo (1991), qual seja:

$$CO = VVG \times DQO$$

onde:

CO = carga orgânica (kg.DQO/dia);

VVG = volume de vinhaça gerada;

DQO = 29.388 mg/l (média dos valores de DQO mencionados na revisão bibliográfica).

A Produção de Biogás pela biodigestão anaeróbica (PB) da vinhaça é obtida, pela eq.:

$$PB = CO \times E \times F$$

onde:

E = eficiência de remoção de DQO do processo, considerado de 67%;

F = fator de conversão de biogás por DQO removido, considerado 0,45N.m³/kgDQO removido, (Lamo, 1991).

A quantidade de energia do biogás (GEB) é dada pela eq.:

$$\mathbf{GEB = PB \times PCIB}$$

onde:

PCIB = poder calorífico inferior do biogás, considerado 5.100 kcal/Nm³, (Lamo, 1991).

5.2.4 Produção de Energia Elétrica

Pode-se estimar a quantidade de energia elétrica produzida pela combustão do biogás (PEEB) utilizando-se da relação:

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

onde:

E1 = eficiência da turbina a gás, considerada 35% (Lamo, 1991).

5.2.5 Cálculo de custo de instalação e retorno do investimento.

Segundo dados obtidos pela Central de Informações junto ao Departamento de Manutenção Elétrica da empresa em estudo, o custo médio da empresa em questão é de R\$ 366.816,60/safra.

De acordo com Costa (2007), o custo da instalação de biodigestores é de, aproximadamente, R\$ 1.000 por m³ instalado.

Segundo Wagner (2002), o custo de instalação de turbina por kWh é de US\$ 160,00.

O tempo necessário para o retorno do investimento, calculou-se desconsiderando taxas de juros e remuneração de capital

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Dados de álcool produzido

Foram utilizados dados da produção de álcool fornecidos pela Central de Informações, referente às safras de 2008, 2010 e 2011.

Nas figuras 7 e 8 são demonstrados esta produção nos anos de 2010 e 2011



Figura 7. Gráfico demonstrativo da produção de álcool em 2010.



Figura 8. Gráfico demonstrativo da produção de álcool em 2011.

O armazenamento deste álcool produzido é efetuado em tanques demonstrado na Figura 9, e essa produção é realizada na destilaria conforme Figura 10.



Figura 9. Foto Tanques de armazenamento.
Fonte: Dados da pesquisa.



Figura 10. Foto Destilaria da usina sucroalcooleira.
Fonte: Dados da pesquisa.

6.1.1 Dados da vinhaça gerada

Foram utilizados dados de vinhaça, fornecidos pela Central de Informações, referente às safras de 2008, 2010 e 2011.

Nas figuras 11 e 12 serão demonstrados esta produção nos anos de 2010 e 2011

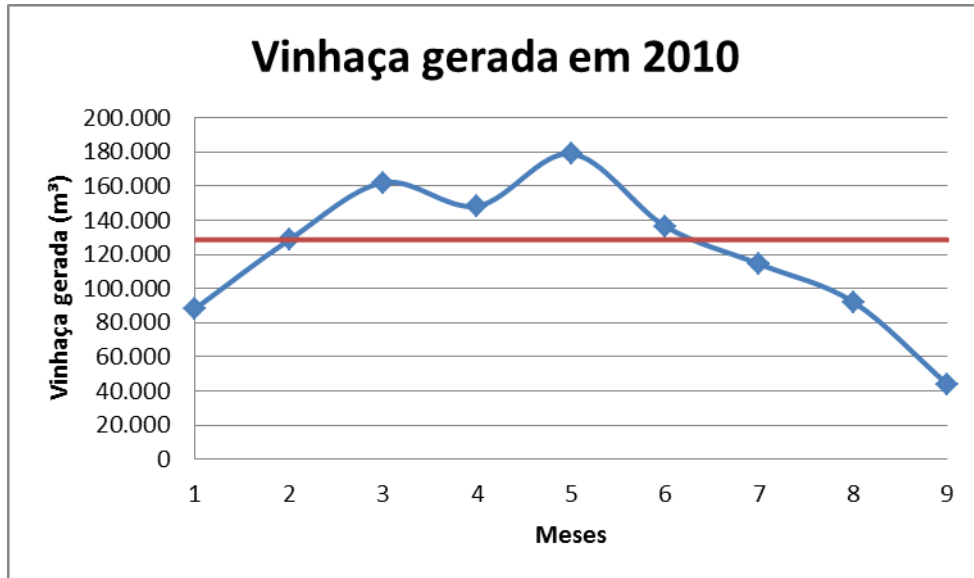


Figura 11. Gráfico demonstrativo da geração de vinhaça em 2010.



Figura 12. Gráfico demonstrativo da geração de vinhaça em 2011.

A título de informação o volume diário do resíduo gerado durante a safra de 2008 é 11.520 m³, dado este retirado do RADA da empresa em estudo.

Durante as safras de 2010 e 2011, os volumes diários de vinhaça gerados, respectivamente, foram de 4.047 e 2.984 m³, medido através do aparelho fluxômetro instalado no processo final de resfriamento da vinhaça, conforme demonstrado na Figura 13.



Figura 13. Foto Fluxômetro.
Fonte: Dados da pesquisa.

6.1.2 Dados referentes à energia consumida adquirida da concessionária

Utilizou-se dados de consumo médio da indústria, durante as safras de 2008, 2010 e 2011 fornecidos pela Central de Informações junto ao Departamento de Manutenção Elétrica da empresa em estudo.

O consumo médio mensal foi de 135.858 kWh

6.1.3 Dados referentes ao custo da energia adquirida da concessionária

Utilizaram-se dados de custo mensais fornecidos pela Central de Informações junto ao Departamento de Manutenção Elétrica da empresa em estudo.

O custo médio da empresa em questão é de R\$ 36.681,66/mês, sendo R\$ 0,27 por kWh consumido.

6.2 Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça

Como o processo de Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça será avaliado para instalações com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 20,78 horas e eficiência de remoção de DQO de 67% (adotados a partir da média dos valores mencionados na revisão bibliográfica).

A vazão média informada para o dimensionamento do biodigestor UASB é 11.520 m³/dia, correspondente a safra de 2008, onde se obteve maior geração de vinhaça. Este valor equivale à média horária de 480 m³/h. Então o volume total de biodigestão será:

$$V = Q_{\text{méd}} \times \text{TDH}$$

$$V = 480 \text{ m}^3/\text{h} \times 20,78 \text{ h}$$

$$V = 9.974,4 \text{ m}^3$$

Portanto, para o tratamento de 100% da vinhaça gerada será necessário a utilização de 4 unidades biodigestoras com capacidade volumétrica de 2.500 m³.

Incluindo-se uma margem de segurança no sistema, visando inclusive paradas para manutenção, serão necessárias 6 unidades. Com isso, o volume total que comportarão os biodigestores será de 15.000 m³/dia.

6.3 Disponibilidade de energia elétrica produzida pela biodigestão

A fim de identificar a disponibilidade de energia elétrica produzida pela biodigestão, a partir da média das safras de 2008, 2010 e 2011, procedeu-se ao seguinte cálculo:

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

$$\text{CO} = 185.500 \text{ m}^3/\text{mês} \times 29.388 \text{ mg/l}$$

$$\text{CO} = 181.715,8 \text{ kgDQO/dia}$$

A Produção de Biogás pela biodigestão anaeróbica (PB) da vinhaça é obtida, pela eq:

$$PB = CO \times E \times F$$

$$PB = 181.715,8 \text{ kgDQO/dia} \times 0,67 \times 0,45 \text{ Nm}^3/\text{kgDQO}$$

$$\mathbf{PB = 54.787,31 \text{ Nm}^3/\text{dia}}$$

A quantidade de energia do biogás (GEB) é dada pela eq.:

$$GEB = PB \times PCIB$$

$$GEB = 54.787,31 \text{ Nm}^3/\text{dia} \times 5.100 \text{ kcal/Nm}^3$$

$$\mathbf{GEB = 279.415.300 \text{ kcal/dia}}$$

6.3.1 Produção de Energia Elétrica

Pode-se estimar a quantidade de energia elétrica produzida pela combustão do biogás (PEEB) utilizando-se da relação:

$$PEEB = GEB \times E1$$

$$PEEB = 279.415.300 \text{ kcal/dia} \times 0,35$$

$$PEEB = 97.795.355 \text{ kcal/dia}$$

Considerando que $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$,

$$\mathbf{PEEB = 113.715,53 \text{ kWh/dia}}$$

$$\mathbf{PEEB = 4.738,15 \text{ kWh}}$$

Tomou-se a média das safras 2008, 2010 e 2011, a produção de álcool em média ao mês foi igual a **10.960 m³**, gerando um volume médio de vinhaça de **185.510 m³** que proporciona um potencial de geração de energia elétrica equivalente à **3.411.465,9 kWh**.

É sabido que sendo uma usina sucroalcooleira, tal empresa proporciona a escolha de se produzir álcool ou açúcar, variando em função do mercado interno ou externo, logo, com esta possibilidade o potencial de produção de álcool é variado. O ano de 2008 foi direcionado a produção de álcool, justificando a inclusão da safra de 2008 neste estudo, mesmo possuindo dados somente por safra.

Analisando-se as médias das safras em estudo, através dos dados fornecidos, nota-se que a quantidade total de energia elétrica consumida na planta industrial foi de **135.858 kWh/mês**, adquiridos da concessionária.

6.4 Queima do Biogás nas Turbinas

O potencial energético diário é de **113.715,53 kWh**. A potência instalada (PI) deverá ser, portanto:

$$PI = 113.715,53 \text{ kWh/dia} / 24\text{h} = \mathbf{4.738,15 \text{ kWh}}$$

Para atender a esta PI deverão ser instalados 5 conjuntos geradores.

6.5 Cálculo do Retorno de Investimento

Segundo Costa (2007), o custo da instalação de biodigestores é de, aproximadamente, R\$ 1.000 por m³ instalado. Por esta fonte, estima-se, portanto que o conjunto de biodigestores e suas instalações complementares custarão cerca de **R\$ 15.000.000,00**.

De acordo com Wagner (2002), o custo do kWh instalado, no processo de geração de energia elétrica pela queima do biogás é de US\$ 160,00.

Como a geração de vinhaça proporciona uma instalação de equipamento que disponibilizam 5.000 kWh, o custo total de instalação será de US\$ 800.000,00.

Ao câmbio do dia 04 de dezembro de 2011 (R\$ 1,79/US\$1,00), o valor dos equipamentos supracitados será de **R\$ 1.432.000,00**.

Tem-se, assim, a inversão total de **R\$ 16.432.000,00** necessários à coeração de **4.738,15 kWh**

Considerando-se as safras em estudo (2008, 2010 e 2011) o custo de aquisição de energia elétrica, na planta industrial, é de **R\$ 330.134,94/safra**, com um consumo médio de **1.222.722 kWh/safra** (considerando uma safra com 9 meses).

A partir da instalação do processo de biodigestão haverá geração de energia elétrica equivalente à **30.703.193,10 kWh/safra** (considerando uma safra com 9 meses).

Excedente de energia após a biodigestão: $30.703.193,10 - 1.358.580 = \mathbf{29.344.613,10}$ kWh/safra

Com isso, não existirá a necessidade de aquisição de energia elétrica da concessionária e a empresa poderá vender o excedente por R\$ 0,15 por kWh (dado fornecido pela Central de Informações junto ao Departamento de Manutenção Elétrica da empresa em estudo).

Lucro da energia excedente: $0,15 \times 29.344.613,10 = \mathbf{R\$ 4.401.691,965}$

Calcula-se, portanto, um lucro da empresa de:

$\mathbf{R\$ 366.816,60 + R\$ 4.401.691,965 = R\$ 4.768.508,57/safra.}$

Logo, o investimento será pago em **3,4 safras**, desconsiderando taxas de juros, depreciação e remuneração de capital, conforme demonstrado na Tabela 7.

TABELA 7. Avaliação Econômica

Avaliação Econômica			
Safras	Passivo da empresa (instalação dos equipamentos)	Ativo da empresa (energia gerada)	Saldo
1ª	R\$ 16.432.000,00	R\$ 4.768.508,57	-R\$ 11.663.491,43
2ª	-	R\$ 4.768.508,57	-R\$ 6.894.982,86
3ª	-	R\$ 4.768.508,57	-R\$ 2.126.474,29
4ª	-	R\$ 4.768.508,57	R\$ 2.642.034,28

Vale ressaltar que não foi considerada a valoração ambiental do aproveitamento energético, uma vez considerada, melhoraria ainda mais este número.

6.6 Implicações Ambientais

A maior preocupação com a vinhaça se dá por ser armazenada e transportada a céu aberto por reservatórios e canais.

As Figuras 14 e 15 ilustram o reservatório de armazenamento da vinhaça a céu aberto.



Figura 14. Foto Reservatório de armazenamento de vinhaça.

Fonte: Dados da pesquisa.



Figura 15. Foto Reservatório.
Fonte: Dados da pesquisa.

Este fato exige um controle rígido na fertirrigação, pois pode ocasionar arraste deste efluente para leitos d'água ou infiltrações no subsolo.

Os cuidados com o manejo do resíduo vinhaça aumentam nos meses chuvosos, pois o processo atual, sem a biodigestão anaeróbica, é realizado basicamente a céu aberto.

Enquanto que se utilizando biodigestores, partes deste processo são realizadas em compartimentos fechados, não recebendo assim as águas das chuvas diretamente. E também se estabiliza a matéria orgânica da vinhaça, reduzindo o DQO desse efluente por consequência o neutralizando, obtendo elevadas eficiências de remoção de carga poluidora do mesmo, vindo a reforçar a possibilidade da contribuição para a melhoria das condições ambientais.

Outro aspecto importante relacionado a biodigestão anaeróbia é a produção de Gases de Efeito Estufa (GEE's), especialmente o metano, que possui poder poluente 21 vezes maior que o dióxido de carbono. Com a coogeração de energia pela queima de biogás coletado ocorre a transformação de metano em dióxido de carbono, reduzindo-se, desta forma, a poluição atmosférica.

Observa-se que a afirmativa supracitada pode significar certificação de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), podendo-se aferir rendimentos significativos além da economia energética propiciada.

7. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente trabalho, que trata do potencial de geração de energia pela biodigestão anaeróbica da vinhaça, em usina sucroalcooleira bioenergética com capacidade de produção diária média de 365,33 m³ de álcool, permitiram inferir que:

- ✓ Se o processo de biodigestão anaeróbica da vinhaça for adotado como fonte geradora de energia elétrica, o mesmo pode fornecer **30.703.193,10 kWh/safra**;
- ✓ O potencial de geração de energia elétrica pela biodigestão da vinhaça poderá fornecer, aproximadamente, 25 vezes o total de energia elétrica consumida pela empresa;
- ✓ Com o custo de instalação de **R\$ 16.432.000,00**, o retorno do investimento se dará em 3,4 safras, desconsiderando taxas de juros, depreciação e remuneração de capital;
- ✓ A vinhaça, da forma como é armazenada atualmente, em reservatórios e canais a céu aberto, sofre um aumento de volume nos meses com maiores índices pluviométricos, dificultando assim um controle rígido sobre a mesma no sentido de se evitar arrastes e percolações. O tratamento efetuado por biodigestão anaeróbica diminui esse problema e reduz os GEE's, pois os biodigestores são compartimentos fechados, não mantendo contato com o ambiente externo.

8. BIBLIOGRAFIA

- BAJAY, S. V.; FERREIRA, A. L. Visão geral de energia e biomassa. In: CALLE, F. R.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. (Eds.). *Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira*. São Paulo: UNICAMP, 2005. p. 67-105.
- BARROS, R. P. Estudo dos efeitos da adição de vinhaça em solos utilizados pela cultura da Cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*). Projeto de Pesquisa para a Elaboração da Dissertação de Mestrado em Agroecossistemas do NEREN. Núcleo de Pós-Graduação em Recursos Naturais da UFS. Universidade Federal de Sergipe, 2007.
- BERMANN, C. Sustentabilidade Energética no Brasil: Limites e possibilidades para uma estratégia energética sustentável e democrática. Rio de Janeiro: FASE, 2000.
- BRAUNBECK, O. A.; CORTEZ, L. A. B. O cultivo da cana-de-açúcar e o uso dos resíduos. In: CALLE, F. R.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. (Eds.). *Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira*. São Paulo: UNICAMP, 2005. p. 215-246.
- BRITO, F. L. Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, UFRPE, Recife, 2007.
- CABELLO, P.E.; SCOGNAMIGLIO, F.P.; TERÁN, F.J.C. Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio de leito fluidizado. *Espírito Santo do Pinhal*, v. 6, n. 1, p. 321-338. 2009
- CAMARGO, C.A. , “Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Álcool”. IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo, 1990.
- CAMILO, R. Geração de energia elétrica por meio da biodegradação anaeróbia da vinhaça em reatores UASB. 2006. 52 f. Monografia (Graduação) – Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Campus Irati, Paraná, 2006.
- CONAMA. Resolução CONAMA, nº 002, de 05 de junho de 1984. Dispõe sobre a poluição causada pelos efluentes das destilarias de álcool.
- CONAMA. Resolução CONAMA, nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental-RIMA.
- COPERSUCAR, Boletim Técnico número v. 4, (77), Piracicaba, São Paulo, 1997.
- COSTA, D. F. *Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás do Tratamento de Esgoto*. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Interunidades e Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2006.
- ELIA NETO, A., *Processo, Efluentes e Resíduos da Indústria do Etanol*. Trabalho apresentado no Seminário Internacional sobre Água Subterrânea e Etanol: da Produção ao Consumo. São Paulo, SP, 8 de outubro de 2007.
- FERNANDES, A. S. *Biomassa e Energia*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2007. 257p.
- GOMES, C.S. *Estudo Técnico de Biodigestores alternativos*. COPEL. Curitiba, 1980.
- GRANATO, E. F. *Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça*. 2003. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2003.
- HALL, D. O.; HOUSE, J. O.; SCRASE, I. Visão geral de energia e biomassa. In: CALLE, F. R.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. (Eds.). *Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira*. São Paulo: UNICAMP, 2005. p. 25-67.

- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. *Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1990.
- LAMO, P. *Sistema Produtor de Gás Metano Através de Tratamento de Efluentes Industriais*. Piracicaba: Codistil. 1991.
- LAMONICA, H.M. Potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça. Campinas, 06 jun. 2006. Palestra proferida no AGRENER 2006.
- LANZOTTI, C. R. *Uma análise emergética de tendências do setor sucroalcooleiro*. 2000. 106 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- LYRA, M. R.C.C. Topossequência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, UFRPE. Recife, 2003.
- LUDOVICE, M.T. F. *Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático*. 1997. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração: Saneamento) – Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.
- MACEDO, I.C. *Legislação ambiental e inovações tecnológicas na agroindústria canavieira, Workshop sobre Agroindústria canavieira*. Instituto de Economia. Unicamp, 2005.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional, Brasília, 2003.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional, Brasília, 2010.
- PINTO, C. P. *Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável*. 1999. 162 f. Tese (Mestrado em Planejamento sem Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas Campinas, 1999.
- ROBERTO, C. Água que te quero bem. Revista IDEA News, Ribeirão Preto, n. 80, 2007. p. 58-72.
- SALOMON, K. R., Avaliação tecnico-Econômica da Biodigestão Anaeróbia das Vinhaças. Universidade de São Paulo. Trabalho apresentado no II GERA: Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindústria Sucroalcooleira, realizado em 2007, em Pirassununga.
- SABBAG, M. G; RODRIGUES, N. M.; PICCHI, A. R. Tratamento de Efluentes de Usinas do Setor Sucroalcooleiro. Universidade de São Paulo - Escola politécnica departamento de engenharia hidráulica. São Paulo, 13 f, 2006.
- SCHULTZ, N. Efeito residual da adubação em cana planta e adubação nitrogenada em cana de primeira soca com aplicação de vinhaça. Seropédica – RJ, 67 f., 2009.
- SOUZA, R. M. Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Biogás através da Biodigestão da Vinhaça e Comparação com outros Energéticos. Trabalho apresentado no IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Seguro – Ba, 2000.
- SZIMANSKI, M. S. E; BALBINOT, R; SCHIRMER. W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 31, n. 4, p. 901-912. 2010
- THEODORO. J. M. P., Considerações Sobre os Custos Ambientais Decorrentes do Gerenciamento dos Resíduos Sólidos e dos Efluentes Industriais Gerados no Setor Sucroalcooleiro: Um Estudo de Caso. 2005. 147p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-

graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Centro Universitário de Araraquara, Araraquara, 2005.

WAGNER, A. – Sugestões Técnicas e Econômicas. AW. Consultoria S/C Ltda. Curitiba, 2002.