

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO-UENF  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA-CCT  
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-LEPROD**

**MATHEUS SEPULVIDA PERES MONTEIRO**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DO  
VINHOTO**

**Campos dos Goytacazes – RJ**

**Dezembro/2009**

**MATHEUS SEPULVIDA PERES MONTEIRO**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DO  
VINHOTO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito para  
aprovação no curso de Engenharia de  
Produção da Universidade Estadual do  
Norte Fluminense.

**Orientadora: Prof D. Sc. Gudélia Morales de Arica**

**Co-orientador: Prof. D. Sc. Alcimar Chagas**

**Campos dos Goytacazes – RJ**

**Dezembro/2009**

**MATHEUS SEPULVIDA PERES MONTEIRO**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DO VINHOTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para aprovação no curso de Engenharia de Produção da Universidade Estadual do Norte Fluminense.

**Banca Examinadora:**

---

Prof D. Sc.Gudélia Morales de Arica – UENF (Orientadora)

---

Prof. D. Sc. Alcimar Chagas – UENF (Co-orientador)

---

Prof. D.Sc. Rodrigo Tavares Nogueira – UENF

**Campos dos Goytacazes – RJ**

**Dezembro/2009**

## RESUMO

Atualmente existe uma demanda cada vez maior para a utilização de combustíveis renováveis e menos poluentes. O etanol é o principal biocombustível produzido no Brasil que tem ganhado destaque neste cenário por se tratar de um combustível menos poluente que os fósseis e pelo seu caráter renovável. Apesar dessas vantagens, sua produção pode causar grande impacto no meio ambiente devido aos resíduos gerados neste processo, especialmente o vinhoto.

O vinhoto é uma substância gerada nas destilarias dotada com uma carga orgânica elevada, característica esta que o torna extremamente perigoso se for descartado em cursos de água, por esta razão em 1978 a portaria nº 323 do Ministério do Interior proibiu este tipo de destino final para o resíduo. Além da carga orgânica, o vinhoto tem em sua composição altos teores de Nitrogênio, Potássio e Fósforo, viabilizando a substituição de adubos minerais com a sua aplicação nas lavouras, apresentando com esta prática um incremento na eficiência do solo adubado, havendo aumento na tonelada de cana colhida por hectare. Porém, existe uma alternativa de uso deste resíduo, mais vantajosa, a biodigestão, que o transforma via o uso de biodigestores anaeróbios para geração de um gás combustível rico em metano, chamado de biogás. Além disso, o efluente dos biodigestores, é um biofertilizante que mantém os nutrientes minerais do vinhoto, reduzem sua carga orgânica e neutralizam sua acidez, diminuindo os impactos gerados na aplicação do deste resíduo como adubo.

Neste trabalho foi feito então um estudo de viabilidade técnico-econômica da implantação de um biodigestor anaeróbio na Usina São José para a produção e venda do biogás, confirmando a rentabilidade deste investimento e apresentando vantagens ao meio ambiente com a substituição de combustíveis mais poluentes.

**Palavras-chave:** Resíduo do Etanol, Impacto Ambiental, Biodigestão Anaeróbia, Geração de Energia, Biogás.

## ABSTRACT

Currently there is an increasing demand for the use of renewable and less polluting fuels. Ethanol is the main biofuel produced in Brazil which have gained highlight in this scenario because it is a fuel cleaner than fossil fuels and for its renewable character. Despite these advantages, its production can cause great impact on the environment due to the residual substance generated in this process, especially vinasse.

The vinasse is a substance produced at distilleries with a high organic load, characteristic that makes it extremely dangerous if dropped in water courses, for this reason in 1978 the decree nº 323 of Brazilian Interior Ministry has banned this type of final destination to the residue. In addition to the organic load, the vinasse has in its composition high contents of nitrogen, potassium and phosphorus, allowing the substitution of mineral fertilizers with its application in the land, increasing the efficiency of fertilized soil with this practice, with an increase of cane harvested per hectare. However, there is an alternative use of this byproduct, most advantageous, the biodigestion, which makes it through the use of anaerobic biodigesters to generate a fuel gas rich in methane, called biogas. In addition, the effluent of the digesters, is a biofertilizer which keeps nutrients from the vinasse, reduce its organic load and neutralize its acidity, reducing the impacts from the implementation of this product as fertilizer.

This work was done then a technical and economic feasibility study of the installation of an anaerobic digester in São José plant for the production and sale of biogas, confirming the return on this investment and providing benefits to the environment by replacing more polluting fuels.

**Keywords:** Ethanol Waste, Environmental Impact, Anaerobic Digestion, Power Generation, Biogas.

## Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos .....	2
1.1.1 Objetivos Gerais .....	2
1.1.2 Objetivo Principal .....	3
2 O ÁLCOOL .....	4
2.1 Histórico Recente do Alcool no Brasil.....	4
2.2 Processo Produtivo do Alcool.....	5
2.2.1 Pré-Produção.....	6
2.2.2 Produção e Estocagem do Alcool .....	6
3 O VINHOTO: SUAS CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES .....	13
3.1 Uso Do Vinhoto para Adubação .....	14
3.2 USO DO VINHOTO PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS .....	16
4 PROCESSO DE BIODIGESTÃO E COGERAÇÃO DE ENERGIA .....	19
4.1 Os Biodigestores.....	19
4.1.1 Biodigestores de Fluxo Ascendente.....	23
4.2 PROCESSOS RELACIONADOS À BIODIGESTÃO.....	27
4.3 Geração de Energia .....	30
4.3.1 Motores de combustão interna (MCI).....	31
4.3.2 Caldeiras .....	32
4.3.4 Microturbinas a Gás.....	33
5 ESTUDO DE CASO.....	35
5.1 OBJETO DE ESTUDO .....	35
5.2 Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica da Biodigestão do Vinhoto para Produção de Biogás na Coagro .....	36
5.2.1 Cenário 1 : Venda do Biogás para Olarias .....	41
5.2.2 Cenário 2 : Substituição de parte do bagaço na geração de energia .....	45
elétrica.....	45
5.2.3 Cenário 3: Produção do Biogás para Uso Automotivo.....	49
6 CONCLUSÃO .....	52
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do vinhoto resultante de mostos de melaço, de caldo de cana e de mostos mistos de caldo e melaço .....	13
Tabela 2 - Balanço energético de uma tonelada de cana .....	18
Tabela 3 - Dados do processo produtivo da Usina São José. ....	39
Tabela 4 - Parâmetros da planta de biodigestão.....	40
Tabela 5 - Poder calorífico e preço da lenha .....	41
Tabela 6 - Custos da compra e utilização de um caminhão tanque .....	42
Tabela 7 - Fluxo de caixa e VPL da venda do biogás para as olarias (10 anos).....	43
Tabela 8 - VPL para diferentes taxas de desconto no horizonte de 10 anos.....	44
Tabela 9 - Dados sobre o Bagaço .....	46
Tabela 10 - Fluxo de caixa e VPL da venda do bagaço (10 anos).....	47
Tabela 11 - Fluxo de caixa e VPL da venda do bagaço para olarias (10 anos).....	48
Tabela 12 - VPL do Cenário 2 para diferentes taxas de desconto no horizonte de 10 anos .....	49
Tabela 13 - Fluxo de caixa e VPL da venda do Biogás como combustível veicular (10 anos).....	51

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração da 2ª à 8ª atividade.....	8
Figura 2 - Ilustração da 22ª à 27ª Atividade.....	10
Figura 3 - Ilustração da 28ª à 31ª Atividade.....	12
Figura 4 - Curva de Custos da Adubação e Aplicação de Vinhoto .....	16
Figura 5 - Corte esquemática de um tanque séptico retangular de câmara única .....	21
Figura 6 - Esquema de um reator UASB.....	21
Figura 7 - Esquema de um reator de leito fluidizado.....	22
Figura 8 - Gerações de Reatores Anaeróbios .....	23
Figura 9 - Representação esquemática de um biodigestor de fluxo ascendente .....	24
Figura 10 - Representação esquemática do reator IC .....	27
Figura 11 - Estação para biogás automotivo .....	28
Figura 12 - Exemplo de instalação industrial de biodigestão da vinhaça.....	30



# 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o uso do etanol como combustível é uma realidade desde o início do século XX. Porém seu uso intensificou-se quando este álcool passou a ser oficialmente misturado à gasolina, então importada, com uma adição mínima de 5% de álcool anidro, mediante ao Decreto 19.717 assinado em 1931, pelo presidente Getúlio Vargas (BNDES & CGEE, 2009). O percentual de etanol contido na gasolina variou com o passar dos anos, chegando a ser em média 7,5% em 1975, quando os efeitos do primeiro choque do petróleo se fizeram sentir. Isto fez com que aumentasse a necessidade de um incremento no percentual de álcool na gasolina, a fim de reduzir os custos de importação do petróleo. Foi só a partir deste ano que o Brasil se consolidou como um grande produtor e usuário de biocombustível, com a institucionalização do Proálcool (Programa Nacional do Álcool), mediante o Decreto 76.593, de 14 de novembro de 1975 (BNDES & CGEE, 2009).

O álcool Brasileiro é produzido da cana de açúcar e gerado através da fermentação do mosto (que é a mistura de água, melaço<sup>1</sup> e/ou caldo de cana) e a destilação do vinho, que é resultado desta fermentação. Dentre os principais resíduos do álcool se destacam: o vinhoto<sup>2</sup>, a torta de filtro<sup>3</sup> e o bagaço, que podem voltar para a lavoura na forma de fertilizantes (DEMATTÊ, 1992 *apud* RAFALDINI *et al.*, 2006). Porém o vinhoto é o que apresenta maior perigo ao meio ambiente, não só pela quantidade em que é produzido, mas também por ter um alto teor de matéria orgânica, tendo seu descarte sem tratamento no meio ambiente proibido desde novembro de 1978, através da portaria nº 323 do Ministério do Interior, 3 anos após a implantação do PróAlcool (GRANATO & SILVA, 2002). Com este programa, a produção de álcool no Brasil aumentou de 600 milhões de litros por ano, de 1975 à 1976, para 3,4 bilhões de litros, de 1979 à 1980 (PRÓALCOOL, 2008), aumentando ainda mais a produção de

---

<sup>1</sup> Melacha: resíduo obtido na produção de açúcar da cana.

<sup>2</sup> Vinhoto: Também conhecido como vinhaça, caldo, restilo ou garapão é o resíduo obtido na destilação do vinho.

<sup>3</sup> Torta de filtro: resíduo resultante da filtragem do lodo gerado no processo de clarificação do açúcar.

vinhoto, que segundo Lamo (1991) *apud* Granato & Silva (2002), chega a ser 14 vezes maior que a produção de álcool. Para que a exigência da portaria se cumprisse, foi necessário então estudar formas de aplicação deste resíduo.

Até os dias atuais quase todo vinhoto produzido é utilizado como fertilizante, porém esta aplicação gera novos problemas como o odor desagradável, a contaminação dos lençóis freáticos e o aumento da proliferação de doenças, devido ao fato dele não ser totalmente absorvido na lavoura (RAFALDINI *et al.*, 2006; SIMÕES, 2004). Contudo, este resíduo demonstrou ser um ótimo adubo, diminuindo o custo da cana colhida por hectare cultivado, pois o terreno adubado com vinhoto obteve um aumento na sua produção (SIMÕES, 2004). Segundo Granato & Silva (2002) além da aplicação como adubo, o vinhoto pode ter outros fins como ração animal, utilizado na fabricação de tijolos e na geração de biogás através da Digestão Anaeróbica.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos Gerais**

- Mostrar a importância do álcool para o Brasil e apresentar seu histórico recente e seu processo produtivo;
- Explicar as características físico-químicas do vinhoto e possíveis aplicações para este resíduo;
- Avaliar o processo de biodigestão e as tecnologias de geração de energia (térmica, elétrica ou mecânica), em que o biogás poderá ser usado.

### **1.1.2 Objetivo Principal**

Analisar a viabilidade técnico-econômica da implantação de um biodigestor anaeróbio na usina São José, para a obtenção de biogás através da fermentação do vinhoto, analisando o retorno financeiro proveniente de algumas aplicações deste gás e dos seus impactos ambientais.

## 2 O ÁLCOOL

### 2.1 Histórico Recente do Álcool no Brasil

Em meados dos anos 70 houve a primeira crise do petróleo. Como resposta ao grande aumento nos preços deste produto, o governo brasileiro, em uma decisão política e econômica, lançou em 1975 o ProÁlcool, incentivando a produção do álcool anidro<sup>4</sup> da cana de açúcar para substituir grande parte da demanda por gasolina do parque automotivo do país. Esta medida foi necessária, na época, pois o Brasil importava aproximadamente 80% do seu petróleo consumido, aumentando os gastos com a sua importação de US\$ 600 milhões para US\$ 22 bilhões entre os anos de 1973 e 1974 (CLEMENTE, 2003).

Além do preço do petróleo quadruplicar e a dependência que o Brasil tinha do meio externo para sua aquisição, o açúcar estava em baixa no mercado mundial. Estes foram os principais fatores que auxiliaram a alavancagem da produção de álcool, pois as usinas de açúcar estavam com capacidade ociosa e tinham condições de produzir álcool, devido às características inerentes ao próprio processo produtivo. A decisão de incentivar a produção deste combustível pôde amenizar os efeitos das duas crises.

No início da década de 80, já havia 5 milhões de veículos movidos álcool hidratado<sup>5</sup> e além disso houve um incremento de 22% de álcool anidro na gasolina, o que trouxe vantagens como a redução da emissão de CO<sub>2</sub> (pois carros movidos a gasolina emitem 1,8 vezes mais gás carbônico do que os movidos a álcool) e a redução da necessidade de importação de petróleo (CLEMENTE, 2003). No final desta mesma década, com a redução do preço do petróleo e o aumento da cotação do açúcar, houve escassez de álcool no mercado devido ao fato das usinas voltarem a dar preferência à produção de açúcar. Por consequência da falta de oferta de álcool houve uma grande queda

---

<sup>4</sup> Álcool Anidro: álcool com 99% de etanol e 1% de água em sua composição.

<sup>5</sup> Álcool Hidratado: álcool com 96% de etanol e 4% de água em sua composição.

do seu consumo, já que a gasolina voltou a ter preços competitivos e não sofria de problemas de abastecimento.

A partir de então a produção de álcool, em grande parte, só era possível através de subsídios do governo que tiveram fim no início dos anos 90, o que acarretou na redução da utilização do álcool hidratado como combustível, porém o uso da mistura de álcool anidro com a gasolina (22% álcool, 78% gasolina) tornou-se obrigatória dentro do território nacional, assegurando uma expansão do uso deste combustível (OGLOBO, 2007). Em julho de 2007, a partir da publicação da Portaria nº 143 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a porcentagem de álcool na gasolina passou a ser de 25% e em 2009 o consumo deste biocombustível ultrapassou o da gasolina (ANP, 2009). Atualmente com a mudança climática em evidencia, o fortalecimento de uma cultura de proteção ao meio ambiente e com a diminuição das reservas dos combustíveis não renováveis, a demanda por fontes energéticas menos poluentes e renováveis deu uma nova oportunidade de expansão para a produção do álcool. Segundo Clemente (2003 pág. 18)

“o álcool tem tido seu reconhecimento na comunidade internacional como uma das possíveis soluções aos problemas ambientais destacando-se como um dos melhores candidatos a ser apoiados com políticas de financiamento (Mecanismos de Desenvolvimento Limpo - MDL), segundo o estabelecido no Protocolo de Kyoto”.

Isso mostra a grande importância do desenvolvimento do setor sucroalcooleiro no Brasil, de modo a manter sua superioridade tecnológica nesta área, o que tem atraído interesse de diversos países.

## **2.2 Processo Produtivo do Álcool**

Para entender melhor as vantagens e desvantagens acerca da produção do álcool faz-se necessário o estudo deste processo. Para ter uma visão mais

ampla de toda produção e, por conseguinte, da geração de custos e de subprodutos resultantes desta que, será explicado a seguir como o álcool é produzido, desde o plantio da cana até seu estoque segundo COSAN (2005).

### **2.2.1 Pré-Produção**

A pré-produção começa com plantio da cana, selecionada a espécie mais apropriada ao terreno que irá recebê-la, segundo especificações da Embrapa. Chegada sua época da colheita, esta pode ser efetuada manual ou mecanicamente a custos médios diferenciados. No primeiro caso, a cana é obtida inteira e no segundo caso são obtidos toletes de 20 a 25 cm (COSAN, 2005).

Após a colheita da cana, ela será transportada para uma usina onde passará pelo processo de produção de açúcar e/ou álcool. O transporte desta matéria-prima é feito através de caminhões adaptados para este fim que, ao chegarem ao seu destino, terão o peso e o grau de sacarose da sua carga avaliados. Uma amostra da cana carregada por cada caminhão é retirada com o uso de um sonda. A cana da amostra é então levada a um laboratório onde será mensurado o seu grau de sacarose, de modo que seja estipulado um preço a ser pago pela tonelada de cana transportada.

### **2.2.2 Produção e Estocagem do Álcool**

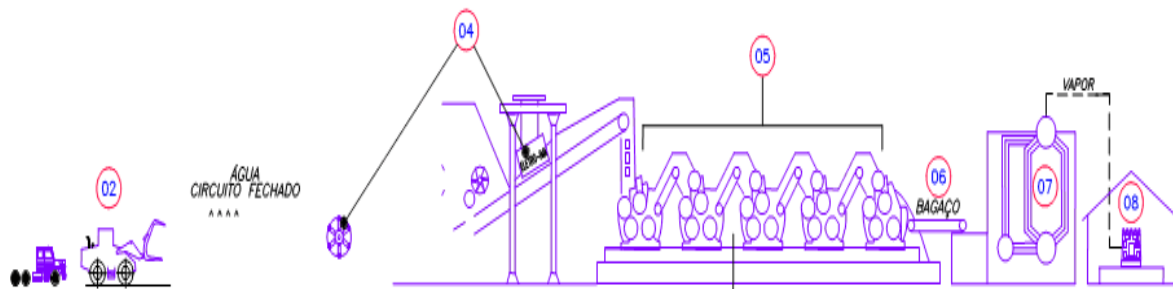
O processo produtivo tem início com o descarregamento da cana na moenda. A cana também poderá ser descarregada no pátio de estocagem para ser usada futuramente. Este descarregamento é feito através de guindastes, sendo importante ressaltar que caso a cana tenha sido colhida mecanicamente não poderá ser estocada, pois esta se decompõe com grande rapidez (COSAN, 2005).

Feito o descarregamento na moenda, a cana poderá ou não ser lavada, dependendo do processo de cada usina. A lavagem não é recomendada para a cana colhida mecanicamente, pois devido ao fato de ser composta de toletes o arraste da sacarose pela água seria muito grande (COSAN, 2005). Este processo serve para tirar matérias estranhas que podem prejudicar a eficácia dos processos posteriores, aumentando a qualidade do caldo e diminuindo o desgaste dos equipamentos.

Após a lavagem, a cana é conduzida através de esteiras rolantes para um jogo de facas niveladoras, seguido do picador, do desfibrador e do eletroimã, que retira qualquer material estranho de natureza metálica da cana (Figura 1, atividade 04). Esta etapa é conhecida como preparo da cana. A extração dos sólidos da cana é feita pelo esmagamento nos rolos das moendas que exercem forte pressão. As moendas (Figura 1, nº 05) separam água e sólidos da fibra que formará o bagaço. Um segundo objetivo da moagem, porém de extrema importância, é a produção de um bagaço final com baixa umidade, que será queimado nas caldeiras visando a produção de energia mecânica na forma de vapor de água a alta pressão.

No intuito de diluir os sólidos remanescentes no bagaço para aumentar a extração, adiciona-se água ao bagaço antes de passar pelos últimos rolos, constituindo um processo denominado embebição.

Como citado anteriormente, a moagem separa o caldo do bagaço. Este bagaço é conduzido, através de esteiras (Figura 1, nº 06), à caldeira (Figura 1, nº 07) onde é queimado para a produção de vapor d'água. Este vapor é utilizado no acionamento de turbinas a vapor, transformando energia térmica em energia mecânica. Essas turbinas movimentam os picadores, os desfibradores, as moendas, etc, bem como geradores de energia elétrica (Figura 1, nº 08) necessária em vários setores da indústria. O vapor liberado nas turbinas, denominado vapor de escape, e é utilizado como fonte básica de energia ao longo do processo de fabricação do açúcar e do álcool.



**Figura 1 - Ilustração da 2ª à 8ª atividade**

**Fonte: COSAN,2005.**

O caldo resultante da extração pelas moendas passa por algumas etapas de tratamento antes de ser encaminhado à produção de açúcar e/ou álcool. Os procedimentos de purificação são os seguintes(COSAN, 2005):

- **Sulfitação:** consiste na absorção de  $SO_2$  pelo caldo, inibindo reações que causam a formação de cor, coagulando matérias coloidais, auxiliando na formação de precipitados que farão o arraste de impurezas durante a sedimentação, diminuindo a viscosidade do caldo e desinfetando o meio;
- **Caleagem:** adição de leite de cal ( $Ca(OH)_2$ ) que auxilia a precipitação e arraste de impurezas solúveis e insolúveis e eleva o pH<sup>6</sup> para valores neutros.;
- **Aquecimento:** nesta etapa do processo o aquecimento visa, essencialmente, aumentar a eficiência do processo de decantação e promover a posterior retirada de ar;
- **Flasheamento:** redução brusca da pressão que provoca uma ebulição espontânea do caldo para eliminar o ar nele dissolvido que, quando presente, dificulta a decantação das impurezas mais leves;
- **Decantação:** é a etapa de purificação do caldo pela remoção das impurezas que se encontram em forma de flocos devido aos tratamentos anteriores. O caldo, livre das impurezas segue para a etapa de evaporação. As impurezas constituem o que é chamado de lodo. O lodo é enviado à etapa de filtragem;

<sup>6</sup>Potencial Hidrogeniônico (pH): é o índice que indica a acidez de um líquido ( $pH < 7$ ), se é neutra ( $pH = 7$ ), ou básica alcalina ( $pH > 7$ ).



- Filtragem: serve para recuperar o açúcar contido no lodo separando o caldo filtrado do que é retido no filtro: a torta de filtro. O caldo retorna ao processo e a torta pode ser utilizada como adubo na lavoura;

Após os processos citados será escolhida uma finalidade de produção ao caldo, se este será usado na fabricação de álcool ou açúcar. A seguir será explicado o processo de geração do álcool.

O álcool é obtido através de um processo bioquímico chamado fermentação. De maneira semelhante à produção de açúcar, para a obtenção do álcool é necessário que o caldo receba um tratamento de purificação. O tratamento do caldo destinado à produção de álcool é o mesmo tratamento realizado com o caldo destinado à produção de açúcar, exceto a etapa de sulfitação. Ao contrário do que ocorre na fabricação do açúcar, o caldo que servirá como matéria-prima na produção de álcool deve ser resfriado. É comum fazer com que o caldo quente troque calor com o caldo frio, sendo este aquecido e aquele resfriado. Não sendo suficiente, o caldo que vai para a destilaria deve passar em um trocador de calor (Figura 2, nº22) no qual trocará calor com água fria até atingir a temperatura de aproximadamente 30°C.

Em seguida ocorrerá o preparo do mosto. O mosto é uma solução de açúcar cuja concentração foi ajustada de maneira a tornar a fermentação mais eficiente. O mosto, como já foi dito, é preparado a partir de méis, caldo e água (Figura 2, nº23) de modo que a mistura apresente uma concentração final por volta de 16 a 23° Brix<sup>7</sup>.

Em seguida acontece o preparo do fermento, normalmente é utilizado no Brasil o processo de fermentação Melle-Boinot. Esse processo tem como principal característica a recuperação de leveduras através da centrifugação do vinho Figura 2, nº25 (ÁLCOOL, s.d.). De modo a proporcionar condições ótimas de fermentação e evitar a infecção bacteriana, a levedura recuperada sofre um tratamento antes de retornar ao processo (Figura 2, nº 26). Este tratamento consiste da adição de água, reduzindo o teor alcoólico, e de ácido sulfúrico até

---

<sup>7</sup> Brix: índice que mede o seu teor de açúcar ou concentração em massa de sacarose na solução;

chegar a um pH = 2,5, gerando uma mistura conhecida como pé-de-cuba (COSAN, 2005).

A fermentação ocorre em tanques, denominados dornas de fermentação (Figura 2, nº24), onde o mosto é misturado com o pé-de-cuba na proporção de 2:1, respectivamente. Os açúcares (sacarose, glicose e frutose) são transformados em álcool neste processo.

A reação de fermentação libera gás carbônico e calor. O gás é lavado de modo a recuperar o álcool evaporado arrastado pelo CO<sub>2</sub>. Devido ao calor liberado e a necessidade de se manter a temperatura da fermentação por volta de 32°C um sistema de resfriamento é utilizado. Após um tempo de 4 a 12 horas, a fermentação termina gerando um produto final de teor alcoólico entre 7 e 10%, denominado vinho fermentado.

Das dornas de fermentação, o vinho é centrifugado (Figura 2, nº25) de modo a separar o fermento. Este fermento recuperado é denominado leite de levedura e retorna às cubas de tratamento. O vinho de levedurado (que teve suas leveduras retiradas pela centrifugação) é enviado à dorna volante (Figura 2, nº27) e posteriormente às colunas de destilação.

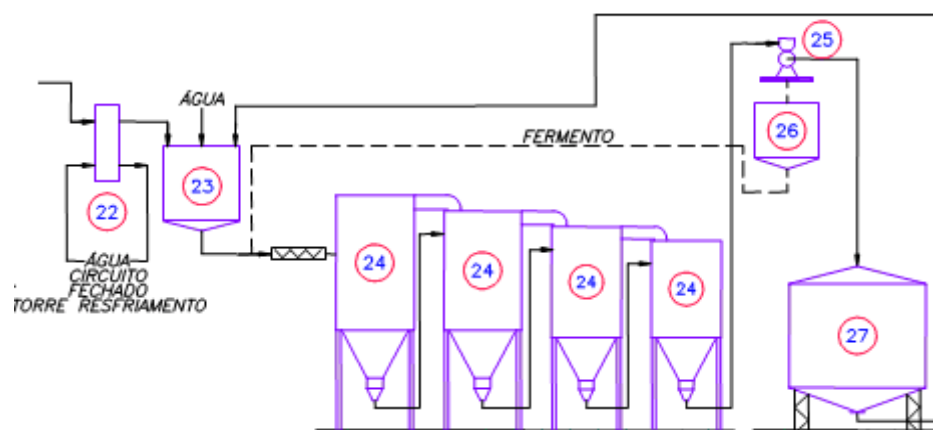


Figura 2 - Ilustração da 22ª à 27ª Atividade

Fonte: COSAN,2005.

O vinho que vem da fermentação é composto basicamente por componentes em fase líquida, dentre os quais destacam-se o álcool com 7° a 10° GL<sup>8</sup> e a água (89 a 93%). Segundo COSAN (2005), os demais componentes como glicerina, álcoois homólogos superiores, furfural, aldeído acético, ácidos succínico e acético, bagacilho, leveduras e bactérias, açúcares fermentescíveis, sais minerais, matérias albuminóides, CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> são encontrados em quantidades bem menores.

Para a separação do álcool, utiliza-se o processo de destilação no qual os diferentes pontos de ebulição dos componentes da mistura são responsáveis pela separação. A operação é realizada em três etapas: destilação propriamente dita, retificação e desidratação. Em todas elas o aquecimento é feito a partir do vapor, de forma direta ou indireta.

Na destilação (Figura 3, nº 28), o etanol é separado do vinho. O vinho, inicialmente com 7° a 10° GL, é decomposto em duas correntes: flegma (vapores com 40° a 50° GL) e vinhoto (que pode seguir para a lavoura como fertilizante, ou para outros fins, com menos de 0,03 °GL).

A etapa de retificação (Figura 3, nº 29) visa concentrar o flegma proveniente da destilação de forma a obter um grau alcoólico de 96 °GL à saída e retirar impurezas.

O álcool a 96 °GL é chamado álcool hidratado. Para a produção de álcool anidro, com a 99,7 °GL, se utiliza o ciclo-hexano<sup>9</sup> como desidratante, por ter menores índices de toxicidade em relação ao benzeno. Algumas Usinas utilizam um sistema conhecido como peneira molecular para fazer a desidratação.

Os álcoois produzidos, hidratado e anidro, são quantificados e enviados a tanques de grande volume (Figura 3, nº 31) onde são estocados para posterior comercialização.

---

<sup>8</sup> °GL: índice que mede a quantidade em mililitros de álcool absoluto contida em 100 mililitros de mistura hidro-alcoólica

<sup>9</sup> Ciclo Hexano: [composto orgânico](#) formado por 6 [átomos](#) de [carbono](#), e 12 átomos de [hidrogênio](#), de fórmula: [C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>](#)

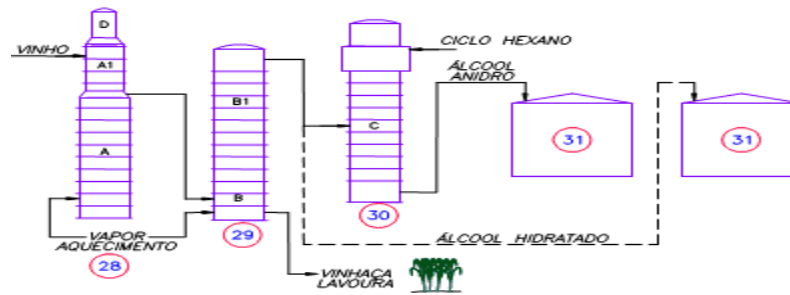


Figura 3 - Ilustração da 28ª à 31ª Atividade

Fonte: COSAN,2005.

### 3 O VINHOTO: SUAS CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES

O vinhoto (também conhecido como vinhaça, restilo, calda ou garapão), é um subproduto da fabricação do álcool, gerado após a fermentação do mosto e destilação do vinho (como mostrado na Figura 3). É um líquido de cor marrom e apresenta um forte odor.

Segundo Leite (1999) o volume gerado deste resíduo é função do teor alcoólico obtido na fermentação, portanto, depende muito do processo de cada usina. Apesar de haver certo grau de incerteza sobre o quanto de vinhoto é gerado em média por litro de álcool, todos os autores concordam que a relação é superior a 10 litros. Portanto as usinas têm um grande problema em mãos, pois seria necessária uma área considerável para armazená-lo, devida a quantidade gerada. Porém este armazenamento poderia implicar em problemas sanitários e ambientais. Para entender melhor os perigos e as oportunidades oriundas do vinhoto, é importante mostrar do que este é composto. A Tabela 1, retirada de Prada *et al.*, indica a quantidade média dos constituintes deste resíduo, referente aos tipos de mosto utilizados na produção do álcool.

**Tabela 1 - Características do vinhoto resultante de mostos de melação, de caldo de cana e de mostos mistos de caldo e melação**

Parâmetro	Melão	Caldo	Misto
pH	4,2 - 5,0	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6
Temperatura	80 - 100	80 - 100	80 - 100
DBO (mg/L O <sub>2</sub> ) (1)	25.000	6.000 - 16.500	19.800
DQO (mg/L O <sub>2</sub> ) (2)	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos totais (mg/L)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg/L)	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg/L)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg/L N)	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710
Fósforo (mg/L P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	100 - 290	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg/L K <sub>2</sub> O)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
Cálcio (mg/L CaO)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
Magnésio (mg/L MgO)	420 - 1.520	200 - 490	580.700
Sulfato (mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
Carbono (mg/L C)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria orgânica (mg/L)	63.400	19.500	3.800
Subst. redutoras (mg/L)	9.500	7.900	8.300

(1) DBO = Demanda Bioquímica de oxigênio

(2) DQO = Demanda Química de oxigênio

Fonte: PRADA *et al.* (1997).

A partir da tabela acima, pode-se fazer as seguintes observações sobre o vinhoto:

- 1- Seu pH é ácido, podendo ficar abaixo de 4, característica que lhe confere um caráter corrosivo;
- 2- Apresenta elevada temperatura quando gerado que, como o pH, afetará o desempenho de biodigestores, que podem ser usados para redução do DBO e produção de gás natural;
- 3- Nível elevado de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio). Segundo Silva *et al.* (2007) e Cabello *et al.* (2009), essas características lhe conferem um poder poluente cerca de 100 vezes maior que o do esgoto doméstico;
- 4- Dos constituintes sólidos, a matéria orgânica é a que se encontra em maior quantidade, o que auxilia o uso do vinhoto como fertilizante, segundo Silva *et al.* (2007), porém também pode servir como alimento para vetores de doenças (RAFALDINI *et al.*, 2006);
- 5- Há presença de Nitrogênio, Fósforo e Potássio, que torna possível o uso do vinhoto como substituto da adubação mineral, segundo Simões (2004).

De acordo com essas observações serão discutidas duas formas de se utilizar o vinhoto: adubação e geração de biogás, apresentando as vantagens e desvantagens do uso deste resíduo em cada caso.

### **3.1 Uso Do Vinhoto para Adubação**

Segundo Lamo (1991) *apud* Granato & Silva (2002), uma usina que produz 120 m<sup>3</sup> de álcool por dia tem o poder poluente do esgoto doméstico de uma cidade de 270 mil habitantes. Sendo assim há grande importância no estudo de

formas sustentáveis de utilizar o vinhoto, de modo que seja amenizado seu impacto sobre o meio ambiente.

Como foi mostrado, o vinhoto apresenta uma composição química que auxilia o seu uso como adubo, pois pode substituir grande parte dos nutrientes da adubação mineral, tendo sua eficácia comprovada por diversos trabalhos onde se mostraram que após o seu emprego há um aumento da produtividade da cana-de-açúcar (AGURAJO, 1979 *apud* LEITE, 1999).

A aplicação do vinhoto como adubo através da fertirrigação<sup>10</sup> fez com que os custos médios por hectare das áreas adubadas, referentes ao seu estudo, ficassem em média 12,83% mais caras do que as áreas adubadas com adubo mineral. Porém o custo médio por tonelada de cana produzida ficou 6,77% mais barata em relação ao adubo mineral, devido ao aumento de produtividade do solo (LEITE, 1999).

Segundo Kiehl (1985) *apud* Simões *et al.* (2004), o emprego da fertirrigação faz com que o vinhoto seja mal distribuído nas lavouras. Porém, de modo geral, esta forma de aplicação do vinhoto gera os seguintes problemas:

- 1- Retenção de água no solo, o que prejudica as operações de colheita (LEITE, 1999);
- 2- Acúmulo de nutrientes no solo, o que pode acarretar na contaminação do lençol freático (SIMÕES *et al.*, 2004);
- 3- Decomposição a céu aberto do vinhoto que não é absorvido pelo solo, gerando um forte odor e a proliferação de vetores de doenças (RAFALDINI *et al.*, 2006).

Outro sistema de adubação do vinhoto é feito com o uso de caminhões tanque. Segundo Kiehl (1985); Orlando Filho *et al.* (1980) *apud* Simões *et al.* (2004) “Esse sistema permite adequar a composição química do vinhoto, com a

---

<sup>10</sup> Fertirrigação: processo conjunto de adubação e irrigação, ou seja, consiste na utilização da própria água de irrigação para conduzir e distribuir o adubo orgânico ou químico na lavoura. (VIEIRA, 1986 *apud* SALOMON, 2007).

adição de fertilizantes minerais, com certo controle e alguma uniformidade” evitando o acúmulo desnecessário ou a falta de nutrientes na lavoura. Porém o uso de caminhões aumenta o custo da adubação, além de acarretar compactação do solo. Se a distância entre a lavoura e o local onde o vinhoto *in natura* é produzido ultrapassar os 15 Km, a aplicação deste sistema se tornará mais caro que o de adubação mineral convencional (CORTEZ *et al.*, 1992 *apud* SIMÕES *et al.*, 2004), como mostrado na figura abaixo.

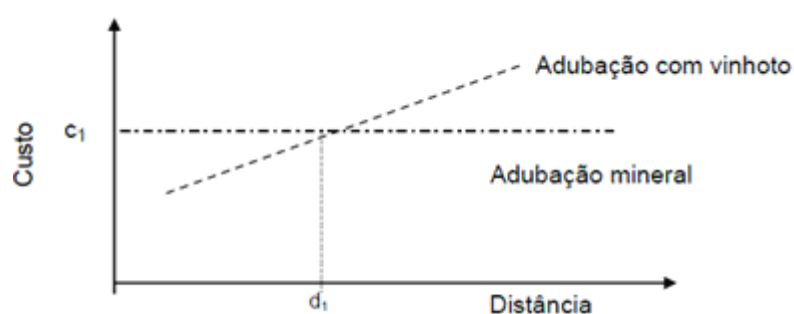


Figura 4 - Curva de Custos da Adubação e Aplicação de Vinhoto

Fonte: ORLANDO FILHO *et al.* (1980) *apud* SIMÕES *et al.* (2004)

### 3.2 USO DO VINHOTO PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS

Outra forma de utilizar o vinhoto é a biodigestão, que é um processo de conversão da biomassa em biogás e biofertilizante. Para este fim utiliza-se o biodigestor anaeróbio, que é basicamente uma câmara fechada onde ocorre a fermentação da biomassa (normalmente composta de resíduos orgânicos em geral) por bactérias chamadas metanogênicas, que só sobrevivem em ambientes sem oxigênio (BIODIGESTOR, 2007).

Segundo Procknor (2008), o biogás obtido do vinhoto é composto de 60 a 80% de metano e o resto principalmente de gás carbônico, contendo também em menores quantidades oxigênio, água e ácido sulfídrico. Segundo Granato & Silva (2002) o biogás pode ser utilizado das seguintes formas:



- Queimá-lo na caldeira para geração de vapor, o que poderia gerar uma economia de bagaço que seria queimado e que pode servir para outros fins;
- Purificá-lo para produção de metano, que poderia ser utilizado na substituição dos combustíveis utilizados na agroindústria durante a época de safra;
- Usá-lo para acionar uma turbina a gás que pode chegar a gerar energia elétrica para a usina.

Segundo Motta (1986) *apud* Granato & Silva (2002), o processo anaeróbio apresenta vantagens sobre o aeróbio tais como a produção de energia ao invés do consumo, gera uma quantidade menor de lodo, não exige localização e nem escala específica para ser aplicado, baixo custo de instalação e pode ser combinado com processos de pós-tratamento do efluente para a recuperação de produtos úteis como amônia e enxofre. Além dessas vantagens a biodigestão anaeróbia possibilita a captação do biogás, gerado através do consumo da DBO (PRADA *et al.*, 1997) e da DQO (GRANATO & SILVA, 2002) do vinhoto. Procknor (2008) diz que a cada kg de DQO consumida, são gerados aproximadamente 0,26 m<sup>3</sup> de metano nas condições normais de temperatura e pressão, ou seja, 25° C e 1 atm, que será tratado como Nm<sup>3</sup>.

Segundo a Tabela 2, 7,5% do valor energético de uma tonelada de cana-de-açúcar é aproveitado com a geração do biogás. Porém, se este gás for utilizado na produção de energia elétrica, é importante levar em consideração o valor do rendimento do gerador de energia para que se possa calcular o quanto desta energia elétrica pode ser gerada em função da produção de vinhoto. Granato & Silva (2002) estimou que o valor deste rendimento gire em torno de 35%.

Tabela 2 - Balanço energético de uma tonelada de cana

Obtenção / Tonelada de cana	Valor energético (kcal)	%
250 kg de bagaço	450 x 10 <sup>3</sup>	49,5
70 litros de álcool	392 x 10 <sup>3</sup>	43
11,83 m <sup>3</sup> de biogás	67 x 10 <sup>3</sup>	7,5
Energia Total	909 x 10 <sup>3</sup>	100

Fonte: Lamo(1991) *apud* Granato & Silva (2002).

O efluente dos biodigestores anaeróbios tem um potencial nutricional tão grande quanto o do vinhoto *in natura* (GRANATO & SILVA, 2002), pois os teores de Nitrogênio, Fósforo e Potássio permanecem iguais aos do vinhoto (PRADA *et al.*, 1997). Ainda segundo Prada *et al.* (1997), além desta característica outras podem ser citadas, tais como: a neutralidade do seu pH, baixa taxa de DBO/DQO (consumidos na produção de biogás) e eliminação do odor desagradável do vinhoto.

## **4 PROCESSO DE BIODIGESTÃO E COGERAÇÃO DE ENERGIA**

Devido as vantagens apresentadas no capítulo anterior após pesquisa bibliográfica, será dada uma ênfase no estudo da implantação de um reator numa usina sucroalcooleira. Para fazer uma maior análise sobre o assunto, a seguir será explicado como surgiram os biodigestores e as tecnologias de biodigestão disponíveis no mercado. Os biodigestores de fluxo ascendente receberão maior atenção, por representarem a família de reatores comumente utilizada na fermentação do vinhoto. Por fim serão mostrados alguns processos que podem ser incorporados após a biodigestão, de modo a dar uma finalidade rentável ao biogás.

### **4.1 Os Biodigestores**

Apesar da primeira instalação de um biodigestor visando produzir biogás tenha sido construída em 1857 na Índia, num hospital de hansenianos, este gás já era conhecido desde o século XVIII. Em 1776, o pesquisador italiano Alessandro Volta descobriu que o gás metano era encontrado em locais onde ocorria a decomposição de restos vegetais em ambientes confinados (GASPAR, 2003), chamados “anaeróbios”.

Pinto (1999) diz que no século XIX, pesquisadores da França e da Alemanha começaram a estabelecer bases teóricas experimentais para a biodigestão anaeróbia. No final deste mesmo século, foi construída na Inglaterra uma fossa séptica, para produzir biogás com a finalidade de utilizá-lo na iluminação pública.

Segundo Gaspar (2003), apesar do desenvolvimento e aplicação dos biodigestores ter ocorrido em diversos países, a Índia é considerado o maior utilizador desta tecnologia. Foi o primeiro país a ter um biodigestor com funcionamento regular, em Bobaim em 1900 e onde esta tecnologia mais prosperou, graças ao Instituto de Pesquisa Agrícola de Kanpur, onde foi

desenvolvida a primeira usina de gás de esterco. Segundo Nogueira (1886) apud Gaspar (2003), o sucesso deste empreendimento fez com que os indianos continuassem as pesquisas nessa área, formando o Gobar Gás Institute, em 1950. Tais pesquisas auxiliaram a difusão do uso de biodigestores para tratar dejetos animais no intuito de obter biogás e ainda conservar o efeito fertilizante do seu efluente (biofertilizante).

Na China também houve um grande investimento no uso de biodigestores a partir de 1958. Este interesse se deu pelos temores de um ataque inimigo, gerados durante a Guerra Fria, onde ataques nucleares impediriam as atividades econômicas e industriais. A solução encontrada foi construir diversas unidades biodigestoras, de modo a descentralizar a matriz energética do país, pois mesmo se houvesse um ataque inimigo, ainda haveriam unidades suficientes para a produção de energia. Em 1972 já haviam sido instalados 7,2 milhões de biodigestores na região do Rio Amarelo, que apresentava condições climáticas propícias para a produção de biogás, que necessita manter uma temperatura constante normalmente maior que 35 °C, para manter a atividade bacteriana.

Com a crise do petróleo, nos anos 70, diversos países procuraram modos de substituir este combustível, de modo a reduzir os impactos desta crise. Diversos países optaram pela utilização de biodigestores para complementar sua matriz energética, sendo a China e a Índia os líderes no uso desta tecnologia.

Noyola (1993) apud Rizzo & Leite (2004) classificou os biodigestores em 3 gerações de acordo com seu estado tecnológico, a saber:

- 1- Reatores de Primeira Geração: A biomassa do seu interior encontra-se em suspensão, com tempo de retenção celular (TRC) igual ao tempo de retenção hidráulico (TRH), significando que a digestão demanda muito tempo, pois as bactérias metanogênicas produzem biogás de forma lenta, e para digerir grandes volumes de resíduo é necessário um

grande reator, pois só haverá liberação do efluente depois que este se encontrar altamente digerido.

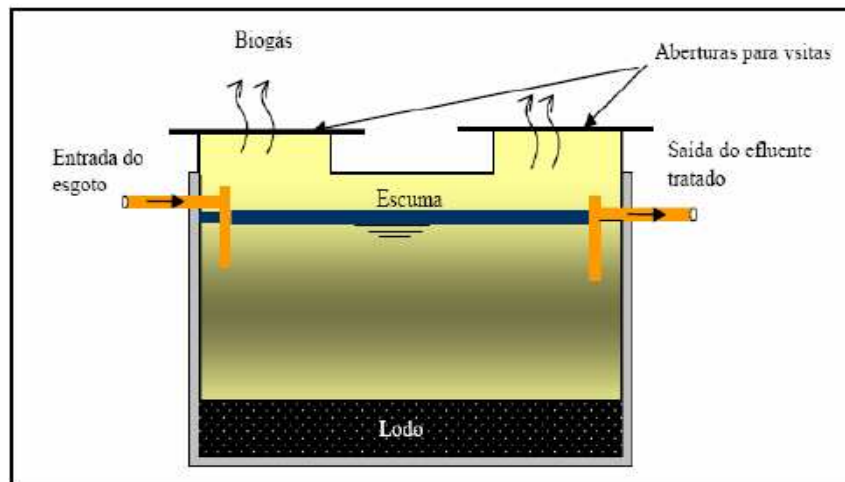


Figura 5 - Corte esquemática de um tanque séptico retangular de câmara única

Fonte: Ávila, 2005 *apud* Salomon, 2007.

- 2- Reatores de Segunda Geração: Nestes reatores os microrganismos ficam retidos dentro do reator através do uso de um suporte ou pela sua capacidade de sedimentação. Ao contrário dos reatores da primeira geração, o TRH desses reatores é bem menor do que o seu TRC, conseqüentemente exigem um volume de reator e um tempo menor para digerir seu efluente.

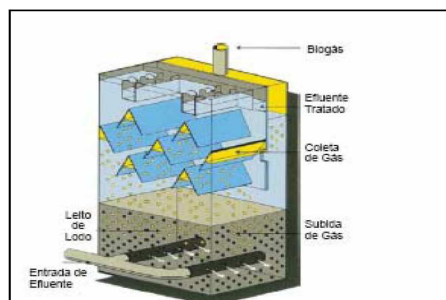


Figura 6 - Esquema de um reator UASB.

Disponível Em: <[www.codistil.com.br /pdf/etdi.pdf](http://www.codistil.com.br/pdf/etdi.pdf)> Acesso em outubro de 2009.

- 3- Reatores de Terceira Geração: Nestes reatores os microrganismos também são aderidos a um suporte, porém este poderá ser expandido<sup>11</sup> ou fluidizado<sup>12</sup>, dotado de uma grande área superficial para a adesão dos microrganismos e uma boa capacidade de sedimentação, para assegurar a retenção da biomassa no reator. Este tipo de reator também apresenta um TRH bem menor que o TRC, fazendo com que o processo de digestão dure poucas horas.

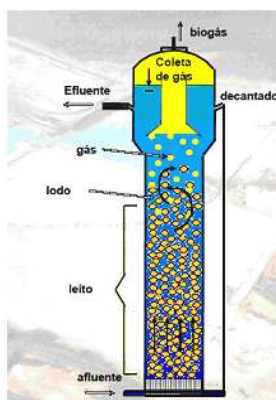


Figura 7 - Esquema de um reator de leito fluidizado. Fonte

Disponível em <[http://hygeia.fsp.usp.br/seacs/pdf/tema9/tema9\\_-\\_dione\\_mori\\_t.pdf](http://hygeia.fsp.usp.br/seacs/pdf/tema9/tema9_-_dione_mori_t.pdf)>, Acesso outubro de 2009.

A Figura 8 apresenta um resumo das tecnologias de biodigestão de cada geração.

<sup>11</sup> Diz-se expandido por implicar numa maior área de contato entre o leito e a biomassa para acelerar o processo de biodigestão, dando um formato mais achatado ao biodigestor.

<sup>12</sup> O leito é fluidizado quando a biomassa fica em circulação dentro do biodigestor, auxiliando a homogeneização do fluido em fermentação contido neste.

Reatores de 1ª Geração	Reatores de 2ª Geração	Reatores de 3ª Geração
Fossa Moura Tanque Séptico Tanque Imhoff Lagoas Anaeróbias Reator Convencional Reator Anaeróbio de Contato	Filtro Anaeróbio Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Camada de Lodo(UASB)	Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado Reator Anaeróbio de Leito Expandido

**Figura 8 - Gerações de Reatores Anaeróbios**

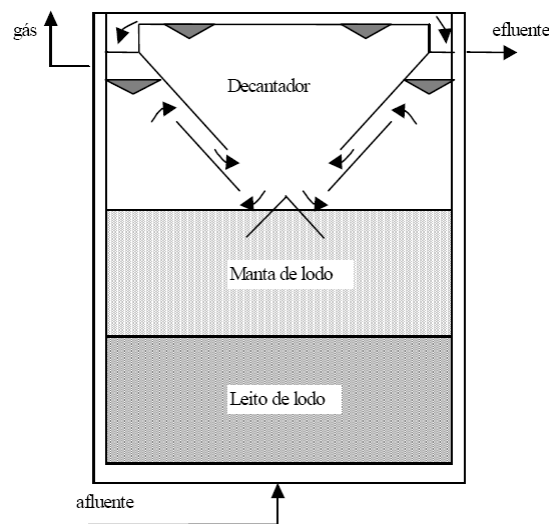
Fonte: Rizzo & Leite, (2004) *apud* Salomon (2007).

#### 4.1.1 Biodigestores de Fluxo Ascendente

Esta família de biodigestores é utilizado para a digestão do vinhoto devido a sua alta carga orgânica e taxa de produção nas usinas, da ordem de milhares de metros cúbicos diários. Seria necessário um reator com um volume muito grande para digerir todo o resíduo gerado segundo técnicas mais antiquadas, em que o tempo de retenção do efluente poderia chegar a meses. Para tornar tecnicamente viável a digestão do vinhoto é necessário um reator que demande um menor tempo de retenção hidráulico (TRH), diminuindo assim a necessidade do aumento do volume deste pela quantidade de efluente digerido.

Segundo Pinto (1999), o TRH é reduzido ao manter a concentração de microorganismos no interior do reator elevada. Este feito pode ser conseguido mantendo uma recirculação externa ou retenção interna de microorganismos. Segundo Florêncio (1999) *apud* Salomon (2007), a entrada do afluente num biodigestor de fluxo ascendente, ocorre em sua parte inferior, e em seguida este segue um fluxo de baixo para cima, o que faz com que microorganismos cresçam dispersos, não necessitando um material de suporte e um dispositivo de mistura, formando flocos ou grânulos que permanecem no reator aumentando a atividade bacteriana. O biogás produzido é extraído na parte superior do biodigestor, com o uso de um separador trifásico (sólido-líquido-gás), que separa o gás do efluente e faz o lodo retornar a câmara de digestão,

dando continuidade ao processo (Figura 9). No reator do tipo UASB (*Upflow anaerobic sludge blanket* ou Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Camada (Manta) de Lodo), a remoção do DQO de efluentes industriais chega a ser de 80% com uma carga orgânica aplicada de 4 a 12 kg DQO/m<sup>3</sup>.dia, com um TRH de 4 a 12 horas (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 1991 *apud* SALOMON, 2007).



**Figura 9 - Representação esquemática de um biodigestor de fluxo ascendente**

Fonte: IPT, 1990 *apud* PINTO, 1999.

Segundo Salomon (2007) as vantagens do uso de um reator de fluxo ascendente (UASB) são as seguintes:

- É um sistema compacto;
- Tem baixo custo de implantação e operação;
- Ter uma baixa produção de lodo;
- Tem um baixo consumo de energia;
- Tem satisfatória eficiência de remoção de DQO e DBO;
- Possibilidade de uma rápida partida e elevada concentração de lodo excedente.



Segundo Souza, 1986 *apud* Salomon (2007), a produção de biogás a partir de determinado resíduo neste reator pode ser estimada segundo os seguintes critérios:

1. A produção teórica de CH<sub>4</sub>, num estado constante, é proporcional a quantidade de DQO (Demanda Química de Oxigênio) consumida no reator (1g de DQO consumido corresponde à produção de 0,35 litro de CH<sub>4</sub>, a temperatura e pressão normais);
2. Uma parte do biogás produzido é dissolvida e perdida no efluente;
3. Parte da DQO é transformada em biomassa, por isso não há conversão total desta em biogás.

Pinto (1999) diz que várias modificações foram propostas para otimizar os reatores UASB, de modo a diminuir o tempo de retenção e um crescimento da taxa orgânica processada. Para aumentar o contato do resíduo com a biomassa bacteriana, necessitando assim de um menor TRH para completar a digestão. Foram propostas modificações a este reator, tais como a expansão do leito de lodo, que deu origem a uma nova família de reatores, do tipo Leito de Lodo Granular Expandido (EGSB - *Expanded Granular Sludge Bed*), sendo o reator de Circulação Interna (IC - *Internal Circulation*) o que possui melhor desempenho (Driessen *et al.*, 1996 *apud* PINTO, 1999).

Ainda segundo Pinto (1999), 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”. As principais características deste reator são:

1. É um reator delgado, com altura entre 16 e 24 metros e superfície de área relativamente pequena (DRIESSEN *et al.*, 1996 e VERSTRAETE, 1996 *apud* PINTO, 1999);
2. Trabalha com taxas de alimentação de até 40 kgDQO/m<sup>3</sup>.dia (DRIESSEN *et al.*, 1996 e VERSTRAETE, 1996 *apud* PINTO, 1999).
3. A taxa de recirculação dos reatores IC depende da DQO do afluente e é auto regulada. 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. Similarmente, quanto menor a concentração de DQO do afluente, menor pressão do biogás e menor a taxa de recirculação interna do efluente (PINTO, 1999);
4. 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 (DRIESSEN *et al.*, 1996 *apud* PINTO, 1999);
5. A DQO do afluente é quase totalmente removida neste tipo de reator(PINTO, 1999).

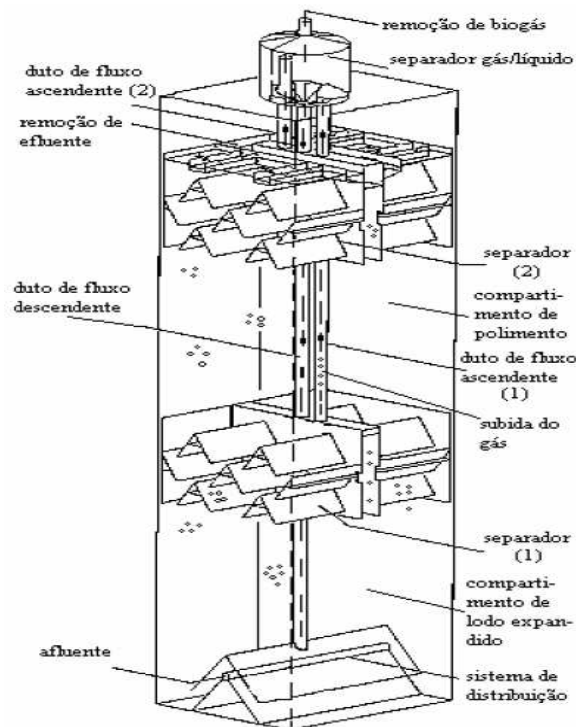


Figura 10 - Representação esquemática do reator IC

Fonte: DRIESSEN *et al.*, 1996 *apud* PINTO, 1999.

## 4.2 PROCESSOS RELACIONADOS À BIODIGESTÃO

Dependendo da finalidade que será dada ao biogás, ele deverá passar por tratamentos adequá-lo ao processo em que será utilizado. Como já foi citado, o biogás será empregado para a produção de energia térmica, e esta poderá ser utilizadas em diversos processos. Seu tratamento mais refinado pode ser exemplificado com o processo de uma estação de biogás destinado ao uso automotivo (Figura 11), pois este implica na purificação quase completa deste combustível, que passará a ser composto quase totalmente de metano.

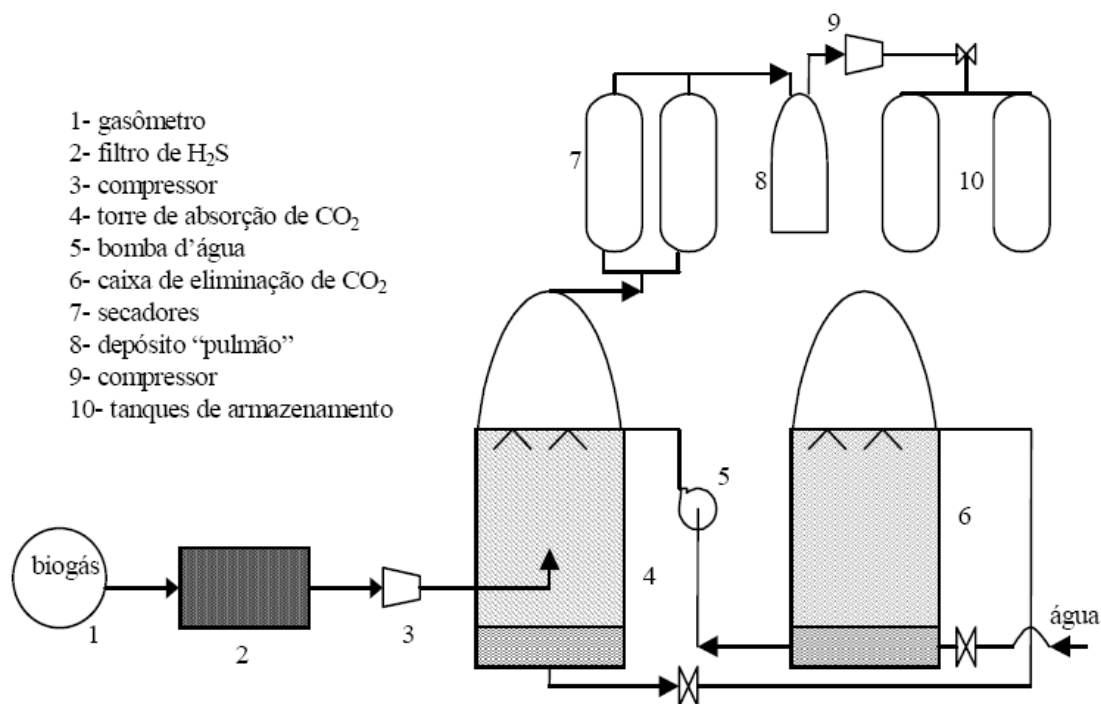


Figura 11 - Estação para biogás automotivo

Fonte: Lucas & Silva (1990) *apud* Pinto (1999).

Como explicado por Pinto (1999, pag. 100) na figura 11, ao sair do biodigestor, dar-se-á início ao seguinte processo:

"...o biogás é armazenado em gasômetro auxiliar (1) e, a seguir, passa por um filtro de óxido de ferro para a eliminação de H<sub>2</sub>S; um compressor de baixa capacidade (3) força o biogás a passar pela torre de absorção de CO<sub>2</sub> (4); uma vez livre do CO<sub>2</sub>, o biogás, já com 98 a 99% de metano, passa por secadores (7) a fim de reter a umidade nele contida, chegando num depósito tipo "pulmão", que alimenta um compressor de média capacidade (9), o qual comprime o biogás já purificado nos cilindros (10). A água de lavagem proveniente da torre (4) tem sua regeneração na caixa de eliminação de CO<sub>2</sub> (6) e retorna, por intermédio de uma bomba hidráulica (5) para a torre de lavagem, fechando-se o ciclo."

É importante ressaltar que nem todas as aplicações do biogás necessitaram de um processo como este, pois em certos casos não será

necessária uma limpeza do gás. Segundo Pinto (1999), existem dois tipos de aplicações principais para o biogás:

1. Queima em Dispositivos Estacionários: Nestes dispositivos o biogás poderá ser usado sem nenhum tratamento prévio, ou seja, com as mesmas características que ele tinha ao sair do biodigestor. Exemplos de aplicação: fogões, lampiões, campânulas para aquecimento, conjuntos moto-bomba e conjuntos geradores, entre outros.
2. Queima em Motores Automotivos: Estes motores utilizam o biogás purificado, com composição de 98 a 99% de metano para seu funcionamento. Portanto faz-se necessária a remoção do CO<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub>S presentes em sua composição. O H<sub>2</sub>S é retirado para não danificar os componentes do motor e o CO<sub>2</sub>, que não ajuda na combustão, ocuparia um grande volume de armazenamento. Exemplos de aplicação: carros, caminhões e outros veículos.

Pinto (1999) também exemplifica em seu trabalho a aplicação industrial da biodigestão do vinhoto para diversos fins da Destilaria São João, mostrado na figura 12. Nota-se que este esquema mostra diversas aplicações para o vinhoto através da biodigestão, como a adubação do efluente do biodigestor, aplicação veicular e geração de energia.

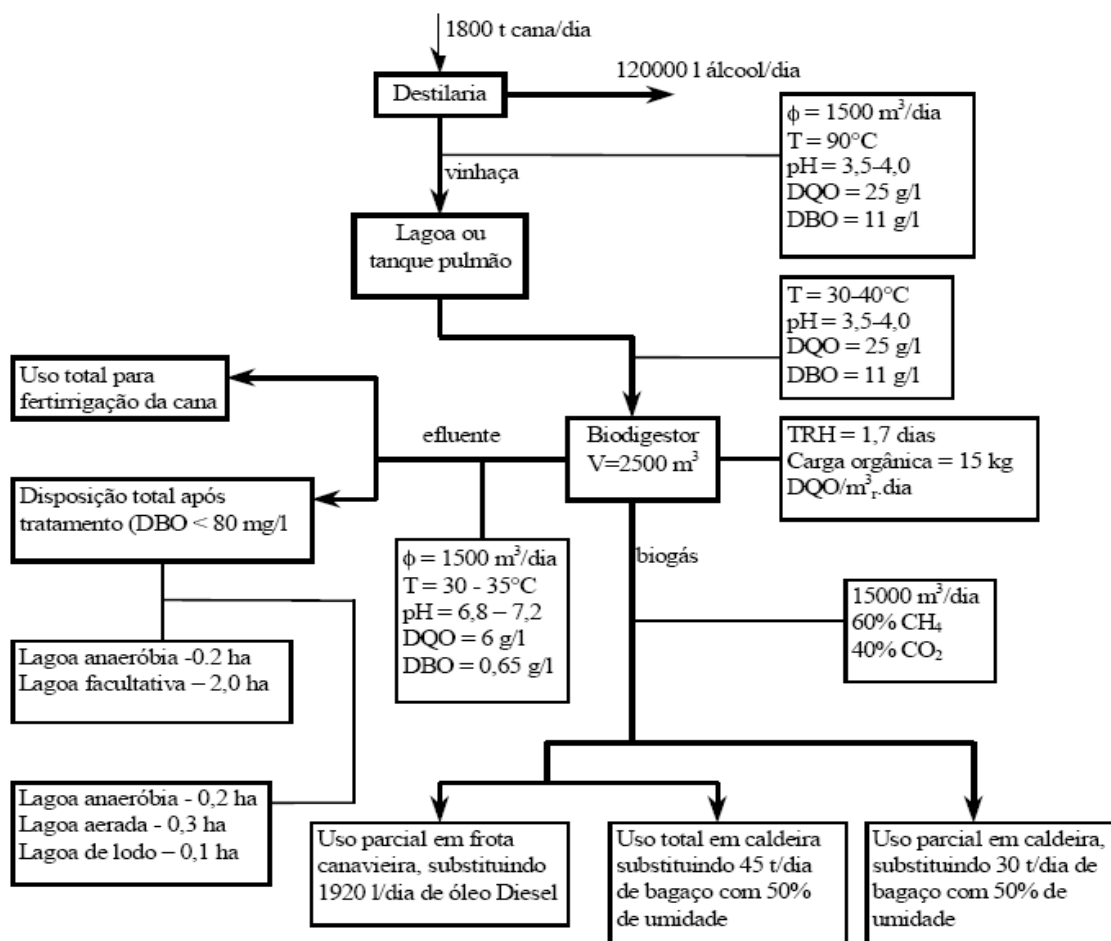


Figura 12 - Exemplo de instalação industrial de biodigestão da vinhaça

Fonte: IPT (1990) apud Pinto (1999).

### 4.3 Geração de Energia

Nesta seção serão apresentados alguns tipos de sistemas onde o biogás poderá ser utilizado, dizendo como eles funcionam e as modificações que podem lhes ser necessárias para a utilização deste combustível.

#### 4.3.1 Motores de combustão interna (MCI)

Os motores de combustão interna são máquinas térmicas, que utilizam a energia química proveniente de uma reação exotérmica que ocorre em seu interior, utilizando os gases provenientes desta para gerar energia mecânica ou elétrica, através da compressão, aumento da temperatura (queima), expansão e exaustão destes gases.

Segundo Salomon (2007), é a tecnologia mais difundida dentre as máquinas térmicas, por ser simples, robusta e de alta relação potência/peso, o que facilita seu emprego na geração de eletricidade contínua, propulsão, *back-up* ou carga de pico, entre outras aplicações. Estes equipamentos são muito usados com a queima do biogás, até mesmo sem tratamento prévio, devido a sua flexibilidade.

Salomon (2007) lista as seguintes características para a aplicação deste tipo de motor:

- São utilizados para pequenas e médias demandas elétricas, de centenas de kW até dezenas de MW.
- Podem utilizar diversos tipos de combustíveis líquidos ou gasosos tais como óleo diesel, óleo pesado, gás natural, biogás ou ainda uma mistura deles. Isso é bastante vantajoso, pois o sistema torna-se muito flexível.
- A relação energia térmica/energia mecânica é menor que os outros acionadores primários, o que pode ser interessante para cogeração no setor terciário.
- A eficiência dos motores de combustão interna não é tão sensível às condições ambiente locais (temperatura, pressão e umidade) quanto são as turbinas a gás.

- As instalações são modulares e flexíveis, com isto o tempo de construção de uma central é curto e a entrada em operação (start-up) é rápida. Além de serem apropriados para as condições de partidas e paradas diárias.
- Possui alta relação potência/peso.
- Requerem manutenções mais freqüentes, porém o preço destas não costuma variar.
- Segundo Lombard *et al.* (2004) *apud* Salomon (2007), há um grande decréscimo da eficiência do MCI quando o teor de CH<sub>4</sub> é menor que 50%.

Ainda segundo Salomon (2007), atualmente este tipo de motor já vem preparado para queimar biogás com diferentes teores de metano, dióxido de carbono e ácido sulfídrico.

#### **4.3.2 Caldeiras**

Caldeiras são recipientes metálicos cuja função primordial é gerar vapor com a energia liberada através da queima de algum combustível. O biogás pode ser empregado nelas, porém estas deverão passar por pequenas modificações para se adequarem as características deste gás, como as seguintes (SALOMON, 2007):

- Instalação de purgadores e linhas de condensado, para impedir danos aos equipamentos e problemas na operação das caldeiras.



- Ajuste da válvula de controle de combustível, pois dependendo do percentual de metano no biogás, este necessitará de uma vazão maior para gerar um uma queima adequada.
- Instalação de sensores ultravioletas para monitorar a chama da caldeira, pois esta pode se instabilizar, ou até apagar, com o teor variável de metano no biogás.
- Uso de um combustível auxiliar para manter o sistema estável quando o biogás não conseguir manter um nível aceitável de queima (USEPA, 2001 *apud* SALOMON, 2007).
- O revestimento do pré-aquecedor e da chaminé com material anticorrosivo, o controle da temperatura dos gases de exaustão acima do ponto de orvalho e a circulação adequada da água podem reduzir os efeitos corrosivos. (USEPA, 2001 *apud* SALOMON, 2007).

É interessante que o biogás passe por um certo tratamento antes de utilizá-lo em caldeiras, para assegurar o bom funcionamento do sistema. Com o uso de limpadores de gás, seriam reduzidos os teores de CO<sub>2</sub> e de H<sub>2</sub>S, estabilizando a queima do biogás e reduzindo os danos de corrosão causados pelo ácido sulfídrico.

#### **4.3.4 Microturbinas a Gás**

Segundo Dill (2008), as microturbinas a gás utilizam o ar atmosférico, que é aquecido e comprimido em seu interior, para alimentar a câmara de combustão do gerador. Ao entrar na câmara, o ar é misturado ao combustível, e o gás resultante é queimado a pressão constante, fazendo com que a temperatura dos gases aumente. Em seguida, os gases aquecidos se expandem para as pás da microturbina, o que faz com que elas girem em alta

velocidade. Pelo fato da microturbina ser montada no mesmo eixo do compressor, ao completar o ciclo, esta fica responsável pela energia necessária para girar o compressor e o gerador elétrico.

Segundo Salomon (2007), estas turbinas podem trabalhar em variadas faixas de potência, indo de 15 a 300 kW. Para a utilização de um gás de baixo poder calorífico, como o biogás, as microturbinas precisam de um remodelamento nas suas câmaras de combustão para a queima deste tipo de combustível, além da necessidade da limpeza do biogás.

Ainda segundo Salomon (2007), uma das principais vantagens da utilização de microturbinas a biogás estão:

- Capacidade para operar um gás utilizando baixo conteúdo de metano:  $\text{CH}_4 > 35\%$ . Sem afetações na sua eficiência.
- Bom comportamento a temperaturas entre  $-10^\circ\text{C}$  a  $45^\circ\text{C}$ .
- Boa eficiência 30 a 33 % (baseada no poder calorífico inferior).
- Baixas emissões ( $< 10$  ppm de  $\text{NO}_x$ ).
- Possibilidade de cogeração.
- Excelente modularidade.

Desvantagens:

- A eficiência a cargas parciais é baixa.
- Limitada experiência de utilização.
- O uso de rolamentos a ar reduz os custos de manutenção mas, é imprescindível o uso de filtros de ar.

## **5 ESTUDO DE CASO**

### **5.1 OBJETO DE ESTUDO**

A COAGRO (COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO) foi criada em 2002 com intuito de tentar amenizar os maus resultados do setor sucroalcooleiro da região norte fluminense nos anos anteriores. Estes resultados se deram pela ocorrência de diversos fatores, a saber:

- Modificações climáticas e constantes estiagens que contribuíram para a redução da produção de cana-de-açúcar;
- Extinção do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) com posterior desregulamentação do setor;
- Inexpressivo financiamento para custeio e investimento;
- Aumento da competição e modernização do setor, que contribuiu para o fechamento de 8 usinas;
- Relação comercial entre fornecedores e usinas desgastada, com seu ápice em 2002.

Por causa desses fatores e outros como a evasão da mão-de-obra e perda do poder de comercialização com as usinas, que pagavam um valor considerado baixo pela cana comprada, os produtores de cana-de-açúcar da região resolveram buscar meios para melhorar sua situação. A solução encontrada foi arrumar uma forma dos próprios fornecedores beneficiarem sua cana, produzindo açúcar e álcool, com isso eles conseguiriam uma remuneração mais justa para sua matéria prima, a cana-de-açúcar.

Em 2002, a diretoria da ASFLUCAM (Associação Fluminense dos Produtores de Cana) começou a estudar meios de viabilizar um projeto que proporcionasse a recuperação de uma usina na região norte fluminense. A

conclusão deste estudo foi que o cooperativismo minimizaria os problemas regionais do setor sucroalcooleiro, criando assim a COAGRO. Os diretores desta cooperativa se propuseram a alugar o parque industrial da Usina São José, onde está sendo realizado este estudo, pelo prazo de 15 anos, a partir de 2003.

## 5.2 Estudo de Viabilidade Econômica da Biodigestão do Vinhoto para Produção de Biogás na COAGRO

O principal objetivo deste capítulo é analisar a viabilidade econômica da utilização do vinhoto gerado na COAGRO para a produção de biogás, através do uso de um biodigestor. Com a biodigestão do vinhoto alguns dos problemas decorrentes de sua utilização como adubo poderão ser sanados, tais como a emissão de metano na atmosfera, mau cheiro, uso de corretores de pH no solo e proliferação de vetores de doenças, pois grande parte da carga orgânica será consumida no reator. Além disso, ao capturar o metano no processo, este poderá ser utilizado para a produção de energia térmica para várias finalidades. Neste estudo serão feitas projeções para analisar algumas formas de aplicação do biogás, como a queima nas caldeiras para economizar bagaço, uso como combustível automotivo e uso como combustível de olarias.

A viabilidade do projeto proposto será avaliada através da obtenção do seu VPL (Valor Presente Líquido) e da TIR (Taxa Interna de Retorno). Segundo Moura (2006), VPL é uma das formas mais empregadas para realização da análise sobre a viabilidade de empreendimentos que consiste em trazer o valor de todos os fluxos de caixa<sup>13</sup> futuros para o presente, descontando uma taxa de juros destes valores. Sendo assim a fórmula do VPL pode ser escrita desta maneira:

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{R_j - C_j}{(1 + i)^j} - \frac{I_j}{(1 + i)^j}$$

<sup>13</sup> Fluxo de Caixa: soma algébrica dos valores das receitas (positivos) e despesas (negativos) (SALOMON, 2007).

Onde:

j: é o período considerado (Ex.: 1º ano, 2º ano);

n: é o número total de períodos do investimento ou horizonte (Ex.: 5 anos, 10 anos);

i: é a taxa de juros a ser descontada (taxa de retorno (TIR) ou taxa de desconto (VPL))

R<sub>j</sub>: é a receita prevista obtida em determinado período;

C<sub>j</sub>: é o custo previsto obtido em determinado período;

l<sub>j</sub>: é a parcela do investimento a ser paga em determinado período;

A TIR é calculada ao simular diversos valores de VPL a taxas de desconto diferentes, considerando a taxa de retorno a maior taxa de desconto do investimento que apresenta um resultado não negativo, ou seja, ela apresenta a taxa de retorno anual máxima que o investidor poderá esperar do seu investimento. Por exemplo, se um indivíduo aplicar uma quantia C do seu capital numa poupança, a uma taxa de retorno anual de aproximadamente 1%, ao final de 10 anos ele terá um retorno equivalente a  $C \times (1,01)^{10}$ , ou seja, 1,1046C, pouco mais de 10% do capital investido. Outros investimentos, como a bolsa de valores, apresentam taxas de retorno mais elevadas assim como o risco associado a este tipo de investimento.

As análises dos cenários propostos serão feitas para o horizonte de 10 anos, utilizando valores dos custos de investimento, custos operacionais e receitas em geral baseados em fontes consideradas confiáveis.

Todo o capital utilizado nos cenários que serão propostos será considerado como oriundo do Fundo de Desenvolvimento de Campos (FUNDECAM). Este fundo foi criado em 2001 utilizando o capital proveniente dos *Royalties* da exploração do petróleo e do gás da região norte fluminense. Ele oferece crédito

em condições vantajosas para a amortização<sup>14</sup> de investimentos que tragam desenvolvimento ao município de Campos dos Goytacazes e região. Os termos de financiamento são os seguintes:

- Período de Carência<sup>15</sup>: 12 meses;
- Prazo para Amortização<sup>16</sup>: 60 meses;
- Taxa de juros: 6% ao ano.

Outros parâmetros adotados para o estudo estão listados a seguir:

- A Taxa Mínima de Atratividade<sup>17</sup> estipulada pela COAGRO para seus investimentos é de 15% ao ano.
- A depreciação dos equipamentos utilizados será de 10% ao ano;
- A cotação do dólar utilizada será de R\$ 1,80 e R\$ 2,50 para o euro.
- O custo dos caminhões adotados no estudo será superior ao preço de mercado, para que seja coberto também o custo de frete e possíveis mudanças dos preços destes veículos.

Antes de apresentar os cenários propostos, é necessário mostrar os dados e os cálculos que dão origem aos valores das despesas e receitas apresentadas em cada um deles. Todos os cálculos deste estudo se baseiam principalmente nos dados fornecidos pela COAGRO, referentes a produção da Usina São José, encontrados na tabela 3 e nos dados do biodigestor segundo Procknor (2008), apresentados na tabela 4. Os demais dados serão apresentados em cada cenário específico.

---

<sup>14</sup> Amortização: é um processo de extinção de uma dívida através de pagamentos periódicos.

<sup>15</sup> Prazo de Carência: Corresponde ao período compreendido entre o prazo de utilização e o pagamento da primeira amortização.

<sup>16</sup> Prazo para Amortização: É o intervalo de tempo durante o qual são pagas as amortizações.

<sup>17</sup> Taxa Mínima de Atratividade (TMA): é a taxa de retorno mínima que o investimento deverá apresentar para que o investidor aplique seu capital nele. O projeto não será considerado viável caso a sua TIR seja menor que a TMA.

**Tabela 3 - Dados do processo produtivo da Usina São José.**

Quantidade de cana moída por safra (ton/safra)	700.000
Quantidade de Álcool produzido por safra (litros/safra)	30.000.000
Período de Safra (dias)	200
Cana moída (ton/dia)	3.500
Quantidade de álcool por tonelada de cana (litros)	42,857
Vinhoto gerado por litro de álcool (litros)	11
Açúcar (ton/safra)	435.000
Energia consumida na COAGRO no período de safra (kWh)	3.500
Consumo de água diário (litros)	4.000.000

Fonte: COAGRO, 2009.

A DQO do vinhoto adotada para este estudo será baseada nas informações obtidas na revisão bibliográfica, pois não é feita na usina a medição desta variável do resíduo. Segundo Procknor (2008), a DQO da vinhaça proveniente da fermentação do mosto proveniente da mistura de melaço e caldo de cana, que é o utilizado na COAGRO, fica entre 30 e 35 kg por m<sup>3</sup> do resíduo. Foi decidido então adotar o valor médio de 33 kg/m<sup>3</sup> para facilitar a apresentação dos resultados de cada cenário proposto.

De acordo com os dados da tabela 3, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- A produção diária de álcool é de 150.000 litros (150 m<sup>3</sup>) por dia, resultado da razão entre a produção de álcool por safra pela sua duração, em dias (30.000.000 litros de álcool por dia / 200 dias).
- A produção diária de vinhoto é de 1.650.000 litros (1.650 m<sup>3</sup>), calculado multiplicando a produção diária de álcool pela quantidade deste resíduo

gerado por cada litro do combustível (150.000 litros de álcool por dia x 11 litros de vinhoto/litro de álcool).

- A quantidade de DQO produzida diariamente é da ordem de 54.450 kg, calculado multiplicando-se a quantidade de vinhoto produzido por dia pela DQO estipulada (33 kg/m<sup>3</sup> de vinhoto x 1.650 m<sup>3</sup> de vinhoto por dia).

O biodigestor utilizado no estudo será do tipo IC, o mesmo apresentado no capítulo 4, que será dotado de limpadores de gás que removerão o excesso de gás carbônico e todo ácido sulfídrico, como mostrado na figura 11, deixando o biogás com uma concentração de 98% de metano. Na tabela 4 são mostradas as informações referentes aos custos e desempenho médio desta planta.

**Tabela 4 - Parâmetros da planta de biodigestão**

Produção típica de metano (Nm <sup>3</sup> /kg DQO consumido)	0,260
Taxa de remoção de DQO no reator (%)	85%
Produção Média de Biogás (Nm <sup>3</sup> /kg DQO removido)	0,375
Produção Média de lodo no Reator (% do efluente)	2%
Custo Médio do Biodigestor com limpadores de gás (R\$/kg de DQO aplicada por dia)	90,00
Custo de operação e manutenção do digestor anaeróbio (R\$/kg de DQO aplicada)	0,017

Fonte: PROCKNOR, 2008.

Para que todo o vinhoto produzido na usina seja processado pelo biodigestor, será necessário construir um reator capaz de lidar com uma carga diária de DQO da ordem de 54.450 kg. De acordo com a tabela 4, o custo de implantação deste reator será R\$ 4.900.500,00 (90 R\$ por kg de DQO x 54.450 kg de DQO) e R\$ 185.130,00/ano para sua operação e manutenção (54.450 kg



de DQO por dia x 0,017 R\$/ kg de DQO x 200 dias por ano, referente ao tempo de safra).

O potencial de geração de metano diário nesta usina poderá ser de 14.157 Nm<sup>3</sup> (1650 m<sup>3</sup> de vinhoto x 33 kg de DQO por m<sup>3</sup> de vinhoto x 0,260 Nm<sup>3</sup> de metano/ kg de DQO), caso todo o vinhoto gerado seja processado de acordo com os dados das tabelas 3 e 4.

### 5.2.1 Cenário 1 : Venda do Biogás para Olarias

Esta opção propõe vender o biogás produzido na COAGRO para as olarias do município de Campos dos Goytacazes capacitadas para o uso do gás natural em suas instalações. Ao queimar biogás nas fornalhas, será evitado ou reduzido o uso de madeira como combustível, além de reduzir a poluição gerada na sua queima. Outra vantagem do uso do gás se dá pelo fato deste combustível ter um poder calorífico menos variável que o da lenha, que se modificará com a humidade.

Para se estipular um preço de venda do biogás limpo (98% metano) para as olarias, foi utilizado o preço da lenha por kJ gerado em sua queima, de modo a ter como base um preço para a quantidade de energia gerada por metro cúbico de biogás queimado. Os dados utilizados foram os seguintes:

**Tabela 5 - Poder calorífico e preço da lenha**

Poder Calorífico (kJ/kg)	13.637,200
Preço por tonelada (R\$/kg)	0,441
Preço por kJ gerado (R\$/kJ)	0,000032351

**Fonte: Portal do Meio Ambiente, 2009; INOVABRASIL, 2008.**

Tabela 6 - Custos da compra e utilização de um caminhão tanque

CUSTO DA AQUISIÇÃO DE UM CAMINHÃO TANQUE (EUR)	45.000,000
CUSTO DA AQUISIÇÃO DE UM CAMINHÃO TANQUE (R\$)	112.500,000
CUSTO ANUAL DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	30.000,000
DEPRECIÇÃO DO CAMINHÃO	11.250,000

Fonte: AUTOLINE, 2009.

O valor da energia gerada pela queima da lenha foi calculado dividindo o preço da tonelada deste material pelo seu poder calorífico (em kJ). O poder calorífico do biogás limpo será considerado igual a 98% do poder calorífico do metano, que segundo Procknor (2008) é 34.450 kJ/Nm<sup>3</sup>, já que a composição do biogás limpo é de 98 a 99% deste gás. Multiplicando 33.761 kJ/Nm<sup>3</sup> (34.450 kJ/m<sup>3</sup> x 0,98) pelo preço energético da lenha (0,000032351 R\$/kJ) fornecerá um custo equivalente do metro cúbico de biogás limpo em relação a lenha de 1,092 R\$/Nm<sup>3</sup>. Para aumentar a atratividade da compra do biogás, será proposto um preço de venda com redução de 20% do preço obtido no cálculo acima, ou seja, o biogás será vendido a 0,874 R\$/Nm<sup>3</sup>.

O custo de um caminhão tanque modelo Scania – LPG, feito para o transporte de gás, fica em torno de R\$ 112.500,00, o custo de operação e manutenção anual será considerado de R\$ 30.000,00, o que engloba gasto com combustível, concertos, impostos e qualquer outro custo decorrente do uso deste veículo. Este caminhão é capaz de transportar até 35,3 m<sup>3</sup> de gás a uma pressão máxima de 26 MPa, podendo transportar mais de 8.000 m<sup>3</sup> de biogás limpo por viagem. Como a produção diária deste gás fica em torno de 14.157 Nm<sup>3</sup>, seriam necessárias apenas 2 viagens diariamente para levar todo biogás produzido ao seu destino.

Para este cenário, será necessário um investimento da ordem de R\$ 5.013.000, que equivale o custo da planta de biodigestão (R\$ 4.900.500,00) e do caminhão tanque (R\$ 112.500,00). Sua amortização<sup>18</sup>, de acordo com os termos do FUNDECAM, deverá ocorrer após 60 meses (5 anos) do prazo de

<sup>18</sup> Amortização: Processo de reembolso de uma dívida através de pagamentos periódicos.

carência (1 ano), sob uma taxa de juros anual de 6%, pagos em 5 parcelas iguais de R\$ 1.341.704,96 ao final de cada ano, a partir da data do empréstimo. Sendo assim a primeira parcela será paga no final do primeiro ano e a última no final do quinto, independentemente do tempo de duração do investimento.

Os custos de operação e manutenção (Custos O&M) serão a soma dos gastos decorrentes da utilização do biodigestor e do caminhão tanque, que juntos somam, anualmente, uma quantia de R\$ 215.130,00. A receita prevista com a venda do biogás foi calculada multiplicando a produção anual de biogás limpo (98% metano) pelo preço estipulado da venda deste gás para as olarias (R\$ 0,874), resultando em R\$ 2.473.300,00 por ano. Por fim, foi calculada a receita proveniente da venda do lodo ativado, gerado no biodigestor, que segundo Procknor (2008), pode ser usado como adubo ou como ração animal e tem um preço de mercado da ordem de R\$ 50,00 por tonelada. Multiplicando este valor pela produção anual de lodo (217,8 ton), obtém-se R\$ 13.068,00, valor que se manterá igual em todos os cenários considerados.

Os resultados obtidos para este cenário no horizonte de 10 anos, com uma taxa de desconto de 15% são mostrados abaixo:

**Tabela 7 - Fluxo de caixa e VPL da venda do biogás para as olarias (10 anos)**

ANO / ITEM	Amortização do Investimento	Custo O&M	Depreciação	Receita com a venda de biogás para as olarias	Receita c/ venda do lodo	Resultado do Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Descontado
1	-1.341.704,96					-1.341.704,96	-1.166.699,97
2	-1.341.704,96	-215.130,00	-501.300,00	2.473.985,35	13.068,00	428.918,38	324.323,92
3	-1.341.704,96	-215.130,00	-501.300,00	2.473.985,35	13.068,00	428.918,38	282.020,80
4	-1.341.704,96	-215.130,00	-501.300,00	2.473.985,35	13.068,00	428.918,38	245.235,48
5	-1.341.704,96	-215.130,00	-501.300,00	2.473.985,35	13.068,00	428.918,38	213.248,24
6	0,00	-215.130,00	-501.300,00	2.473.985,35	13.068,00	1.770.623,35	765.489,34
7	0,00	-215.130,00	-501.300,00	2.473.985,35	13.068,00	1.770.623,35	665.642,90
8	0,00	-215.130,00	-501.300,00	2.473.985,35	13.068,00	1.770.623,35	578.819,91
9	0,00	-215.130,00	-501.300,00	2.473.985,35	13.068,00	1.770.623,35	503.321,66
10	0,00	-215.130,00	-501.300,00	2.473.985,35	13.068,00	1.770.623,35	437.671,01
						<b>VPL</b>	<b>2.849.073,29</b>

Com a taxa de 15%, o VPL será positivo e a tabela 8 mostra os resultados dos VPLs para diferentes taxas de desconto, de modo que ao final da sua análise possa ser estipulado a TIR para o horizonte citado.

**Tabela 8 - VPL para diferentes taxas de desconto no horizonte de 10 anos**

<b>Taxa de Desconto</b>	<b>VPL</b>
5%	6.177.095,86
20%	1.935.250,35
40%	278.204,61
50%	-30.618,58

Como pode ser observado na tabela acima, para o horizonte de 10 anos, a TIR ficará entre 40 e 50%, mais precisamente 48,706%, apresentando um grande grau de viabilidade, já que a taxa de retorno é maior que 3 vezes a taxa mínima de atratividade. O preço mínimo a ser pago pelo biogás limpo de modo a manter o investimento viável para cada horizonte (com a taxa de desconto de 15% ao ano) é de aproximadamente R\$ 0,64, sendo este 58,6% do valor equivalente do biogás em relação a lenha.

Apesar dos bons resultados, existem algumas considerações a serem feitas:

1. Nem todas as olarias de Campos dos Goytacazes são capazes de utilizar o biogás como combustível.
2. Não há garantia de que 100% do biogás produzido seja comercializado.

3. A produção de biogás só poderia ocorrer durante o período de safra, o que pode inviabilizar o comércio com as olarias que trabalham o ano inteiro.
4. É possível que o preço de venda do preço do biogás não seja suficientemente baixo para atrair o interesse de possíveis compradores.

A principal contribuição ambiental do uso do biogás nas olarias, além das vantagens já apresentadas pelo uso do biodigestor, seria a economia anual de aproximadamente 13.316,28 toneladas de lenha por ano, reduzindo a poluição do ar e o corte de árvores.

### **5.2.2 Cenário 2 : Substituição de parte do bagaço na geração de energia elétrica**

Este cenário visa utilizar todo biogás que poderá ser produzido na usina para substituir parte de bagaço utilizado na geração de energia, podendo este ser utilizado em para outros fins mais nobres.

Como já foi mostrado na tabela 3, a COAGRO gera durante a época de safra 3,5 MWh para seu processo produtivo, não precisando de nenhuma fonte externa de energia elétrica neste período. Como não há necessidade de produzir mais do que esta quantia de energia elétrica, a quantidade de bagaço a ser economizada será calculada da seguinte forma:

- 1º. Deve-se estipular o poder calorífico do bagaço;
- 2º. Multiplicar a quantidade de biogás limpo que poderá ser produzido na usina anualmente ( $\text{Nm}^3/\text{ano}$ ) pelo seu poder calorífico ( $\text{kJ}/\text{Nm}^3$ ), para obter o potencial de geração de energia térmica neste período;

**3º.** Dividir este valor pelo poder calorífico do Bagaço, para saber quanto deste poderá ser economizado.

Para fazer estes cálculos será utilizado o poder calorífico do biogás como sendo 98% do poder do metano (33.761 kJ) e os valores presentes na tabela 9 abaixo.

**Tabela 9 - Dados sobre o Bagaço**

Poder Calorífico Inferior (PCI) do Bagaço ( kJ/ton)	7.325.000
Preço de Mercado do Bagaço seco (R\$/ton)	27,00

**Fonte: Procknor, 2008 e CTBE, 2009.**

É importante ressaltar que o preço da tonelada de bagaço mostrado acima é baseado na cotação do dólar (segundo Bioetanol, US\$ 15,00 por tonelada), podendo ser alterado com o tempo.

De acordo com os dados da tabela 9 e o poder calorífico do metano, a quantidade de bagaço economizada anualmente na usina poderá ser calculada multiplicando a produção anual de biogás limpo pelo seu poder calorífico (2.831.400 Nm<sup>3</sup>/ano x 33.761 kJ/Nm<sup>3</sup>) e dividindo este produto pelo poder calorífico do bagaço (7.325.000 kJ/ton). Sendo assim, seriam economizados 13.049,9516 toneladas de bagaço por ano, gerando uma receita de R\$ 352.348,69 (13.049,95 ton x 27 R\$/ton) com a sua venda. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 10.

**Tabela 10 - Fluxo de caixa e VPL da venda do bagaço (10 anos)**

ANO / ITEM	Amortização do Investimento	Custo O&M	Depreciação	Receita com venda do bagaço	Receita c/ venda do lodo	Resultado do Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Descontado
1	-1.311.594,89					-1.311.594,89	-1.140.517,29
2	-1.311.594,89	-185.130,00	-490.050,00	352.348,69	13.068,00	-1.621.358,20	-1.225.979,73
3	-1.311.594,89	-185.130,00	-490.050,00	352.348,69	13.068,00	-1.621.358,20	-1.066.069,33
4	-1.311.594,89	-185.130,00	-490.050,00	352.348,69	13.068,00	-1.621.358,20	-927.016,81
5	-1.311.594,89	-185.130,00	-490.050,00	352.348,69	13.068,00	-1.621.358,20	-806.101,57
6	0,00	-185.130,00	-490.050,00	352.348,69	13.068,00	-309.763,31	-133.919,23
7	0,00	-185.130,00	-490.050,00	352.348,69	13.068,00	-309.763,31	-116.451,50
8	0,00	-185.130,00	-490.050,00	352.348,69	13.068,00	-309.763,31	-101.262,17
9	0,00	-185.130,00	-490.050,00	352.348,69	13.068,00	-309.763,31	-88.054,06
10	0,00	-185.130,00	-490.050,00	352.348,69	13.068,00	-309.763,31	-76.568,75
						<b>VPL</b>	<b>-5.681.940,46</b>

De acordo com os dados da tabela acima, constata-se que o investimento não será rentável, apresentando um fluxo de caixa negativo durante todos os períodos considerados. Portanto não haverá retorno algum para o investimento, pelo contrário, a dívida contraída aumentará com o passar do tempo.

A razão destes resultados negativos é o pequeno valor pago pelo bagaço no mercado, sendo mais interessante para a usina adquirir formas de agregar valor a este, como através da hidrólise para a produção de álcool ou ração animal.

Outra solução mais simples para apresentar um preço mais justo para o bagaço, é calculá-lo do mesmo modo que foi feito com o biogás limpo no cenário anterior, para usá-lo nas olarias do município. A vantagem de vender o bagaço ao invés do biogás se dá pelo fato de não necessitar de grandes mudanças na planta das olarias para se adaptar ao novo tipo de combustível, por ser de natureza sólida. Sendo assim, mesmo que a época de safra seja de

200 dias, os proprietários das olarias poderiam alterar seu combustível de lenha para bagaço ou vice-versa sem maiores problemas.

O valor equivalente do bagaço em relação ao da lenha é de 236,97 R\$/ton (Preço por kJ gerado (Tabela 5) x Poder Calorífico Inferior do Bagaço (Tabela 9)) e o preço proposto para sua venda será de 80% deste valor (R\$ 189,58). O custo da aquisição de um caminhão para transportar este resíduo será considerado da ordem de R\$ 90.000, se for comprado o modelo MAZ - 551608-236 + Reboque (auto-reboque de transporte de cereais) com capacidade de carga de 37 toneladas (AUTOLINE, 2009). Para transportar as 65,249 toneladas de bagaço que poderá ser economizado na usina diariamente (Poder Calorífico do biogás limpo (33.761 kJ/Nm<sup>3</sup>) x Potencial Diário de Geração de Biogás (14.157 Nm<sup>3</sup>) dividido pelo Poder Calorífico Inferior do Bagaço (7.325.000 kJ/ton)) seriam necessárias apenas duas viagens. O custo anual de operação e manutenção deste caminhão será considerado de R\$ 30.000. Os resultados obtidos com estas informações são mostradas abaixo.

**Tabela 11 - Fluxo de caixa e VPL da venda do bagaço para olarias (10 anos)**

ANO / ITEM	Amortização do Investimento	Custo O&M	Depreciação	Receita com venda do bagaço	Receita c/ venda do lodo	Resultado do Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Descontado
1	-1.335.682,95	-	-	-	-	-1.335.682,95	-1.161.463,43
2	-1.335.682,95	215.130,00	-499.050,00	2.474.009,82	13.068,00	437.214,87	330.597,26
3	-1.335.682,95	215.130,00	-499.050,00	2.474.009,82	13.068,00	437.214,87	287.475,88
4	-1.335.682,95	215.130,00	-499.050,00	2.474.009,82	13.068,00	437.214,87	249.979,02
5	-1.335.682,95	215.130,00	-499.050,00	2.474.009,82	13.068,00	437.214,87	217.373,06
6	0	215.130,00	-499.050,00	2.474.009,82	13.068,00	1.772.897,82	766.472,65
7	0	215.130,00	-499.050,00	2.474.009,82	13.068,00	1.772.897,82	666.497,96
8	0	215.130,00	-499.050,00	2.474.009,82	13.068,00	1.772.897,82	579.563,44
9	0	215.130,00	-499.050,00	2.474.009,82	13.068,00	1.772.897,82	503.968,21
10	0	215.130,00	-499.050,00	2.474.009,82	13.068,00	1.772.897,82	438.233,23
						<b>VPL</b>	<b>2.878.697,28</b>



**Tabela 12- VPL do Cenário 2 para diferentes taxas de desconto no horizonte de 10 anos**

<b>Taxa de Desconto</b>	<b>VPL</b>
5%	6.218.564,74
15%	2.878.697,27
25%	1.319.793,76
50%	-17.206,85

A TIR apresentada agora para este cenário é de aproximadamente 49,268% para um horizonte de 10 anos, sendo agora viável. O preço mínimo a ser cobrado pelo bagaço para que o VPL não seja negativo, a uma taxa de desconto de 15% ao ano, é R\$ 136,42, sendo este 57,57% do valor equivalente do bagaço em relação a lenha.

Esta opção tem todas as vantagens apresentadas no cenário anterior, exceto a redução da poluição do ar (pois a queima do bagaço também gera material particulado) e seu poder calorífico é alterado com a umidade. Porém o maior benefício deste cenário é fornecer um combustível que pode ser usado na maioria das olarias, aumentando suas chances de venda.

### **5.2.3 Cenário 3: Produção do Biogás para Uso Automotivo**

A proposta deste cenário é analisar o potencial de geração de renda com a produção do biogás para uso combustível automotivo. Além do ganho financeiro, haveria também um ganho ambiental por se utilizar um combustível menos poluente que os derivados de petróleo. Segundo o site Investimento e Notícias (2009), o preço médio do GNV em julho de 2009 era R\$ 1,72 por Nm<sup>3</sup>, que será o valor adotado para neste estudo.

Segundo Pinto (1999), o biogás pode ser utilizado com bom desempenho em motores que atuam com até 130 cavalos, acarretando em

problemas técnicos caso seja utilizado em motores mais potentes. Por isto o uso do biogás nos treminhões<sup>19</sup> utilizados no transporte da cana é inviável, já que eles necessitam de muita potência para transportar sua carga. Sendo assim a venda de biogás para os proprietários deste tipo de veículo é inviabilizada. Também será descartada o uso de biogás para substituir o álcool em automóveis, pois o etanol é um dos principais produtos da usina, não sendo objetivo deste estudo conseguir um substituto para este combustível e sim conseguir uma maneira de aumentar sua competitividade, aumentando a margem de lucro da COAGRO e, por conseguinte, o capital que poderá ser investido em melhorias no processo produtivo como um todo.

Segundo CDTN (2001), os automóveis percorrem em média 10 km com 1 litro de gasolina e 12 km por Nm<sup>3</sup> de GNV consumido. Como o poder calorífico do biogás limpo (33.761 kJ/Nm<sup>3</sup>) é um pouco inferior ao do GNV (39.348,4 kJ/Nm<sup>3</sup>), será considerado que um carro utilizando o biogás percorrerá 10,29 km por Nm<sup>3</sup>.

A produção anual de biogás limpo prevista na usina é de 2.889.183,67 Nm<sup>3</sup> (Produção de metano dividido por 0,98), suficiente para fazer um automóvel percorrer 148.648,46 km por dia de safra. Será proposto então um preço mínimo para este combustível, de modo que as exigências para a viabilidade do projeto sejam atendidas e que a atratividade da compra do biogás seja aumentada. O custo de implantação considerado neste cenário será apenas o da aquisição da planta completa de biodigestão, bem como os custos de operação e manutenção e depreciação.

Considerando um tempo de investimento de 10 anos, e uma taxa de desconto de 15% ao ano, o biogás poderá ser vendido a um preço mínimo de aproximado de R\$ 0,608 (equivalente a 35,35% do preço de venda do GNV), sem apresentar prejuízos, como pode ser observado na tabela abaixo.

---

<sup>19</sup> Treminhão: caminhão com mais de uma carroceria utilizado para o transporte da cana-de-açúcar.

**Tabela 13 - Fluxo de caixa e VPL da venda do Biogás como combustível veicular (10 anos)**

ANO / ITEM	Amortização do Investimento	Custo O&M	Depreciação	Receita com venda do GNV	Receita c/ venda do lodo	Resultado do Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Descontado
1	-1.311.594,89					-1.311.594,89	-1.140.517,29
2	-1.311.594,89	-185.130,00	-490.050,00	1.721.753,84	13.068,00	-251.953,05	-190.512,70
3	-1.311.594,89	-185.130,00	-490.050,00	1.721.753,84	13.068,00	-251.953,05	-165.663,22
4	-1.311.594,89	-185.130,00	-490.050,00	1.721.753,84	13.068,00	-251.953,05	-144.054,97
5	-1.311.594,89	-185.130,00	-490.050,00	1.721.753,84	13.068,00	-251.953,05	-125.265,19
6	0,00	-185.130,00	-490.050,00	1.721.753,84	13.068,00	1.059.641,84	458.112,41
7	0,00	-185.130,00	-490.050,00	1.721.753,84	13.068,00	1.059.641,84	398.358,62
8	0,00	-185.130,00	-490.050,00	1.721.753,84	13.068,00	1.059.641,84	346.398,80
9	0,00	-185.130,00	-490.050,00	1.721.753,84	13.068,00	1.059.641,84	301.216,35
10	0,00	-185.130,00	-490.050,00	1.721.753,84	13.068,00	1.059.641,84	261.927,26
						<b>VPL</b>	<b>0,04</b>

Apesar dos bons resultados, o uso do biogás como combustível na COAGRO não é viável, já que a empresa não tem em sua posse veículos suficientes para consumir todo o gás produzido, não justificando o investimento para este fim. Porém é importante demonstrar a possibilidade de uma usina sucroalcooleira poder produzir mais de um tipo de biocombustível, ainda mais sendo estes renováveis e menos poluentes que os combustíveis fósseis.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou diversos estudos sobre a aplicação sustentável do vinhoto, de modo a comprovar a possibilidade de se dar um fim mais rentável e ecologicamente sustentável a este resíduo. Através dos trabalhos revisados, constatou-se que a melhor maneira de utilizar o vinhoto é através do processo de biodigestão anaeróbia, obtendo ao final do processo biogás, que é um biocombustível, e lodo ativado, que pode ser vendido como ração animal. O efluente dos biodigestores pode substituir o vinhoto *in natura* na fertirrigação e apresenta redução da DQO, DBO e da carga orgânica deste resíduo, causando menos impactos ao meio ambiente.

Para analisar a viabilidade da implantação de um biodigestor na Usina São José, em Campos dos Goytacazes – RJ, foram utilizadas as ferramentas VPL, com uma taxa mínima de atratividade de 15% ao ano, e TIR, comparando o VPL com diversas taxas diferentes. O tempo de maturação do investimento proposto foi de 10 anos para 3 cenários diferentes, que propuseram formas distintas do uso do biogás.

Ao final da análise técnico-econômica concluiu-se que a implantação de um biodigestor anaeróbio além de ser viável tecnicamente, poderá trazer vantagens tanto para o meio ambiente da região, com a redução do poder poluente do vinhoto, como para a própria usina, aumentando sua receita com o uso ou venda do biogás gerado. Todos os cenários foram considerados economicamente viáveis nas condições propostas, apresentando taxas de retorno superiores a 48% ao ano em alguns casos. Além da rentabilidade, a venda do biogás proveniente do reator reduziria a poluição do ar ao substituir outros combustíveis como a gasolina e a lenha.

Apesar dos resultados favoráveis, alguns dados utilizados nos cálculos do trabalho tiveram que ser adaptados para este estudo de caso, por falta de dados disponíveis na literatura, na COAGRO e nas empresas que constroem biodigestores, tais como:

- As características químicas do vinhoto produzido na Usina São José e os custos provenientes de sua aplicação nas lavouras. Estas informações poderiam dar maior exatidão sobre a produção total de biogás e a economia gerada com a redução do uso de corretores de solo, visto que o biofertilizante é menos agressivo para o solo que o vinhoto.
- Informações mais precisas da planta de biodigestão proposta (IC), como quais são todos os componentes desta e os custos não agregados de implantação, operação e manutenção além de dados desempenho mais exatos. Com esses dados poderiam ser feitas estimativas mais rigorosas dos custos do investimento.

Apesar dos problemas citados, o uso de biodigestores anaeróbios ainda parece ser uma boa oportunidade de gerar renda e/ou de conservar recursos naturais, ligando vantagens econômicas ao compromisso com o meio ambiente.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUJARO, R. **O uso da vinhaça na Usina Tamoio como fertilizante.** Saccharum. Revista da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil (STAB). São Paulo, v.2, p.4, mar., 1979.

ANP, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Biocombustíveis: O Etanol.** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocom bustiveis/etanol.asp>>. Acessado em: 28 de junho de 2009.

AUTOLINE. Disponível em: <<http://autoline.pt/>>. Acessado em: 11 de novembro de 2009.

ÁVILA, R. O.. **Avaliação do desempenho de sistemas tanque séptico-filtro anaeróbio com diferentes tipos de meio suporte.** Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

BIOGIGESTOR Anaeróbio da Vinhaça. In: Serviço brasileiro de respostas técnicas. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://sbrtv1.ibict.br/upload/sbrt6297.pdf?PHPSESSID=4c1acc85df9470606e00d622d8ac78a2>>. Acesso em: 9 de junho de 2009.

CABELLO, P. E.; SCOGNAMIGLIO, F. P.; TERÁN, F. J. C. **TRATAMENTO DE VINHAÇA EM REATOR ANAERÓBIO DE LEITO FLUIDIZADO.** Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 1, p. 321-338, jan/abr 2009. Disponível em: <<http://www.unipinhal.edu.br/ojs/engenhariaambiental/include/getdoc.php?id=517&article=209&mode=pdf>>. Acessado em : 9 de junho de 2009.

CDTM Automotivo. **GNV – Gás Natural Veicular.** Junho de 2001. Disponível em: <[http://www.mecanica2000.com.br/artigostecnicos\\_v.asp?Contador=39](http://www.mecanica2000.com.br/artigostecnicos_v.asp?Contador=39)>. Acessado em: 11 de novembro de 2009.

CLEMENTE, Leonardo. **AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS FINANCEIROS E RISCOS ASSOCIADOS DE UMA TÍPICA USINA DE CO-GERAÇÃO SUCRO-ALCOOLEIRA**. Curitiba, 2003. cap. 2.5, p. 46. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/biblioteca/trabalhos/trabalhos/Monografia\\_Pos\\_Graduacao\\_Leonardo\\_Clemente.pdf](http://www.aneel.gov.br/biblioteca/trabalhos/trabalhos/Monografia_Pos_Graduacao_Leonardo_Clemente.pdf)>. Acessado em: 28 de abril de 2009.

COPERSUCAR. . **ÁLCOOL**. Disponível em <<http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/alcool.asp>>. Acessado em: 24 de outubro 2009.

CORTEZ, L., MAGALHÃES, P. & HAPPI, J.. **Principais subprodutos da agroindústria canvieira e sua valorização**. Revista brasileira de energia, Vol. 2, nº 2, 1992.

COSAN S/A. **Relações com Investidores: Processo Produtivo**. São Paulo, 10 de outubro de 2005. Disponível em: <<http://www.b2i.us/profiles/investor/fullpage.asp?f=1&BzID=1173&to=cp&Nav=0&LangID=3&s=0&ID=3875>>. Acessado em: 28 de junho de 2009.

CTBE: Centro de Ciências e Tecnologia do Bioetanol. **O alvo é o bagaço**. Setembro de 2009. Disponível em <<http://www.bioetanol.org.br/noticias/detalhe.php?ID=MTA1>>. Acessado em: 11 de novembro de 2009.

DEMATTE, J.L.I. **O uso agrônômico de resíduos x fertilizantes na cultura da cana-de-açúcar**. In: XX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Piracicaba, 1992. Anais dos Simpósios. São Paulo. Fundação Cargill, p.213 – 251.

DILL, Gustavo Leite. **ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS E MICROTURBINAS A GÁS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008. Cap. 4.2 p. 48. Disponível em:

<<http://www.qprocura.com.br/dp/88417/Analise-da-operacao-de-celulas-combustiveis-e-microturbinas-a-gas-em-sistemas-de-potencia.html>>. Acessado em: 7 de dezembro de 2009.

DRIESSEN, W. TIELBAARD, M. VEREIJKEN, T. **Experience on Anaerobic Treatment of Distillery Effluent with the UASB Process. Water Science Technology**. Vol. 30, nº12, p. 193-201, 1994.

FLORÊNCIO, M.L. **Sistemas de tratamento anaeróbio**. In: IV Curso de tratamento biológico de resíduos. Florianópolis / Santa Catarina CBAB, MCT/CNPq, CPGEQ/UFSC, CDB, p.24, 1999.

FUNDECAM – Comunicação por telefone, 2009.

GASPAR , Rita Maria Bedran Leme. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: Um estudo de caso na região de Toledo-PR**. Florianópolis, 2003. Disponível em: < <http://www.tede.ufsc.br/teses/PEPS4022.pdf> >. Acessado em: 20 de outubro de 2009.

GRANATO, E. F. & SILVA, C.L.. **GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO RESÍDUO VINHAÇA**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2002. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0027.pdf>>. Acessado em: 19 de abril de 2009.

INOVABRASIL. **Energia barata a partir de resíduo de madeira**. 2008. Disponível em: <[http://inovabrasil.blogspot.com/2008\\_12\\_09\\_archive.html](http://inovabrasil.blogspot.com/2008_12_09_archive.html)>. Acessado em: 11 de novembro de 2009.

INVESTIMENTOS E NOTÍCIAS. **COMBUSTÍVEL: Preço médio do GNV cai mais de 3% em junho. 7 de Julho de 2009**. 2009. Disponível em: <<http://www.investmentosenoticias.com.br/ultimas-noticias/tempo->



real/combustivel-preco-medio-do-gnv-cai-mais-de-3-em-junho.html>. Acessado em: 26 de outubro de 2009.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Conservação de Energia na Indústria do Açúcar do Alcool**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1990.

KIEHL, E.J.. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, p. 492. 1985.

LAMO, PAULO DE. **Sistema Produtor de Gás Metano Através de Tratamento de Efluentes Industriais - METHAX/BIOPAQ - CODISTIL - Piracicaba**, 1991.

LEITE, Gil de Faria. **AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA ADUBAÇÃO COM VINHAÇA E DA ADUBAÇÃO MINERAL DE SOQUEIRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA USINA MONTE ALEGRE Ltda. - MONTE BELO – MG**. Publicação Semestral da Universidade de Alfenas. Alfenas, ano 3, n. 5, p. 181-189, jan/jun 1999. Disponível em <[http://www.unifenas.br/PESQUISA/revistas/revartigosportugues2\\_1999.shtml](http://www.unifenas.br/PESQUISA/revistas/revartigosportugues2_1999.shtml)>. Acessado em: 19 de abril de 2009.

LUCAS, J.Jr.; SILVA, F.M.. **Biogás: Produção e Utilização**. FCAV-UNESP, Jaboticabal, 1990.

MOTTA, F.S.. **Produza Sua Energia: Biodigestores Anaeróbicos**. Gráfica Editora, Recife, 1986.

MOURA, Luiz Antônio Abdalla de. **Economia ambiental: gestão de custos e investimentos**. 3ª Ed., ver. e atual – São Paulo, Editora Juarez de Oliveira, 272 p. 2006.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Biodigestão: a alternativa energética**. São Paulo, Editora Nobel, 1986.

NOYOLA, A.. **Tratamiento anaerobico de aguas, sistemas industriales**. In: Seminário internacional sobre aplicaciones de la biotecnologia moderna al tratamiento de los residuos industriales. Cd. Madero. Mexico. México, 1993.

OGLOBO online. **Conheça a história do etanol de cana no Brasil**. In: Seminário Biocombustíveis: A NOVA FRONTEIRA DA ENERGIA. Setembro de 2007. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/projetos/biocombustivel/mat/2007/09/12/297691575.asp>>. Acessado em: 28 de junho de 2009.

ORLANDO FILHO, J.; SOUSA, I.C. & ZAMBELLO JR, E.. **Aplicação de vinhaça em soqueiras de cana-de-açúcar: economicidade do sistema caminhões-tanque**. Boletim técnico PLANALSUCAR, Piracicaba, 1980.

PINTO, Cláudio Plaza. **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável**. Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, 147p. Campinas, 1999.

PORTAL do Meio Ambiente. **Reposição Florestal II**. Disponível em: <http://www.portaldomeioambiente.org.br/flora-a-florestas/219-reposicao-florestal-ii.html>. Acessado em: 11 de novembro de 2009.

PRADA, S.M.; GUEKEZIAN, M.; ENCARNACIÓN, M.. **METODOLOGIA ANALÍTICA PARA A DETERMINAÇÃO DE SULFATO EM VINHOTO**. São Paulo, 1997. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/qn/v21n3/3270.pdf> >. Acessado em: 9 de junho de 2009.

PRÓALCOOL - Programa Brasileiro de Álcool. In: biodieselbr.com. 2008. Disponível em : <http://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool.htm>. Acessado em: 11 de Novembro de 2009.

PROCKNOR, Celso. Energia Elétrica a partir da Vinhaça. **Revista da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil (STAB)**. Maio-junho de 2008. Seção Soluções de Fábrica. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/opiniaoshow.asp?msgCode=%7B2FA3CE2B-6B5C-43E9-A64A-B1A71A491EEF%7D>>. Acessado em: 22 de outubro de 2009.

RAFALDINI, M. E.; PISSINATTO, L. B.; MANOEL, R. M.; CHAGAS, P. R. R.; ALMEIDA, M. A.. **CONTROLE BIOLÓGICO PARA SISTEMAS DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA NO SOLO**. Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, v. 3, n. 2, p. 041-057, jul/dez 2006. Disponível em: <<http://www.unipinhal.edu.br/ojs/engenhariaambiental/include/getdoc.php?id=133&article=55&mode=pdf>>. Acessado em: 22 de junho de 2009.

RIZZO, A. C. L.; LEITE, S. G. F.. **Produção de sulfeto em reator do tipo UASB e sua potencial aplicação na remoção de metais pesados de efluentes**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 102 p. (Série Tecnologia Ambiental, 32), 2004.

SALOMON, K. R.. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica- Universidade Federal de Itajubá. 247p. Itajubá, Novembro de 2007. Disponível em :< <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/publicacoes.asp>>. Acessado em: 29 de Setembro de 2009.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P. & BORGES, L. C.. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108–114,

2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n1/v11n1a14.pdf>>. Acessado em: 3 de junho de 2009.

SIMÕES, C. L. N.; SENA, M. E. R.; CAMPOS, R.. **Estudo da viabilidade econômica da concentração de vinhoto através de osmose inversa**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 24, 2004. Florianópolis. Anais eletrônicos..., 2004. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004\\_Enegep1004\\_13\\_60.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004_Enegep1004_13_60.pdf)>. Acessado em: 19 de abril de 2009.

SOUZA, M. E. **Criteria for the Utilization, Design and Operation of UASB Reactors**. Water Science and Technology, v. 18, n. 12, p.55-69, 1986.

TCHOBANOGLIOUS, George; BURTON, Frank; METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering – Treatment, Disposal, Reuse**. Terceira edição. Editora McGRAW-HILL INTERNATIONAL. New York. Estados Unidos, 1991.

USEPA - United States Environment Protection Agency. **Air Emission from Municipal Solids Waste Landfill – Background Information for Proposed Standards and Guidelines**. Emission Standards Division.. EPA-450/3-90-011a. USA, March de 1991.

VERSTRAETE, W. de Beer, D. Pena, M. Lettinga, G. Lens, P.. **Anaerobic bioprocessing of organic wastes**. World Journal of Microbiology & Biotechnology, vol.12, p.221-238, 1996.

VIEIRA, D. B.. **Fertirrigação sistemática da cana-de-açúcar com vinhaça. Álcool e Açúcar**. São Paulo, 1986.