



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PROCESSOS**

**APLICAÇÃO DE UM REATOR ANAERÓBIO DE  
ALTA EFICIÊNCIA PARA O TRATAMENTO DE  
EFLUENTES DE UMA MICRODESTILARIA DE  
ÁLCOOL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Diego Polonia Weber**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2012**

**APLICAÇÃO DE UM REATOR ANAERÓBIO DE ALTA  
EFICIÊNCIA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DE  
UMA MICRODESTILARIA DE ÁLCOOL**

**Diego Polonia Weber**

**Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Área de Concentração em Desenvolvimento de Processos Agroindustriais e Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos.**

**Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Hoffmann**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2012**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos**

A comissão examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**APLICAÇÃO DE UM REATOR ANAERÓBIO DE ALTA  
EFICIÊNCIA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DE  
UMA MICRODESTILARIA DE ÁLCOOL**

elaborada por

**Diego Polonia Weber**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia de Processos**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Ronaldo Hoffmann, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

---

**Djalma Dias da Silveira**  
(Co-orientador)

---

**Marta Tocchetto, Dra.**  
(UFSM)

---

**Edson Luiz Foletto, Dr.**  
(UFSM)

**Santa Maria, Dezembro de 2012**

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos  
Universidade Federal de Santa Maria

### **APLICAÇÃO DE UM REATOR ANAERÓBIO DE ALTA EFICIÊNCIA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA MICRODESTILARIA DE ÁLCOOL**

**AUTOR: DIEGO POLONIA WEBER**

**ORIENTADOR: RONALDO HOFFMANN**

**Data e Local de Defesa: Santa Maria, 21 de Dezembro de 2012.**

Durante o processo de destilação do álcool, é gerado um resíduo chamado vinhaça com alto teor de matéria orgânica e alto potencial poluidor. Sendo o maior efluente da indústria do álcool, a vinhaça representa um problema ecológico. Frente a este problema, o tratamento se faz necessário. Dentro do contexto surge o reator UASB (*upflow anaerobic sludge blanket*) Visando a sustentabilidade na agroindústria, além de tratar a vinhaça, o biogás é captado para uso energético, podendo obter um retorno econômico. Este trabalho objetivou analisar por meio de parâmetros físico-químicos como temperatura, pH, tempo de detenção e retenção hidráulica, velocidade ascensional, macro-nutrientes, DQO e geração qualitativa de metano, o comportamento de dois reatores, em escala piloto, realizando um comparativo das características dos efluentes de uma microdestilaria. Dessa forma foi determinada a eficiência da redução da carga orgânica, analisando o vinhoto proveniente de duas diferentes fontes, amilácea e sacarídea. A redução da carga orgânica foi maior no efluente da batata atingindo 95,75%, enquanto a cana-de-açúcar atingiu 81,56% da remoção da DQO, resultados satisfatórios para reatores do tipo UASB.

Palavras-chave: Vinhaça, reator anaeróbio, UASB.

## **ABSTRACT**

Master Dissertation  
Graduate Program in Process Engineering  
Federal University of Santa Maria

# **APPLYING A HIGH EFFICIENCY ANAEROBIC REACTOR FOR WASTEWATER TREATMENT OF A SMALL ALCOHOL DISTILLERY**

**AUTHOR: DIEGO POLONIA WEBER**

**SUPERVISOR: RONALDO HOFFMANN**

**Place and date of defense: Santa Maria, December 21, 2012.**

During the distillation of alcohol is a residue called vinasse generated with high content of organic matter and high pollution potential. As the largest industry effluent of alcohol, stillage is an ecological problem. Faced with this problem, treatment is necessary. Within the context arises the UASB (upflow anaerobic sludge blanket) Seeking sustainability in the agricultural industry, in addition to treating vinasse, biogas is captured for energy use, and may get an economic return. This study aimed to analyze by means of physical-chemical parameters such as temperature, pH, detention time and hydraulic retention rate of climb, macro-nutrients, COD and qualitative methane generation, the behavior of two reactors, pilot scale, performing a comparative characteristics of effluents from a distillery. Thus was determined the efficiency of reduction of the organic load by analyzing the vinasse obtained from two different sources, amylose and saccharide. The reduction of the organic load in the effluent was greater potato reached 95.75%, while the sugar cane reached 81.56% removal of COD, satisfactory results for UASB-type reactors.

Keywords: Stillage, anaerobic reactor UASB.

## DEDICATÓRIA

“Eu sempre acreditei em números, em equações e na lógica que leva à razão. Mas depois de uma vida e tal busca, eu pergunto: O que é mesmo a lógica? Quem decide o que é racional?”

Tal busca me levou através da física, da metafísica, do delírio e de volta. E então eu fiz a descoberta mais importante de minha carreira, a descoberta mais importante de minha vida. ‘É somente nas misteriosas equações do amor... Que alguma lógica real pode ser encontrada’.

Eu só estou aqui... Por sua causa, você é a Razão pela qual existo, você é toda minha Razão. Obrigado”. (John Nash).

Dedicado à minha Mãe

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria.

À CAPES (coordenação de aperfeiçoamento pessoal de nível superior), pelo suporte financeiro.

À minha Mãe, por ser presença constante em todos os momentos.

Ao meu “Avohai”, Avô e Pai, Paulino Polonia (*in memorian*).

Ao meu Tio Fernando Oliveira Noal, pela contribuição teórica e provocação da aventura e compreensão dos desafios da biosfera e da vida.

Ao amigo e Professor Ronaldo Hoffmann, pela figura paterna que representou, apoiando em todos momentos da jornada, pelo exemplo de caráter e índole, nos quais me espelhei; não há profissão mais nobre do que moldar mentes jovens.

Ao Professor Cícero e Zé, da micro-destilaria do Colégio Politécnico da UFSM.

À Cíntia Côrte Real, pelo apoio e carinho de todas as horas.

Aos colegas André Friderichs, Gustavo Cunha e Amir Scheid, pela ajuda e colaboração de extrema importância, para concretização desse trabalho.

À minha Avó Maria e Tias Jandira, Janete, Juraci, pelo amor e carinho de toda a vida.

*"Hoje em dia, o ser humano apenas tem ante si três grandes problemas que foram ironicamente provocados por ele próprio: a super povoação, o desaparecimento dos recursos naturais e a destruição do meio ambiente. Triunfar sobre estes problemas, vistos sermos nós a sua causa, deveria ser a nossa mais profunda motivação."*

*(Jacques Yves Cousteau).*



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios.....	16
<b>Figura 2.</b> Interações na fase agrícola da produção de álcool.....	27
<b>Figura 3.</b> Fluxograma do processo de fabricação do álcool a partir da cana-de-açúcar .....	28
<b>Figura 4.</b> Desenho esquemático de um Reator UASB .....	30
<b>Figura 5.</b> Bancada com os dois reatores em funcionamento.....	33
<b>Figura 6.</b> Inoculo .....	35
<b>Figura 7.</b> Início da formação de lodo .....	35
<b>Figura 8.</b> Enchimento até os vertedores .....	35
<b>Figura 9.</b> Formação de espuma .....	37
<b>Figura 10.</b> Tubo em “U”.....	38
<b>Figura 11.</b> Redução DQO, cana-de-açúcar x Temperatura.....	40
<b>Figura 12.</b> Redução da DQO, batata x Temperatura.....	41
<b>Figura 13.</b> Redução de Sólidos da batata x Ciclos.....	42
<b>Figura 14.</b> Redução do álcool x temperatura, da cana-de-açúcar .....	43
<b>Figura 15.</b> Redução do álcool x temperatura, da batata .....	44

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Vantagens e Desvantagens dos Reatores Anaeróbios .....	15
<b>Tabela 2.</b> Reações de oxi-redução e valores da energia livre na digestão anaeróbia .....	26
<b>Tabela 3.</b> Velocidades Ascensionais em função da vazão de entrada.....	37
<b>Tabela 4.</b> Redução de Sólidos da batata x Ciclos.....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

**CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente

**CETESB** - Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e Controle de Poluição das águas

**PROÁLCOOL** - Programa Nacional do Alcool

**DAFA** – Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente

**RAFA** – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente

**RALF** - Reator Anaeróbio de Leito Fluidificado

**RAMA** - Reator Ascendente de Manta Anaeróbia

**UASB** - Anaeróbio Ascendente com Manta de Lodo, “*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*”

**ÚNICA** - União da Indústria da Cana-de-Açúcar

**A** - Área ( $m^2$ )

**DBO** - Demanda Bioquímica de Oxigênio ( $mg\ O_2\ L^{-1}$ )

**DQO** - Demanda Química de Oxigênio ( $mg\ O_2\ L^{-1}$ )

**H** - Altura (m)

**pH** - Potencial Hidrogeniônico

**P** - Fósforo

**K** - Potássio

**N** - Nitrogênio

**Q** - Vazão ( $m^3\ L^{-1}$ )

**ST** - Sólidos Totais ( $mg\ L^{-1}$ )

**SVT** - Sólidos Voláteis Totais ( $mg\ L^{-1}$ )

**T** - Temperatura ( $^{\circ}C$ )

**TDH** - Tempo de Detenção Hidráulico (d)

**V** - Volume Total do Reator ( $m^3$ )

**Vê** - Velocidade Ascensional ( $m.d^{-1}$ )

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
1.1 OBJETIVO .....	17
1.1.1 Objetivo Geral .....	17
1.1.2. Objetivos Específicos .....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
2.1 Fermentação Alcoólica.....	18
2.2 Separação de etanol por destilação descontínua .....	19
2.3 Vinhaça.....	20
2.3.1 Composição.....	21
2.3.2 Legislação.....	22
2.4 Digestão Anaeróbia.....	23
2.4.1 Hidrólise.....	24
2.4.2 Acidogênese .....	24
2.4.3 Acetogênese .....	24
2.4.4 Metanogênese.....	25
2.5 REATOR ANAERÓBIO .....	29
2.5.1 Nomenclatura dos reatores anaeróbios.....	29
2.5.2 O papel dos nutrientes na digestão anaeróbia .....	30
3 MATERIAIS E METODOS .....	32
3.1 Projeto dos Reatores.....	32
3.2 Partida do Reator UASB .....	33
3.3 Condições Operacionais.....	34
3.4 Variáveis Importantes na Operação do Reator.....	36
3.4.1 Tempo de Detenção Hidráulica.....	36
3.4.2 Velocidade Ascensional .....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	39

4.1 Parâmetros Operacionais.....	39
4.1.1 pH.....	39
4.1.2 Temperatura .....	39
4.1.3 DQO .....	40
4.1.4 Sólidos Totais.....	41
4.2 Teor Alcoólico.....	41
5. CONCLUSÃO .....	45
5.1 Sugestões para Futuros Trabalhos.....	46
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47
ANEXO.....	50
APÊNDICE .....	54

## 1. INTRODUÇÃO

O conceito de sustentabilidade ambiental refere-se às condições sistêmicas segundo as quais, em nível regional e planetário, as atividades humanas não devem interferir nos ciclos naturais em que se baseia tudo o que a resiliência do planeta permite e, ao mesmo tempo, não devem empobrecer seu capital natural, que será transmitido às gerações futuras (MANZINI & VEZZOLI, 2005).

Em 1975, o governo de Ernesto Geisel passa a financiar o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), para substituir em grande escala os automóveis movidos a combustíveis derivados do petróleo pelos movidos a álcool (BRASIL, 2012).

Com a implantação do Proálcool e a crescente produção de etanol, houve o conseqüente aumento na produção de vinhaça, agravando o problema de sua destinação. Neste cenário, a biodigestão anaeróbia da vinhaça surge como uma alternativa viável de tratamento deste subproduto, apresentando ainda um fator econômico, a produção de metano (CORAZZA, 1996).

As indústrias brasileiras que produzem álcool por via fermentativa são chamadas de usinas alcooleiras ou sucroalcooleiras (quando fabricam açúcar e álcool) geralmente usam como matéria-prima a cana-de-açúcar.

Durante o processo de destilação do álcool, são gerados basicamente dois resíduos: a vinhaça e o bagaço de cana. O problema referente ao bagaço já está totalmente superado, pois pode ser utilizado para muitos fins, predominando atualmente a queima em caldeiras, com a conseqüente produção de vapor e energia.

Em relação à vinhaça, muitas alternativas já foram estudadas, mas o problema se agrava devido ser um efluente líquido e gerado na proporção de 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de álcool produzido. Porém vale ressaltar que o volume de vinhaça gerado, vai depender de sua composição e matéria-prima (BRASIL, 2012).

Sendo o maior efluente da indústria do álcool, a vinhaça, representa um problema ecológico devido a alta carga de matéria orgânica. Na grande maioria dos casos é empregada

“in natura” na lavoura da própria cana-de-açúcar, substituindo em parte o uso de fertilizantes. Esta prática, chamada fertirrigação, é apresentada como a solução para o enorme problema da disposição desse resíduo desde quando foi proibido o seu simples descarte no curso d’água mais próximo da usina, prática adotada historicamente (PINTO, C. P., 1999). Vários processos têm sido usados para o tratamento da vinhaça, como por exemplo, tanque séptico e lagoa anaeróbia.

O funcionamento das lagoas anaeróbias é bastante semelhante ao dos tanques sépticos. Todavia, as dimensões das lagoas anaeróbias são bastante superiores às dos tanques sépticos, fato que confere às mesmas algumas características diferentes, devido ao grande volume e elevadas profundidades, não há a necessidade de remoção sistemática do lodo depositado no fundo das lagoas anaeróbias, que via de regra, descobertas, havendo sempre a possibilidade de emanção de maus odores e proliferação de insetos, demandando, portanto, maiores cuidados na escolha do local de implantação das mesmas.

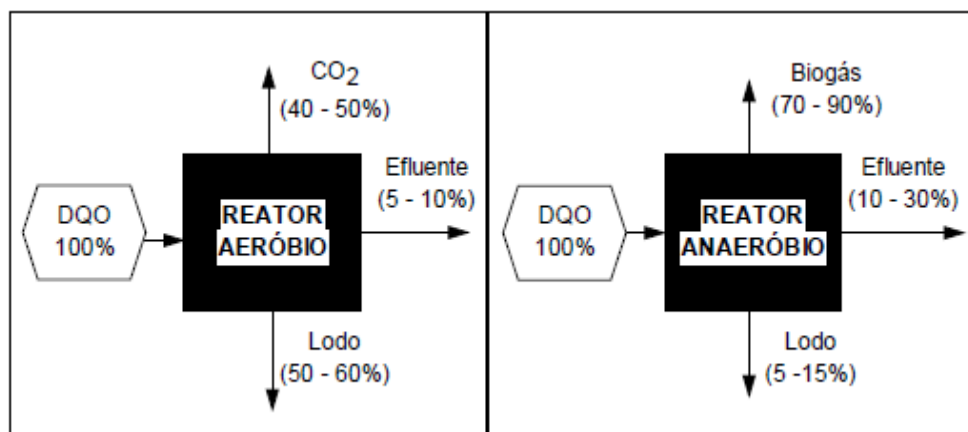
Nesta pesquisa, aplicou-se o reator de fluxo ascendente “Upflow anaerobic sludge blanket” (UASB), para o tratamento do vinhoto, tendo em vista as vantagens do sistema anaeróbio. (Tabela 1).

**Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens dos Reatores Anaeróbios.**

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• baixa produção de sólidos;</li> <li>• baixo consumo de energia;</li> <li>• baixa demanda de área;</li> <li>• baixos custos de implantação;</li> <li>• produção de metano;</li> <li>• possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses;</li> <li>• tolerância a elevadas cargas orgânicas;</li> <li>• aplicabilidade em pequena e grande escala;</li> <li>• baixo consumo de nutrientes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• as bactérias anaeróbias são suscetíveis à inibição por um grande número de compostos;</li> <li>• a partida do processo pode ser lenta na ausência de lodo de semente adaptado; alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária;</li> <li>• a bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas; possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis;</li> <li>• possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável;</li> <li>• remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos insatisfatória.</li> </ul>

**Fonte: Chernicharo, 1997.**

Tratamento anaeróbio, embora lento, apresenta um certo número de vantagens (Figura 1), por exemplo, um grau bastante elevado de purificação orgânica com alta carga feeds podem ser alcançado, baixas necessidades de nutrientes são necessários, pequenas quantidades de lamas em excesso são geralmente produzidos e, finalmente, mas igualmente importantes, um biogás combustíveis é gerado. A produção de biogás permite processo para gerar ou recuperar a energia em vez de apenas economia de energia, o que pode reduzir os custos operacionais por um margem grande em comparação com a alta de consumo de energia processo aeróbio (LETTINGA et al, 1979, 1981).



**Figura 1 - Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios.**  
**Fonte: CHERNICHARO, 1997.**

Uma das desvantagens do reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo é o não atendimento dos padrões de lançamento do efluente tratado estabelecido pela legislação ambiental brasileira. Com isso um sistema de pós tratamento dos efluentes dos reatores anaeróbio deve ser implantado objetivando o polimento da qualidade microbiológica, remoção de matéria orgânica e dos nutrientes, já que o lançamento remanescente destes constituintes poderia ocasionar sérios danos ambientais (CHERNICHARO, 1997).



## **1.1. OBJETIVO**

### **1.1.1 - Objetivo geral**

Analisar, por meio de parâmetros físico-químicos, o comportamento operacional dos reatores anaeróbios de alta eficiência do tipo UASB, utilizados no tratamento de efluentes de uma micro-destilaria de álcool, que opera com regime de destilação em batelada.

### **1.1.2 - Objetivos específicos**

- a- Identificar quais os principais parâmetros de operação de processo do reator anaeróbio (UASB) aplicados ao vinhoto amostrado: DQO, temperatura, pH, sólidos totais, nitrogênio e fósforo.
- b- Quantificar a eficiência de redução da carga orgânica de poluentes promovida pelo reator UASB no processo anaeróbio de tratamento do vinhoto.
- c- Comparar o desempenho do reator UASB frente a duas diferentes fontes de matéria-prima para a fermentação alcoólica, a amilácea (Batata) e a sacarídea (Cana-de-açúcar), determinando o tempo de residência para cada uma delas.
- d- Quantificar o teor alcoólico existente no vinhoto gerado pelo processo de destilação em batelada e verificar a influência do mesmo no desempenho do UASB.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fermentação Alcoólica

Produz-se etanol por meio de um processo químico denominado fermentação, ou seja, um processo de fermentação dos açúcares contidos no caldo da cana-de-açúcar e melaço. A fermentação é um processo utilizado na fabricação de bebidas alcoólicas, pães e outros alimentos. Hoje sabe-se que os processos fermentativos resultam da atividade de microorganismos, como as leveduras ou fermentos (fungos) e certas bactérias.

Inicialmente, processa-se a cana-de-açúcar utilizada na produção de etanol da mesma forma que para a produção de açúcar. O melaço resultante desse processo é misturado com o caldo da cana-de-açúcar e levedura em tanques e o subproduto resultante do processo de fermentação, denominado “mosto fermentado”, contém um teor alcoólico de aproximadamente 7,0% a 9,0%. Depois do processo de fermentação, de aproximadamente 10 horas, o mosto fermentado é centrifugado, de forma que a levedura possa ser separada do líquido. Utiliza-se a levedura separada no processo de produção de etanol. Ferve-se o mosto fermentado a diferentes temperaturas, separando o etanol dos outros líquidos. O etanol hidratado é produzido em diferentes estágios de destilação. Para a produção de etanol anidro, o etanol hidratado é submetido a um processo de desidratação. O líquido remanescente depois desse processo é chamado de vinhoto, utilizado como fertilizante em plantações de cana-de-açúcar. Posteriormente aos processos de destilação e desidratação, se produz etanol hidratado, anidro, neutro e industrial, armazenado em grandes tanques (GRETSCHMANN, 2009).

Ao fim da fermentação, o teor alcoólico atinge de 7 a 9%. A esse produto dá-se o nome de vinho e dele, o etanol é separado por destilação, gerando álcool hidratado e uma água residuária chamada vinhoto. Para minimizar o surgimento de microorganismos (notadamente bactérias) que poderiam gerar produtos não desejados a partir da sacarose, aplica-se ácido para baixar o pH para um valor entre 3 e 4 ou então, se adiciona biocidas específicos (VAN HAANDEL, 2000).

Num processo fermentativo estão envolvidos dois sistemas que interagem continuamente: a fase biológica composta pela população microbiana ou cultura de células e pela fase ambiental ou meio de cultura que contém substrato e produtos do processo. As células por sua vez, consomem nutrientes e convertem substratos do ambiente em produtos.

As matérias amiláceas e feculentas fermentam após uma hidrólise, que se denomina de sacarificação, pela qual o amido in fermentescível se transforma em açúcar fermentescível. A alcoolização processa-se através de técnicas industriais mais complexas. Pela necessidade de maiores conhecimentos, pelas dificuldades de conservação e de fermentação da matéria-prima original e pelo custo de fabricação, os álcoois de cereais produzem-se no Brasil em pequena escala, com maior importância para a indústria de bebidas (PIMENTA et al., 2010).

O álcool etílico é o produto final de um complexo processo de fabricação, o qual inclui a fermentação, seguida de uma destilação de vários estágios. Na Europa, a principal matéria-prima para este processo é a beterraba (cerca de 70%), mas também a partir de figos, passas e vinhos (30%). O resíduo da fermentação e processos de destilação, denominado vinhoto, é a resíduos líquidos principal. As destilarias de álcool são típicas dos tradicionais gregas indústrias agrícolas, e são de grande importância para a economia nacional. Hoje em dia, em o tempo de crescente preocupação ambiental, estas indústrias estão enfrentando um problema difícil: como tratar eficientemente seus efluentes líquidos (KAAN YETILMEZSOY, 2010).

## **2.2 Separação de etanol por destilação descontínua**

Quando se realiza uma destilação intermitente, faz-se uma carga no aparelho, esgota-se o vinho de seu componente álcool por aquecimento, evaporação, condensação e refrigeração. Descarrega-se o resíduo ou vinhaça, faz-se uma nova carga e assim por diante. Este tipo de destilação realiza-se em alambiques simples, de um só corpo ou em aparelhos de dois ou três corpos, nos quais gasta-se menos calor, porque recupera-se parte dele fazendo a condensação de vapores destilados com o líquido que se destilará na próxima carga e, em consequência, está pré-aquecido para a nova operação. (PIMENTA et al., 2010).

Quando se executa uma destilação descontínua, realiza-se uma destilação simples, vaporizando-se primeiro as substâncias mais voláteis do que a água e o álcool. O primeiro destilado é uma mistura de álcool e etanol, bases voláteis, aldeídos e ácidos e denomina-se, na prática, destilado de cabeça. Depois de sua separação, os vinhos emitem vapores mais ricos em etanol, com menor quantidade de impurezas voláteis.

Finalmente, quando quase se esgotou o etanol do vinho, passam vapores mais impuros, que se constituem de etanol, água e impurezas menos voláteis, como os álcoois superiores. É o destilado de cauda (PIMENTA et al., 2010).

O destilado que se recolhe como produto final da destilação é uma mistura de produtos de cabeça, de coração e de cauda, ou apenas destilado de coração, separando-se de 10 a 20% do total, conforme o destino do destilado.

No Brasil, não se separam cabeças e caudas na produção de aguardente (Figura 3). A aguardente é um destilado de 50% de álcool em volume, aproximadamente. As primeiras porções do destilado contêm mais de 60% de álcool em volume; à medida que destilação continua, enfraquece-se o destilado, que é recolhido quando atinge concentração de 40 a 50%. No vinho que resta no aparelho de destilação ainda existe uma pequena porção de álcool que se perde na vizinhança. Para não perdê-la, continua-se a destilar até não haver mais álcool e recolhe-se o destilado à parte, com a denominação de água fraca. A água fraca junta-se à carga seguinte para recuperar-se o álcool que contém. Os aparelhos de dois e três corpos evitam essa perda, ao mesmo tempo que recuperam calor na operação. (PIMENTA et al., 2010).

### **2.3 Vinhaça**

Também conhecida como vinhoto, calda, tiborna, restilo, garapão, vinhoto, caxixi e mosto (FREIRE & CORTEZ, 2000), a vinhaça é o produto de cauda na destilação de fermentação do álcool de cana-de-açúcar; ou outro material fermentescível, é um líquido residual, também conhecido, regionalmente, por restilo e vinhoto. É produzido em muitos países do mundo como subproduto da produção de álcool. Tendo em vista ser uma matéria-

prima diferente (cana-de-açúcar na América do Sul, beterraba na Europa etc.), a vinhaça apresenta diferentes propriedades. A concentração de sódio na vinhaça de cana-de-açúcar é menor que na de beterraba e elevados valores desse íon são indesejáveis já que podem causar condições nocivas ao solo e às plantas (GEMTOS et al., 1999). O constituinte principal da vinhaça é a matéria orgânica, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, por cátions como o K, Ca e Mg, sendo que sua riqueza nutricional está ligada à origem do mosto. Quando se parte de mosto de melaço, apresenta maiores concentrações em matéria orgânica, potássio, cálcio e magnésio, ao passo que esses elementos decaem consideravelmente quando se trata de mosto de caldo de cana, como é o caso de destilarias autônomas (ROSSETTO, 1987).

### **2.3.1 Composição**

Para cada litro de álcool são produzidos de 10 à 18 litros de vinhaça, cuja composição é bastante variável dependendo principalmente do mosto utilizado. Atualmente, a visão ambiental vem sendo enfatizada e, em alguns casos, a aplicação de vinhaça tem sido contestada pelos seus efeitos no solo e nas águas subterrâneas (SILVA & RIBEIRO, 1998).

As águas residuais da indústria de processamento de batata, contém altas concentrações dos componentes biodegradáveis, tais como amido e proteínas. Este efluente pode ser considerado de difícil tratamento devido a uma concentração bastante elevada de sólidos em suspensão, um elevado teor de fração insolúvel de DQO e quantidades significativas de substâncias potencialmente espumantes, como proteínas e gorduras. Em contraste com o tratamento de águas residuais em reatores anaeróbios, onde a taxa de produção de biogás está diretamente relacionada ao consumo da carga orgânica, no tratamento do resíduo da batata não é o caso, este fato pode ser atribuído à presença de sólidos orgânicos suspensos (amido), cuja duração da hidrólise torna a produção de biogás mais complicado (BARAMPOUTI, 2004).

### 2.3.2 Legislação

A vinhaça ou vinhoto, portanto, resíduo final da fabricação do álcool etílico por via fermentativa, é usada principalmente como fertilizantes, devido ao alto teor de matéria orgânica e elevada carga de nitrogênio e fósforo. No entanto, se esse efluente tiver como destino um corpo receptor, a sua composição pode levar a alteração da turbidez do corpo hídrico causando eutrofização. As lagoas anaeróbias são a opção mais simples para o tratamento do vinhoto, porém, exigem grande área, bem como provocam problemas de odor e as chances de poluição das águas subterrâneas fazem restringir o seu uso. Por essa razão, reatores anaeróbios são mais recomendados.

Quando depositada no solo, a vinhaça pode promover melhoria em sua fertilidade; todavia, quando usada para este fim, as quantidades não devem ultrapassar sua capacidade de retenção de íons, isto é, as dosagens devem ser mensuradas de acordo com as características de cada solo, uma vez que este possui quantidades desbalanceadas de elementos minerais e orgânicos, podendo ocorrer a lixiviação de vários desses íons, sobretudo do nitrato e do potássio (SILVA & RIBEIRO, 1998).

Em todo o mundo autoridades estabelecem normas que regulamentam a disposição de efluentes, seja esse de origem doméstica ou industrial. Com mais especificidade ao lançamento de vinhoto, no Brasil, desde a expansão da produção de álcool incentivado pelo PROALCOOL, em 1970, algumas normas foram criadas, tendo em vista o aumento substancial da produção de vinhoto e seu alto poder poluidor principalmente quando lançado em corpos aquáticos (CORAZZA, 2006).

A Resolução 430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de 13 de maio de 2011, que pode ser encontrada no site do Ministério do Meio Ambiente, dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para a gestão de efluentes em corpos de água receptores.

## 2.4 Digestão Anaeróbia

A biodigestão anaeróbia da vinhaça é uma alternativa pouco utilizada e estudada. É um processo que propicia a diminuição da carga orgânica da vinhaça, utilizando-se reatores anaeróbios. Este processo é largamente empregado e estudado objetivando o tratamento de efluentes urbanos domésticos, além de efluentes de origem animal. Apresenta como vantagens baixo consumo de energia, pequena produção de lodo (descarte), grande eficiência na diminuição da carga orgânica e baixo potencial poluidor, sendo que o biogás produzido poderá ser empregado no processo de produção de energia (FREIRE & CORTEZ, 2000). Na digestão anaeróbia desenvolvem-se processo de fermentações, onde o material orgânico sofre transformações, tendo como produto final, o metano e o dióxido de carbono.

As leveduras foram os primeiros microorganismos encontrados capazes de crescer na ausência de oxigênio. Em anaerobiose (ausência de oxigênio) o açúcar é convertido principalmente em álcool e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Nos sistemas anaeróbios, verifica-se que a maior parte do material orgânico biodegradável presente no despejo é convertida em biogás (cerca de 70 a 90%), que é removido da fase líquida e deixa o reator na forma gasosa. Apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), vindo a se constituir o lodo excedente do sistema. Além da pequena quantidade produzida, o lodo excedente apresenta-se via de regra mais concentrado e com melhores características de desidratação. O material não convertido em biogás ou biomassa deixa o reator como material não degradado (10 a 30%) (CHERNICHARO, 1997).

A digestão anaeróbia é um processo que se divide em quatro fases, que serão apresentadas a seguir. Em cada etapa age um grupo específico de microorganismos, num efeito em cadeia, onde em uma etapa são gerados os produtos intermediários do estágio seguinte. Idealmente, num reator anaeróbio as etapas deveriam ocorrer simultaneamente e com a mesma velocidade a fim de evitar distúrbios que poderiam levar a colapso do reator (AQUINO & CHERNICHARO, 2005).

### **2.4.1 Hidrólise**

Como os sólidos orgânicos complexos são insolúveis, acabam sendo indisponíveis para os microrganismos. Com isso, o ataque é realizado por enzimas, as quais são excretadas pelas bactérias. Essas enzimas hidrolisam esses materiais complexos (carboidratos, proteínas e lipídeos) em materiais dissolvidos, de composição mais simples (açúcar, aminoácidos e peptídeos), conseguindo assim penetrar pela parede celular bacteriana. É uma reação lenta, pois vários fatores podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado (CHERNICHARO, 1997).

O material particulado é dissolvido e por sua vez convertido em compostos de menor peso molecular, solúveis e de maior biodegradabilidade. Em um processo onde as exoenzimas são excretadas por bactérias fermentativas, influenciada principalmente pela temperatura e pH. As proteínas são degradadas, e convertidas em aminoácidos. Por fim, os carboidratos transformam-se em açúcares solúveis e os lipídios, em ácidos graxos.

### **2.4.2 Acidogênese**

No processo da hidrólise os compostos dissolvidos, são absorvidos por bactérias fermentativas, sendo excretadas formando substâncias orgânicas simples como ácidos graxos voláteis.

### **2.4.3 Acetogênese**

A acetogênese converte os compostos da acidogênese em substratos para produção de metano, que por sua vez é formado por acetato, dióxido de carbono e hidrogênio.

Pela estequiometria, dependendo do estado de oxidação do material orgânico a ser digerido, a formação de ácido acético pode ser acompanhada pelo surgimento de dióxido de carbono ou hidrogênio. Entretanto, o dióxido de carbono também é gerado na própria metanogênese. Na presença de dióxido de carbono e hidrogênio, um terceiro processo da acetogênese pode se desenvolver a homoacetogênese, ou seja, a redução de dióxido de carbono para ácido acético pelo hidrogênio.



#### 2.4.4 Metanogênese

As bactérias acetotróficas produzem o metano, a partir da redução de ácido acético, ou por bactérias hidrogenotróficas, proveniente da redução de dióxido de carbono.

A redução biológica de sulfato em digestores anaeróbios em geral é considerada como um processo indesejável por duas razões: o sulfato oxida material orgânico que deixa de ser transformado em metano e no processo forma-se o gás sulfídrico, que é corrosivo e confere odor muito desagradável tanto à fase líquida como ao biogás, além de poder ser tóxico para o processo de metanogênese.

Simplificando o processo da digestão anaeróbia em dois estágios, no primeiro, há formação de ácidos, acidogênese, através da fermentação ácida e oxidação anaeróbia, e no segundo estágio, ocorre a formação do metano através da metanogênese (CHERNICHARO, 1997).

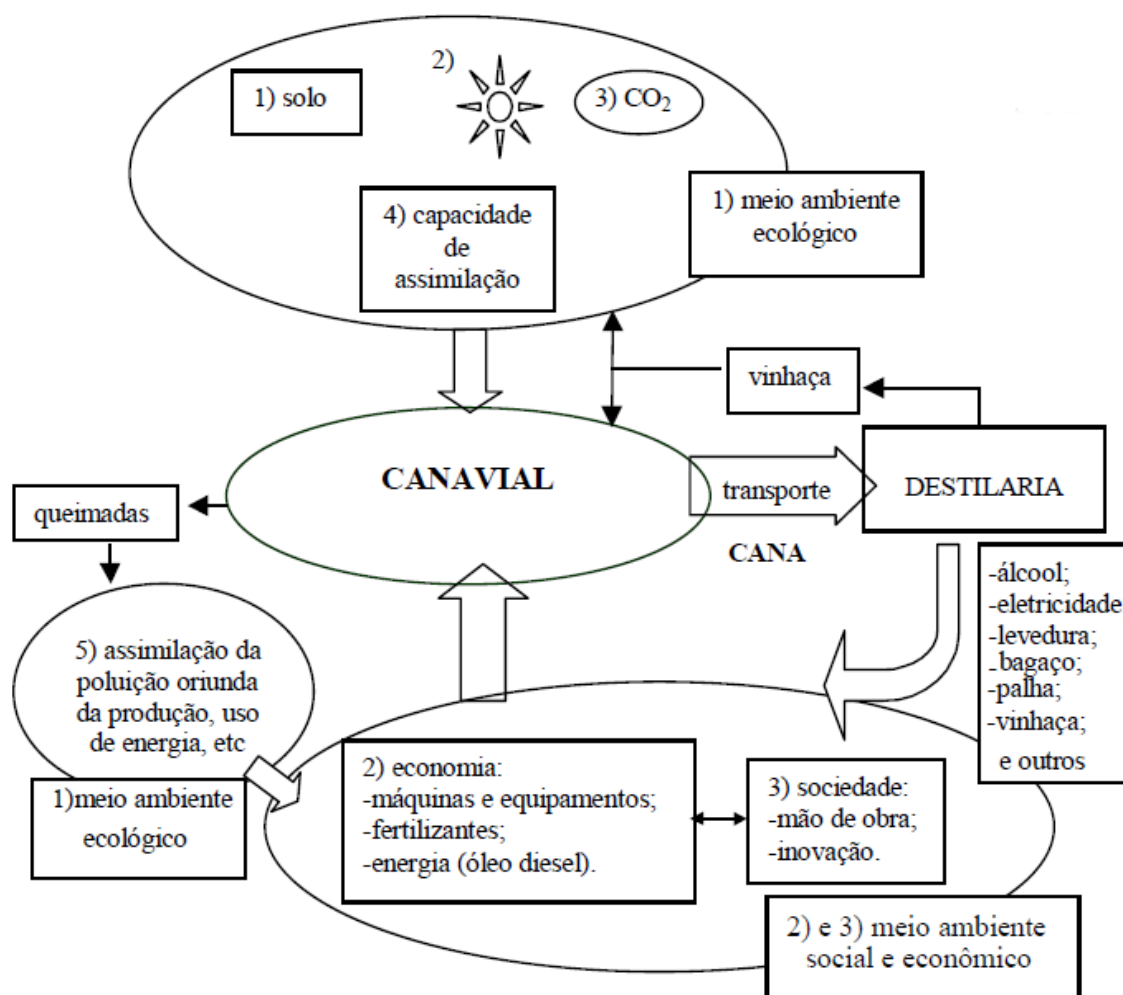
Algumas das reações de conversão dos produtos das bactérias fermentativas em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono foram descritas por Campos (1999), conforme Tabela 2. A última coluna representa a energia livre padrão ( $\Delta G^\circ$ ). Quando ocorre liberação de energia o processo é denominado exergônico e  $\Delta G^\circ$  é menor que zero. Já quando as reações consomem energia são consideradas endergônicas e o  $\Delta G^\circ$  apresenta valores positivos.

**Tabela 2 – Reações de oxidação-redução e valores da energia livre na digestão anaeróbia**

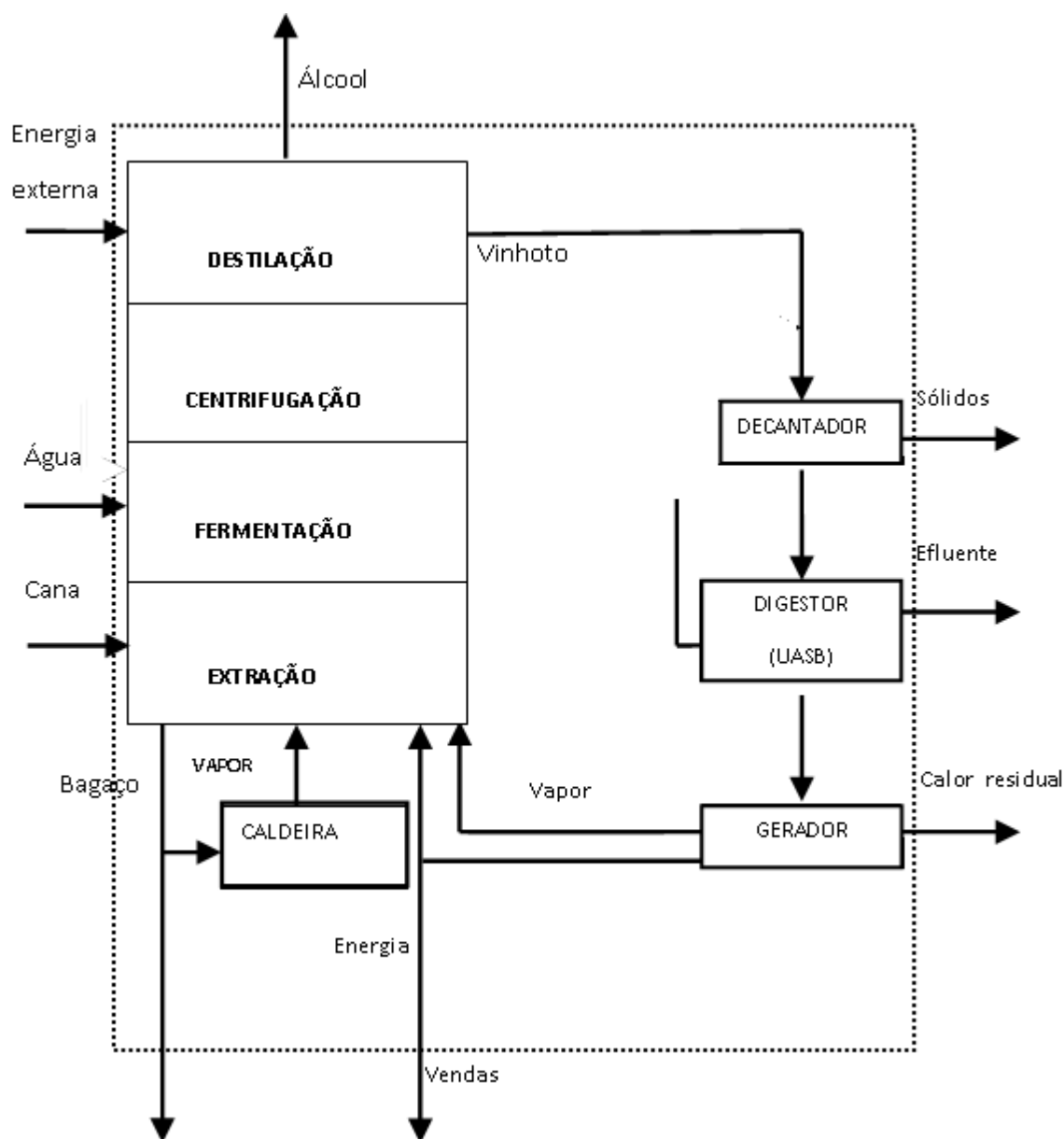
PROCESSO	EQUAÇÃO	$\Delta G^\circ$ (kJ mol <sup>-1</sup> )
Propionato a acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + 3\text{H}_2$	+76,1
Butirato a acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+48,1
Etanol a acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+9,6
Lactato a acetato	$\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + 2\text{H}_2$	-4,2
Acetato a metano	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{CH}_4$	-31,0
Bicarbonato a acetato	$2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-104,6
Bicarbonato a metano	$\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-135,6

**Fonte: Campos, 1999.**

O meio ambiente agroindustrial da Figura 2 coloca questões de ordem econômica envolvidas na fase agrícola da produção do álcool. Entre elas, o estímulo ao setor de produção de máquinas e equipamentos, tanto para a fase agrícola, quanto para a industrial, que estava previsto como um dos objetivos da instituição do PROÁLCOOL. A isso, pode-se acrescentar a pesquisa e desenvolvimento de processos para o tratamento e destino dos resíduos e subprodutos gerados.



**Figura 2- Interações na fase agrícola da produção de álcool.**  
**Fonte: Pinto, 1999.**



**Figura 3 - Fluxograma do processo de fabricação do álcool a partir da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Van Haandel, 2000.**

Por volta dos anos 70, surgiram as preocupações com o consumo de energia, os elevados custos dos tratamentos convencionais, a valorização da ocupação do solo etc, colocando então o tratamento anaeróbio em destaque. Dessa forma, foram desenvolvidas

novas tecnologias (ver fluxograma da Figura 3) e, por conseqüência, reatores classificados como sendo de alta taxa, como por exemplo, os reatores de leito fluidizado, os filtros anaeróbios, o reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), entre outros (MALINA et al.,1992) Os sistemas anaeróbios cresceram em maturidade, passando a ocupar uma posição de destaque, não só em nível mundial mas principalmente em nosso país, face as favoráveis condições ambientais e de temperatura (CHERNICHARO,1997).

A tendência de uso do reator anaeróbio como principal unidade de tratamento biológico de esgoto deve-se, principalmente, à constatação de que fração considerável do material orgânico (em geral próxima de 70%) pode ser removida, nessa unidade, sem o dispêndio de energia ou adição de substâncias químicas auxiliares. Unidades de pós-tratamento podem ser usadas para a remoção de parcela da fração remanescente de material orgânico, de forma a permitir a produção de efluente final com qualidade compatível com as necessidades que se impõem pêlos padrões legais de emissão de efluentes e a preservação do meio ambiente.

## **2.5 REATOR ANAERÓBIO**

### **2.5.1 Nomenclatura dos reatores anaeróbios**

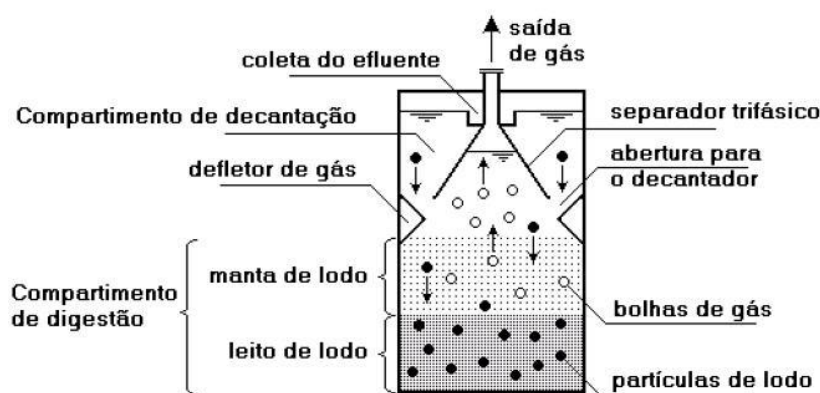
A denominação de alguns tipos de reatores no Brasil, notadamente os de manta de lodo, é sem dúvida bastante confusa. Esses reatores, que na sua versão mais aperfeiçoada tiveram sua origem na Holanda, na década de setenta, após trabalhos desenvolvidos pela equipe do Prof. Gatzte Lettinga, na Universidade de Wageningen, foram denominados de reatores UASB - UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET REATORS (LETTINGA et al., 1996).

Na tradução para o português, os mesmos deveriam ser denominados REATORES ANAERÓBIOS DE FLUXO ASCENDENTE (RAFA) e MANTA DE LODO. No Brasil tem sido divulgadas novas terminologias para a identificação desse tipo de reator, sendo que pelo menos cinco siglas são de uso freqüente em nosso meio, cada qual com suas características específicas:

- RAMA - REATOR ASCENDENTE DE MANTA ANAERÓBIA;

- DAFA - DIGESTOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE;
- RAFA - REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE;
- RALF - REATOR ANAERÓBIO DE LEITO FLUIDIFICADO;
- UASBALL - REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE ATRAVÉS DE LEITO DE LODO.

Em sistemas UASB (Figura 4), podem ser aplicadas taxas mais altas de carregamento orgânico, do que em processos aeróbios. Por essa razão, necessita-se de volume menor para os reatores anaeróbios, e, ao mesmo tempo, alto grau de energia pode ser produzido como biogás nesses sistemas (SEGHEZZO et al., 1998).



**Figura 4 - Desenho esquemático de um Reator UASB**

Fonte: Chernicharo, 1997.

### 2.5.2 O papel dos nutrientes na digestão anaeróbia

A insuficiência de nutrientes leva ao predomínio de espécies menos restritivas com relação a este aspecto, que normalmente não são boas formadoras de flocos, biofilmes ou grânulos. Ainda com relação aos macro-nutrientes, deve ser lembrado que em reatores anaeróbios a presença do enxofre é exigida em quantidades da mesma ordem de grandeza ou até mesmo maiores que as de fósforo. Isto torna delicada a administração desse elemento nesses reatores, uma vez que, se por um lado, é exigido em quantidades razoáveis, por outro,

na forma de sulfeto produz-se um efeito inibidor ao crescimento das bactérias metanogênicas.

A ausência ou presença em quantidade insuficiente de um deles pode limitar o crescimento dos microrganismos e prejudicar o funcionamento dos reatores biológicos. A relação adotada pela CETESB, para os anaeróbios é DQO: N : P de 350 : 7 : 1. Uma vez que, em função das naturezas específicas dos compostos orgânicos presentes nos diversos efluentes, os ecossistemas formados nos reatores biológicos assumem certa variabilidade, estas relações certamente irão variar de um caso para outro e os valores indicados servem apenas para uma orientação preliminar.

Em processos anaeróbios, mesmo a presença de elementos exigidos em menores quantidades, se insuficientes no reator, podem limitar o processo. São os casos do ferro, níquel, cálcio, magnésio e cobalto, importantes na estrutura de biofilmes e grânulos. Após a verificação dos níveis dos principais nutrientes, a preocupação seguinte é com a identificação e avaliação das concentrações de substâncias potencialmente tóxicas ou inibidoras da atividade biológica. Solventes orgânicos como o benzeno, tolueno e xileno, quando presentes na faixa de apenas alguns miligramas por litro, podem inibir o tratamento biológico e devem ser previamente removidos por processos físico-químicos, como arraste com ar ou a adsorção em carvão ativado, por exemplo. Cabe lembrar que, tanto neste caso como nos subseqüentes, não se pode definir limites de concentração de substâncias inibidoras ao tratamento sem relacionar com os demais constituintes dos despejos, sobretudo com a concentração de matéria orgânica biodegradável.

Quando depositada no solo, a vinhaça pode promover melhoria em sua fertilidade; todavia, quando usada para este fim, as quantidades não devem ultrapassar sua capacidade de retenção de íons, isto é, as dosagens devem ser mensuradas de acordo com as características de cada solo, uma vez que este possui quantidades desbalanceadas de elementos minerais e orgânicos, podendo ocorrer a lixiviação de vários desses íons, sobretudo do nitrato e do potássio.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Projeto dos Reatores

A primeira etapa do trabalho consistiu em projetar dois Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente em escala laboratorial. Partindo de um projeto já existente elaborado pela equipe coordenada pelo Professor Djalma Dias da Silveira. Os mesmos foram montados no Laboratório de Processos Industriais pertencente ao Departamento de Engenharia Química/UFSM.

Construídos em material acrílico transparente, possuindo 1,25 metros de altura, 0,12 metros de lado. Os reatores são dotados de quatro pontos de coleta de amostra, sendo um ponto situado na base do mesmo e os demais distanciados em intervalo de quinze centímetros (Anexo1). Possuindo um volume de 18 litros, cada, com vazão de 0,00864 m<sup>3</sup>/h, tempo de detenção hidráulica de 2,1 horas e velocidade ascensional de 0,6 m/h.

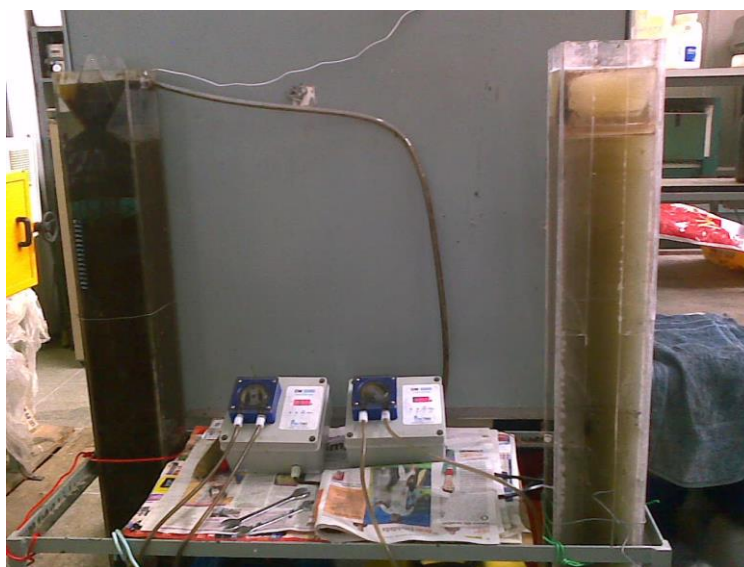
Montados em uma bancada, para melhor operação dos mesmos, adaptando, junto à eles, tubos ou mangueiras de plástico resistente à corrosão, para circulação e assim funcionamento do fluxo ascendente (Figura 5).

Cada reator, ligado a um galão de 50 litros, uma bomba peristáltica, para promover a circulação do efluente e um tubo em “U”, com solução aquosa dentro e corante, para visualizar a formação de gases.

Os efluentes provenientes da micro-destilaria, localizada no Colégio Politécnico, na Universidade Federal de Santa Maria, foram analisados e assim comparados por meio de parâmetros, que foram realizados no laboratório de Engenharia de Processos Industriais, do Centro de tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria – RS (UFSM).

Tais parâmetros validaram a eficiência dos reatores, também como os inibidores da digestão anaeróbia, tais como: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Nitrogênio Fósforo, Temperatura e pH.





**Figura 5 - Bancada com os dois reatores em funcionamento**

### **3.2 Partida do Reator UASB**

Na pesquisa, foi utilizado o inóculo proveniente de outro reator em funcionamento, de uma cervejaria, o que acelera o tempo para formação do lodo, pois o mesmo, já está adaptado com uma carga orgânica relativamente alta.

O inóculo consiste de cor escura e cheiro fortemente desagradável, no qual serviu de suporte inicial, criando um meio de cultura favorável à formação das colônias bacterianas, dando início à operação.

Após um período de repouso do inóculo (Figura 5), onde foi adicionado apenas água, no primeiro momento enchendo o reator até aproximadamente a metade de seu volume, útil até o nível dos vertedores do decantador (Figura 6), após 12 horas em repouso, foi totalmente cheio, (Figura 7), iniciando assim, a alimentação do reator.

Com o reator estabilizado e pronto para dar início ao processo, a alimentação foi feita por meio do resíduo da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar e batata.

Partindo da relação 350:7:1 (DQO : Nitrogênio : Fósforo), estabelecida para tratamento anaeróbios, foi realizado a estabilização dos nutrientes, por meio da adição de um fertilizante contendo 26,64% de fósforo e 11% de nitrogênio e uréia 46% de nitrogênio.

### 3.3 Condições Operacionais

O pH no interior de reator deve ser mantido na faixa de 6,6 e 7,8. A formação de ácidos tende a baixar o pH e afetar as bactérias formadoras de metano. Caso o pH fique abaixo de 6,2 a formação de metano é cessado e mais ácido é acumulado, causando uma paralisação na operação do digestor (QASIM, 1999).

O pH da vinhaça, em média é de 4,3, o que exige correção desse parâmetro, pois há uma inibição das bactérias, quando se tem o pH fora da faixa, entre 4,5 à 8,5.

Para diminuir esse meio ácido da vinhaça, foi acrescentado hidróxido de sódio, primeiramente em um becker com 100ml de vinhaça, para em sequência calcular o necessário para os 50 litros.

Para a operação dos reatores foram estabelecidos ciclos. Para cada tipo de efluente, pela análise de DQO, quando este atinge uma estabilidade, ou seja, quando o rendimento do reator atinge seu limite e não há mais diminuição significativa da Demanda Química de Oxigênio. Desse modo é possível avaliar o tempo de residência, que é o tempo em que o efluente permanece dentro do reator, antes de nova alimentação. Para o efluente proveniente da cana-de-açúcar, foi estabelecido cinco dias e para o efluente proveniente da batata, foi estabelecido três dias.

A vinhaça proveniente da destilaria foi recolhida em galões de 50 litros e armazenada em câmara fria, a uma temperatura de 10°C, temperatura ideal para evitar o congelamento e a degradação do efluente.

Os reatores funcionaram em ciclos em diferentes períodos do ano, verificando o desempenho em condições térmicas variadas, o que possibilitou observar, a grande influência da temperatura no crescimento microbológico. Em temperaturas entre 25° e 30°C, há um crescimento maior das populações bacterianas, influenciando diretamente no desempenho do reator, quando em temperaturas inferiores, o rendimento do processo é menor ou até inibido.

Para a vinhaça de cana-de-açúcar, foi necessário adicionar, nutrientes, sendo que a cada alimentação, no período determinado pelo cálculo da Detenção Hidráulica e análise da

estabilização do DQO, eram necessários novos cálculos, pois o mesmo varia em concentração de nitrogênio e fósforo.



**Figura 6 - Inóculo**



**Figura 7 – Início da Formação do Lodo**



**Figura 8 - Enchimento até os vertedores**

### 3.4 Variáveis Importantes na Operação do Reator

#### 3.4.1 Tempo de Detenção Hidráulica

O tempo de detenção hidráulica é o período em que o fluxo ascendente do efluente leva dentro do reator para completar seu percurso.

Dada pela fórmula

$$\theta_h = V / Q$$

Onde:

$\theta_h$  = Tempo de detenção hidráulica (d)

V = Volume ( $m^3$ )

Q = Vazão ( $m^3 L^{-1}$ )

#### 3.4.2 Velocidade ascensional

Velocidade Ascensional:

É calculada pela relação entre a vazão afluente e área da seção transversal do reator UASB:

$$v = \frac{Q}{A}$$

V = Velocidade ascensional ( $m L^{-1}$ )

Q = Vazão afluente ( $m^3 L^{-1}$ )

A = Área da seção transversal ( $m^2$ )

Outra fórmula para cálculo da velocidade ascensional:

$$v = \frac{Q * H}{V} = \frac{H}{TDH}$$

Onde:

H = Altura do reator (m)

Vazão afluente é a vazão de entrada, ou seja, a vazão de alimentação que a bomba peristáltica fornece. A área da seção transversal é a área pela qual a alimentação passa transversalmente, pelas dimensões do reator é possível de ser calculada.

Percebe-se que a área não pode ser alterada, então a variável de mudança e projeto fica pela vazão de alimentação, para se enquadrar na velocidade ascensional recomendada por Campos (1999), demonstrada na tabela 3.

**Tabela 3: Velocidades ascensionais em função da vazão de entrada.**

Vazão de Entrada	Velocidade Ascensional (m/h)
Vazão média	0,5 – 0,7
Vazão máxima	0,9 – 1,1
Picos	< 1,5

Fonte: CAMPOS, 1999.

O cuidado com a adição de macro nutrientes é de extrema importância para um bom funcionamento do reator. A falta destes faz com que cesse o crescimento bacteriano dentro do reator e o excesso faz com que ocorra um crescimento exorbitante das colônias bacterianas, que propicia o surgimento de uma formação espumosa de odor desagradável, que pode tanto transbordar o reator, causando certo transtorno, ou até mesmo em caso mais grave o entupimento das mangueiras de circulação do efluente e do separador trifásico o que impede a captação do biogás, comprometendo toda a estrutura e o objetivo do aparelho (Figura 9).



**Figura 9 - Formação de espuma**

Para determinação do teor alcoólico da vinhaça proveniente da microdestilaria da universidade, utilizou-se o alcoolyzer-wine da Anton Paar. O procedimento deu-se nas seguintes etapas.

- Ligou-se o equipamento Alcoolyzer-wine Anton Paar;
- Aguardou-se a inicialização;
- Injetou-se água para limpeza;
- Ligou-se o jato de ar para secagem;
- Injetou-se água com a finalidade de medir o branco das medidas, para minimização dos erros;
- Aguardou-se a estabilização da medida do equipamento;
- Após a medida realizou-se secagem, através da injeção de ar;
- Inseriu-se a amostra de vinhaça;
- Aguardou-se a estabilização da medida do equipamento;
- Entre cada medida foi injetado água para limpeza, e ar para secagem. Todas as amostras foram analisadas em triplicata;

A medição qualitativa de metano foi feita, por meio do tubo em “U” (Figura 10), com o líquido corante, podendo ser visualizado sua diferença de altura, figura 11, em um papel milimetrado.

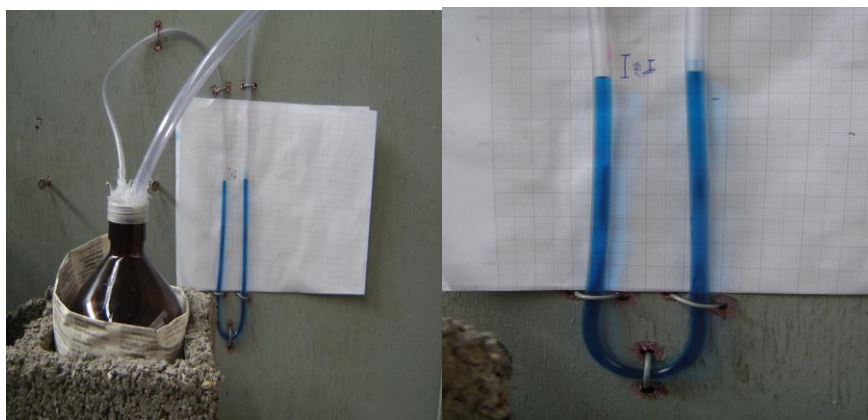


Figura 10 - Tubo em “U”

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos com relação aos parâmetros operacionais e avaliação do desempenho frente a diferentes efluentes provenientes da destilação alcoólica, amilácea e a sacarídea.

### **4.1 Parâmetros Operacionais**

#### **4.1.1 pH**

Segundo Chernicharo (1997) o pH ótimo em sistemas anaeróbios de tratamento de efluentes depende do substrato e dos microorganismos envolvidos no processo.

A média do pH corrigido, de entrada da vinhaça de cana-de-açúcar foi de 7,75 e a média pós tratamento foi de 4,6, enquanto para a vinhaça de batata o valor máximo do pH inicial foi de 7,23 e mínima pós tratamento 4,58.

#### **4.1.2 Temperatura**

As bactérias anaeróbias são muito sensíveis às variações de temperatura e como não podem controlar sua temperatura dependem exclusivamente do meio onde estão. Uma pequena variação da temperatura pode interromper a produção de metano e consequentemente acumular ácidos voláteis no interior do reator (CHERNICHARO,1997).

Como o experimento deu-se ao longo de um ano, não continuamente, mas sim em ciclos contínuos, foi possível verificar as reações de seu funcionamento, perante diferentes estações do ano e suas devidas temperaturas.

Em temperaturas mais altas o reator UASB, tem um melhor rendimento, o que no inverno, com temperaturas baixas, tem-se uma perda desse rendimento. Sendo assim, foi feito como teste, ligar um aquecedor térmico submerso no efluente, o que demonstrou pouca eficiência, pois a vinhaça não ultrapassou a faixa mesofílica (20 - 45°C).

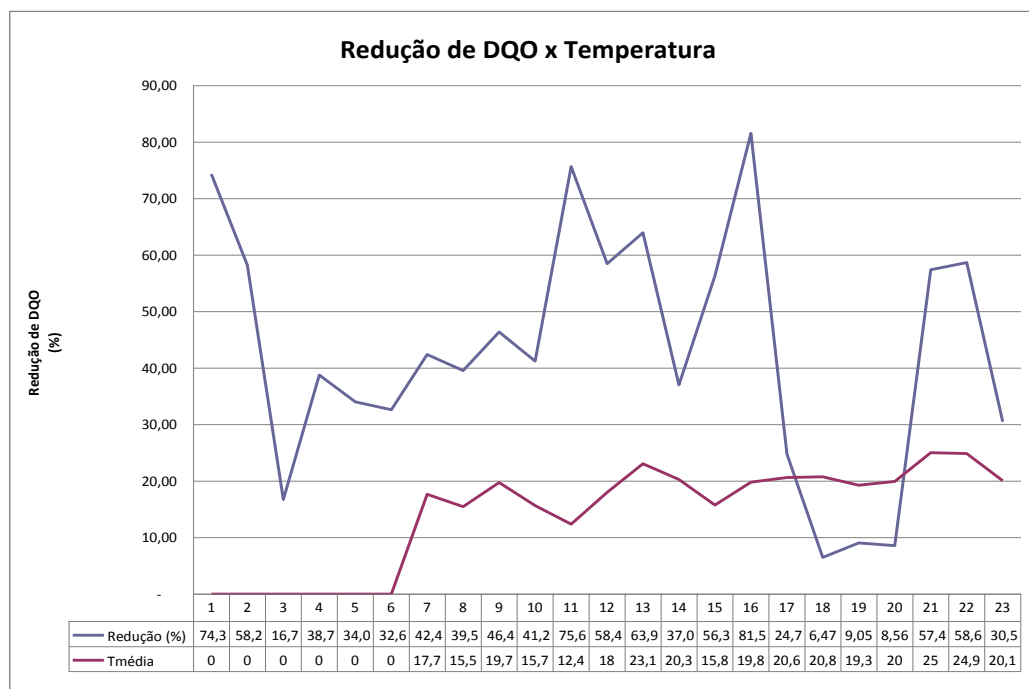
### 4.1.3 DQO

A redução da DQO da vinhaça de batata foi de 95.75%, sendo o valor máximo antes do tratamento de 25.900.00 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> e na saída de 1.100.00 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>.

Na vinhaça da cana-de-açúcar essa redução foi de 81.55%, sendo o valor máximo na entrada de 75.900.00 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> e na saída de 14.000.00 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>, podendo ser considerada uma eficiência satisfatória para o início da operação de um reator anaeróbio tipo UASB. A estabilidade do processo foi demonstrada pelos valores da DQO total na descarga do reator, que se mantiveram constantes, apesar das variações de temperatura, pH e principalmente carga orgânica volumétrica aplicada.

Na cana-de-açúcar, ao longo de 23 ciclos, cada um com cinco dias de operação, foi possível observar (Figura 11) observou-se picos, na redução da DQO, mesmo em temperaturas praticamente estáveis.

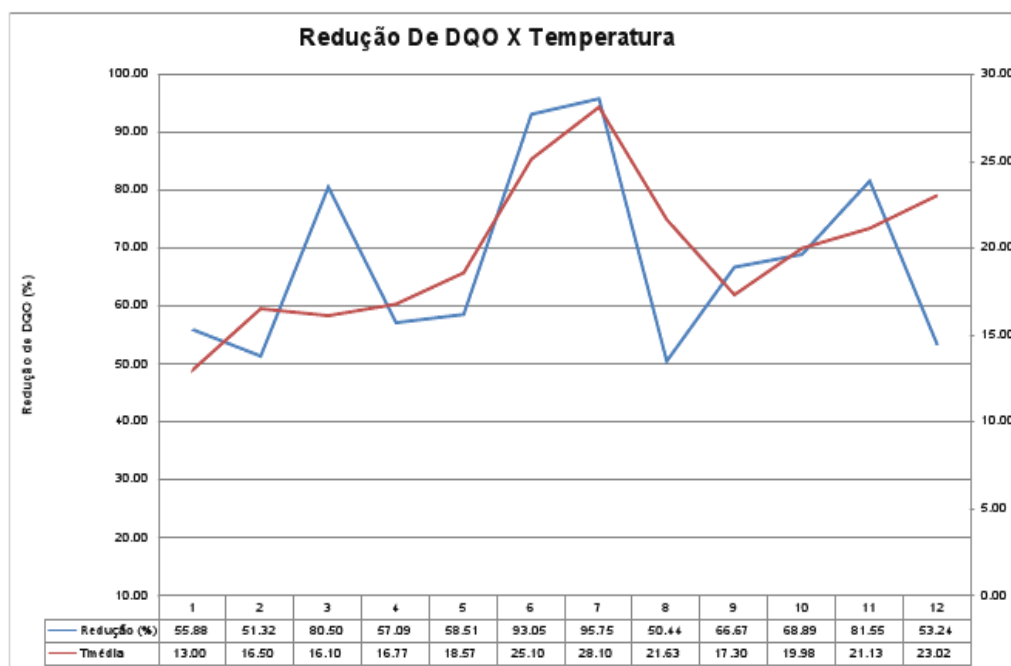
Na batata, ao longo de 12 ciclos, cada um com três dias de operação, observou-se maior redução da DQO em temperaturas mais elevadas (Figura 12).



**Figura 11 - Redução DQO, cana-de-açúcar x Temperatura**

Fonte: Dados da Pesquisa





**Figura 12- Redução da DQO, batata x Temperatura**  
**Fonte: Dados da Pesquisa**

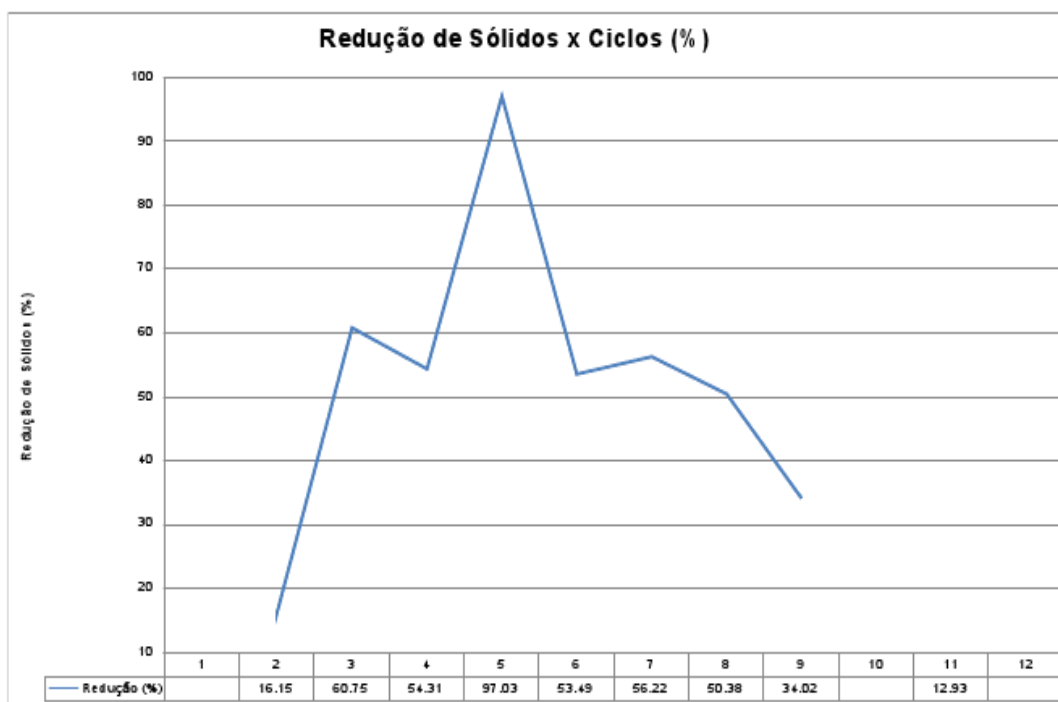
#### 4.1.4 Sólidos Totais

No caso da batata, a redução de sólidos teve um pico, na metade do ciclo; após esse período, o reator estabiliza e não apresenta um rendimento acima da faixa observada na Tabela 4 e em seguida pela Figura 13.

**Tabela 4 Redução de Sólidos da batata x Ciclos**

Ciclo	Sólidos totais		
	Inicial	Final	Redução
4	25.212.00	11.520.00	54.31
5	25.212.00	748.00	97.03
6	24.056.00	11.188.00	53.49

**Fonte: Dados da Pesquisa**

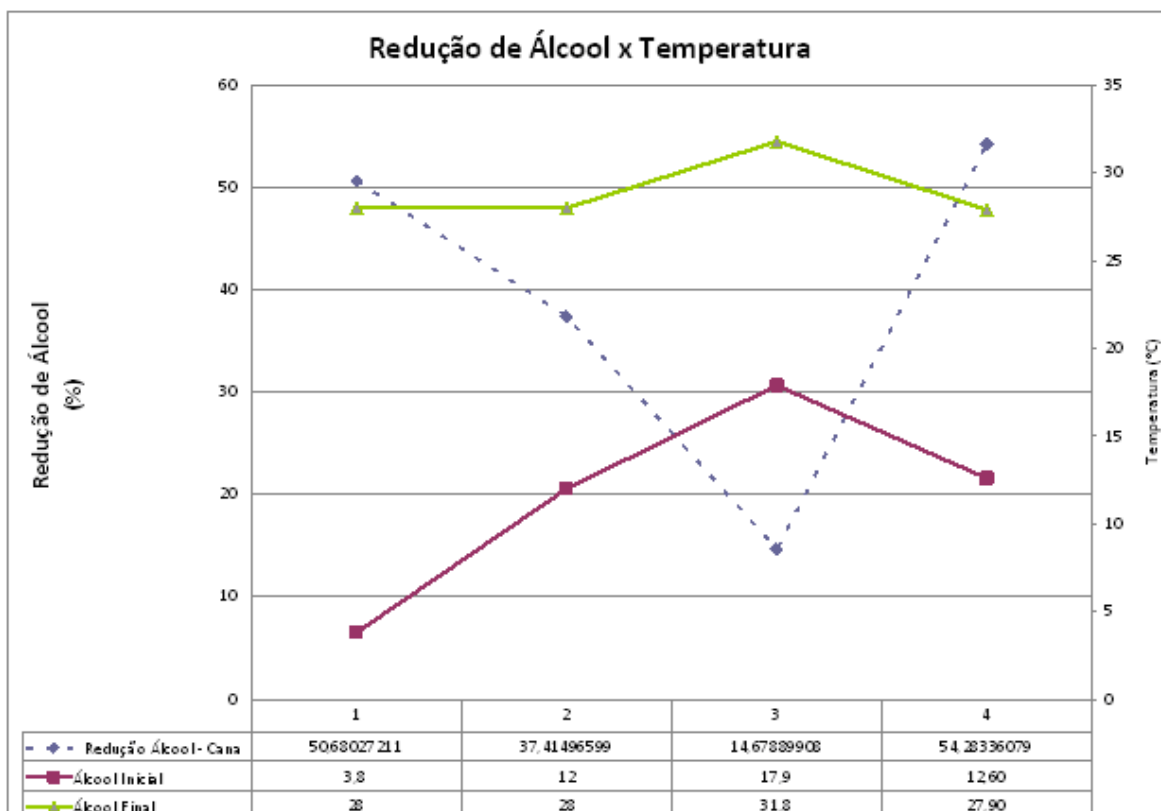


**Figura 13 - Redução de Sólidos da batata x Ciclos**  
**Fonte: Dados da Pesquisa**

Nas análises da vinhaça de batata, observou-se, uma quantidade expressiva de sólidos, característicos desse tipo de efluente, que dificulta a operação e manutenção do reator, pois os sólidos provocam entupimento das mangueiras.

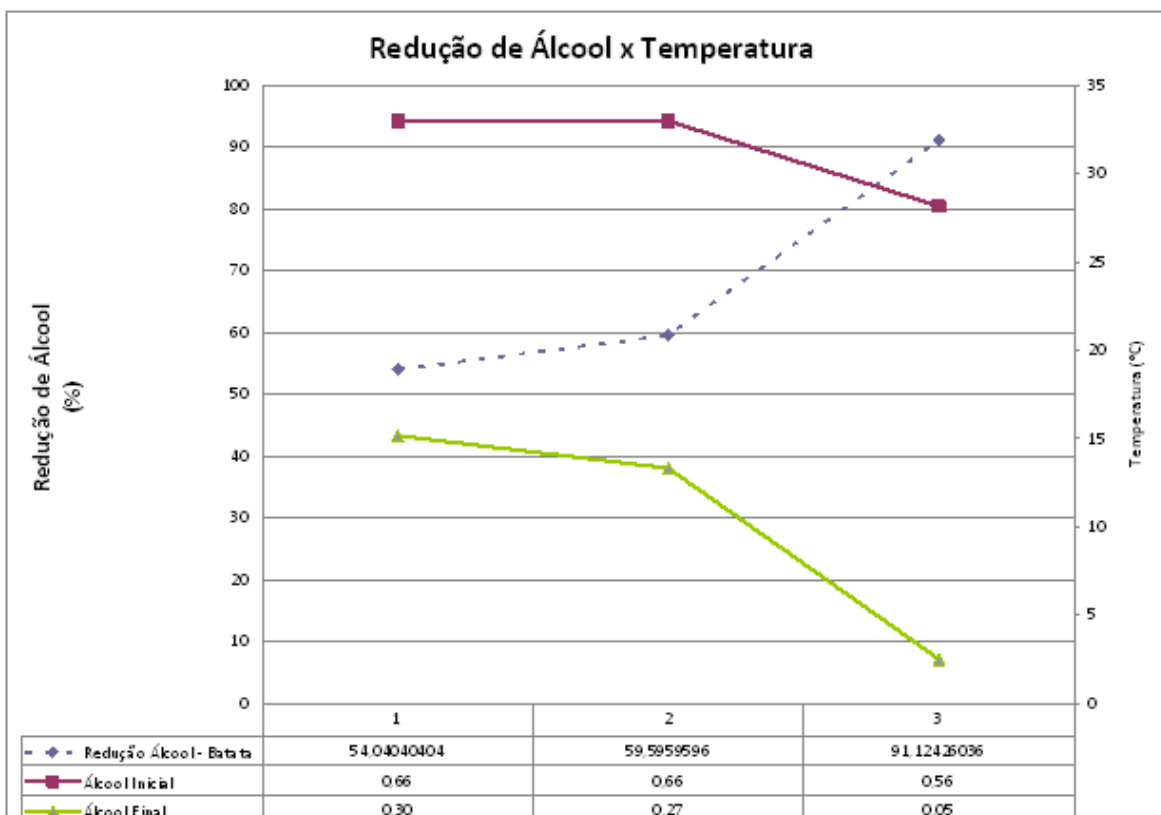
## 4.2 Teor Alcoólico

Quatro pontos de amostragem, não contínuos, em diferentes períodos do ano, possibilitaram observar que a temperatura tem influência na remoção do álcool, da vinhaça de cana-de-açúcar, pois em uma temperatura mais elevada, a redução do teor alcoólico é maior (Figura 14).



**Figura 14 - Redução do álcool x temperatura, na vinhaça de cana-de-açúcar**  
**Fonte: Dados da Pesquisa**

Três pontos de amostragem, não contínuos, em diferentes períodos do ano, possibilitaram identificar, que a temperatura não teve influência significativa na redução do álcool na vinhaça de batata, pois mesmo em temperaturas mais brandas apresentou redução do teor alcoólico (Figura 15).



**Figura 15 - Redução do álcool x temperatura, na vinhaça de batata**

Fonte: Dados da Pesquisa

Como a formação do gás em um reator em escala piloto, como os da presente pesquisa, é muito pequena, não foi possível quantificar. Porém pode-se fazer um comparativo, registrando que a vinhaça de batata, produziu mais metano do que o efluente da cana-de-açúcar.

## 5. CONCLUSÃO

Como era de se esperar, foi possível observar que o reator UASB apresentou um melhor rendimento em termos de redução da DQO após o período de estabilização, com alimentação regular e corrigida, o que permite a formação de colônias bacterianas adequadas e aclimadas à vinhaça, promovendo maior eficiência de conversão da matéria orgânica presente no resíduo da destilação, independente da origem da matéria-prima.

A redução de DQO foi de 95,75%, para vinhaça proveniente da batata e de 81,56%, para a vinhaça proveniente da cana-de-açúcar, podendo ser considerada uma eficiência satisfatória para um reator anaeróbio tipo UASB. A estabilidade do processo é demonstrada pelos valores da DQO total na descarga do reator que se mantiveram constantes, apesar das variações de temperatura, pH e principalmente carga orgânica volumétrica aplicada.

Os reatores funcionaram em ciclos ao longo de um ano, onde se pode observar o efeito das condições térmicas, na eficiência do processo.

A temperatura demonstrou ser um parâmetro de extrema importância na eficiência do processo, influenciando diretamente no crescimento microbiano em ambos os efluentes.

Os sólidos totais, no efluente da batata apresentaram-se em maior quantidade, demonstrando que o tratamento da vinhaça da batata por meio de reatores UASB, não seria o ideal.

Quanto aos nutrientes, foi necessário adicionar fósforo e nitrogênio ao efluente da cana, pois o mesmo era deficiente na relação 350:7:1, já no efluente da batata, não foi necessário tal correção.

A formação de biogás foi qualitativamente maior no tratamento do efluente da batata do que o efluente da cana-de-açúcar.

Mesmo os reatores UASB apresentando remoção da matéria orgânica satisfatória, os efluentes não atingem as exigências da resolução do CONAMA 430/11, o que indica a necessidade de um pós-tratamento, antes de seu despejo em corpos receptores.

## **5.1 Sugestões para Futuros Trabalhos**

Mesmo o reator UASB apresentando vantagens comparadas a outros sistemas de tratamento de efluentes, se faz necessário um pós-tratamento, para o efluente atender as exigências do CONAMA, O que sugere sistemas combinados, como reator UASB seguido de um filtro biológico (Moraes & Ferreira, 2007).

Sugere-se ainda, prosseguimento nas pesquisas de comportamento das variáveis de processo, operando-se o reator em temperatura e pH controlados, com vistas à operação a campo, onde é difícil operar em condições estáveis.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA (American Public Health Association), **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20th Edition, ed. Clesceri L.S., Greenberg A.E., Eaton A.D.. Washington, DC: American Public Health Association, 1998.

AQUINO, S.F.; CHERNICHARO, C. A. L. **Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVS) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle.** Engenharia . sanitária. Ambiental. Vol.10. n. 2. 152-161, 2005.

BARAMPOUTI, E.M.P.; MAI, S.T.; VLYSSIDES, A.G. **Dynamic modeling of biogas production in an UASB reactor for potato processing wastewater treatment** Chemical Engineering School, National Technical University of Athens, 9 Heron Polytechniou Street, Zographou 15700, Greece Received 19 November 2003; received in revised form 26 June 2004; accepted 26 June 2004

BRASIL. PROGRAMA PROALCOOL. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br>> Acesso em: 20 de jun. 2012.

CAMPOS, J. R., **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo**, 1ª Ed, Rio de Janeiro, Brasil, ABES, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, Projeto PROSAB, 1999.

CETESB - **Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas** Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br.htm>>. Acesso em: 21 jan. 2012.

CHERNICHARO, C.A.L., VAN HAANDEL, A.; AISSE, M.M.; CAVALCANTI, P.F.F. Capítulo 7, **Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**, 1999.

CHERNICHARO, C.A.L., **Reatores Anaeróbios.** - volume 5. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG. Belo Horizonte, 1997.

CORRAZA, R. I., **Reflexões sobre o papel das políticas ambientais e de ciência e tecnologia na modelagem de opções produtivas ‘mais limpas’ numa perspectiva evolucionista: um estudo sobre o problema da disposição da vinhaça**, 1996.

CORAZZA, R. I. **Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lock-in na fertirrigação.** SOBER - Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural. XLIV

CONGRESSO DA SOBER “*Questões Agrárias, Educação no Campo e Desenvolvimento*”. Fortaleza – CE. 16p, 2006.

FREIRE, W.J.; CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Ed. Agropecuária, Guaíba. 203p. 2000.

GEMTOS, T. A.; CHOULIARAS, N.; MARAKIS, S. **Vinasse rate, time of application and compaction effect on soil properties and durum wheat crop**. *Journal of Agriculture and Engineering Research*, v.73, n.3, p.283-296, 1999.

GRETSCHMANN, **Ajuste de curvas na produção de etanol num processo em batelada**, X Encontro Gaúcho de Educação Matemática, Ijuí/RS, 2009

KAAN YETILMEZSOY, **A fuzzy-logic-based model to predict biogas and methane production rates in a pilot-scale mesophilic UASB reactor treating molasses wastewater** F. Ilter Turkdogan-Aydinoll, Kaan Yetilmmezsoy\_Yildiz Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Environmental Engineering, 34220 Davutpasa, Esenler, Istanbul, 2010.

LETTINGA, G., GEEST, A. v.d., HOBMA, S. & LAMA, J. **Anaerobic treatment of methanol wastes**. *Water Res.*, 13, 725-37, 1979.

LETTINGA, G., ZEEUW, W. & OUBORG, E. **Anaerobic treatment of wastes containing methanol and higher alcohols**. *Water Res.*, 15, 171-82, 1981

MALINA, J. F. e POHLAND, F. G. **Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes**, 1992.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005

MORAES S.; FERREIRA O. **TRATAMENTO ANAERÓBIO: AVALIAÇÃO DO CONJUNTO REATOR E FILTRO BIOLÓGICO**. Universidade Católica de Goiás Departamento de Engenharia Ambiental, 2007.

PIMENTA, G.; OLIVEIRA, L. **Produção de etanol**. Faculdade de Ciência e Tecnologia de Montes Claros – FACIT, MG, 2010

PINTO, C. P. **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável**, Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, 1999.



QASIM, S. R., **Wastewater treatment plants: Planning, design, and operation**, 2nd edition, CRC Press - 1107 p., 1999.

ROSSETTO, A. J. **Utilização agronômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira**. In: Paranhos, S.B. (ed.). *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas:Fundação Cargill, 1987, v.2, p.435-504.

SEGHEZZO, L.; ZEEMAN, G.; VAN LIER, J.B.; HAMELERS, H.V.M.; LETTINGA G. (1998). A review: **The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors**. *Bioresource Technology*, Vol.65, No.3, 175-190.

SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R. **Caracterização de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: propriedades químicas**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, n.2, p.291-299, 1998.

VAN HAANDEL, A. C. **Aproveitamento dos subprodutos de destilarias de álcool para proteger o meio ambiente e aumentar a rentabilidade**. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Artigo apresentado no XXVII congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre

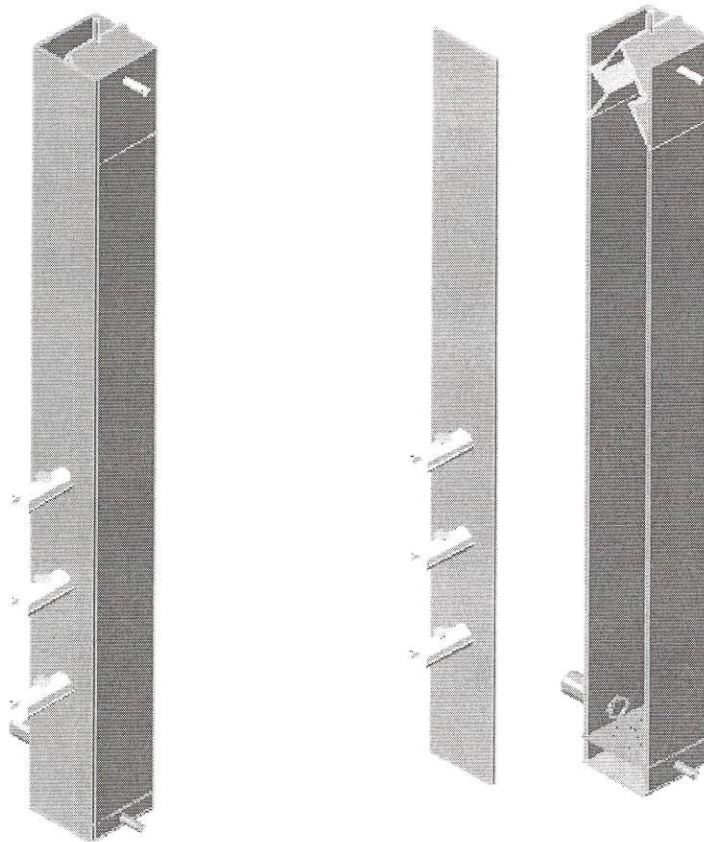
VIANA, A. B., **Tratamento anaeróbico de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55°C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica**, 2006.

**ANEXO**

**I Reator UASB**

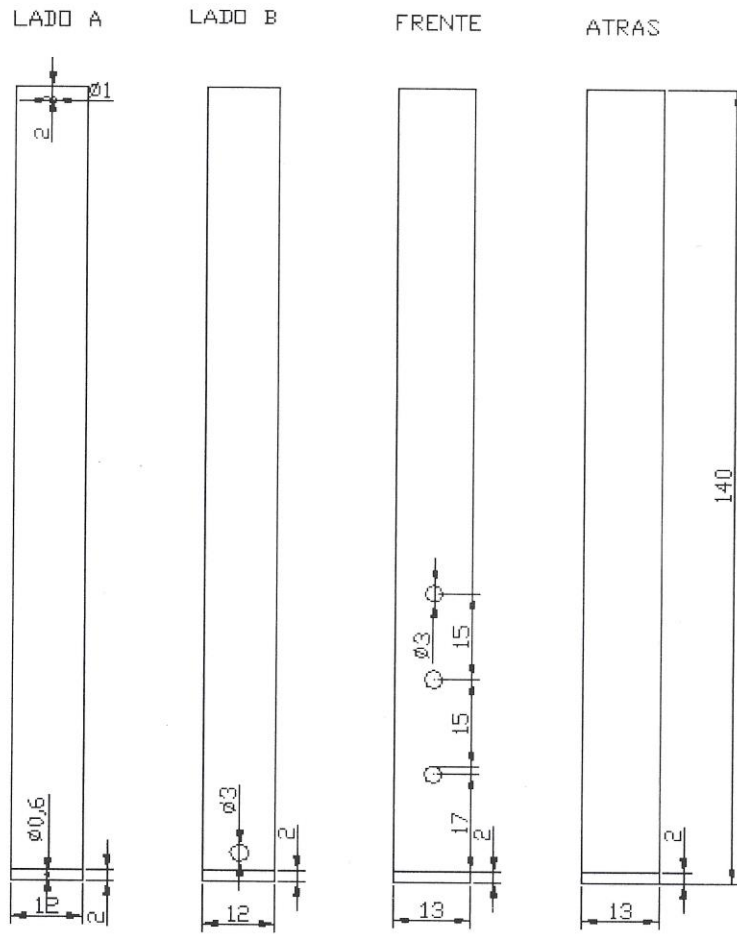
**ANEXO I**

## REATOR UASB



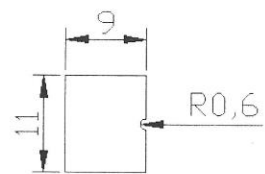
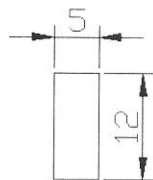
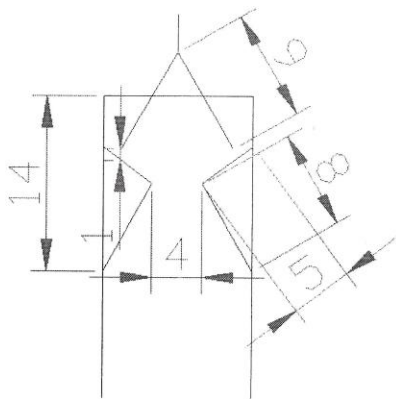
Relatório à FAPERGS aprovado e com publicações oral e em anais no 5º SBA (Simpósio Brasil-Alemanha – Deutsches-Brasilianisches Symposium) em Stuttgart-Alemanha. Avaliação do uso de reator anaeróbio de fluxo ascendente como pós-tratamento dos efluentes do Hospital Universitário de Santa Maria.

→ Chapas de acrílico 5mm – Uma unidade de cada uma das chapas abaixo



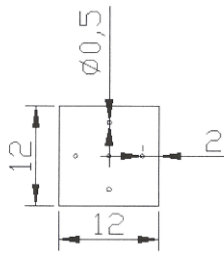
Separador

→ Duas unidades de cada uma das chapas abaixo:

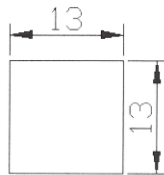


→ Uma unidade de cada uma das chapas abaixo:

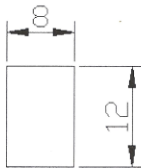
Distribuidor:



Fundo:



→ Quatro unidades da chapa abaixo



**APÊNDICE**

Análises da DQO da vinhaça de cana-de-açúcar.

Ciclo	DQO Inicial	DQO Final	Redução (%)
1	19.200	4.930	74.32
2	5.300	6.140	15.85
3	128.600	53.700	58.24
4	64.500	53.700	16.74
5	50.300	30.800	38.77
6	19.100	12.600	34.03
7	18.700	12.600	32.62
8	56.600	32.600	42.40
9	27.300	16.500	39.56
10	34.700	18.600	46.40
11	43.900	25.800	41.23
12	72.300	17.600	75.66
13	48.400	20.100	58.47
14	68.500	24.700	63.94
15	94.300	59.400	37.01
16	112.000	48.900	56.34
17	65.200	12.020	81.56
18	44.800	33.700	24.78
19	44.800	41.900	6.47
20	43.100	39.200	9.05
21	43.200	39.500	8.56
22	72.100	30.700	57.42
23	72.100	29.800	58.67
24	72.100	50.100	30.51

## Análises da DQO da vinhaça de batata.

Ciclo	DQO Inicial	DQO Final	Redução(%)
1	54.400.00	24.000.00	55.88
2	53.000.00	25.800.00	51.32
3	28.200.00	5.500.00	80.50
4	28.200.00	12.100.00	57.09
5	28.200.00	11.700.00	58.51
6	30.200.00	2.100.00	93.05
7	25.900.00	1.100.00	95.75
8	34.100.00	16.900.00	50.44
9	60.600.00	20.200.00	66.67
10	87.100.00	27.100.00	68.89
11	75.900.00	14.000.00	81.55
12	41.700.00	19.500.00	53.24