

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

FERNANDO OLIVEIRA DE QUEIROZ

INFLUÊNCIA DA FILTRAÇÃO NO PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO DA VINHAÇA

UBERABA – MG

2017

FERNANDO OLIVEIRA DE QUEIROZ

INFLUÊNCIA DA FILTRAÇÃO NO PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO DA VINHAÇA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Triângulo Mineiro- Programa de mestrado profissional em inovação tecnológica-PMIPT-como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientador: Dr Marcelo Bacci da Silva

Co-orientador: Dr. Deusmaque Carneiro  
Ferreira.

UBERABA – MG

2017

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro**

Q44i Queiroz, Fernando Oliveira de  
Influência da filtração no processo de concentração da vinhaça / Fernando  
Oliveira de Queiroz. -- 2017.  
59 f. : il., fig., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) -- Univer-  
sidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2017  
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva  
Coorientador: Prof. Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira

1. Água - Reuso. 2. Indústria açucareira - Subprodutos. 3. Filtros e fil-  
tração. 4. Evaporação. I. Silva, Marcelo Bacci da. II. Universidade Federal  
do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 628.179.2

FERNANDO OLIVEIRA DE QUEIROZ

INFLUÊNCIA DA FILTRAÇÃO NO PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO DA  
VINHAÇA

Trabalho de conclusão apresentado ao  
Programa de Mestrado Profissional em  
Inovação Tecnológica da Universidade  
Federal do Triângulo Mineiro, como requisito  
para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 02 de fevereiro de 2017

Banca Examinadora:

*Marcelo Bacci da Silva*

---

Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva  
Orientador – PMPIT - UFTM

*Mônica Hitomi Okura*

---

Profa. Dra. Mônica Hitomi Okura  
Membro Titular – UFTM

*José Roberto Delalibera Finzer*

---

Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer  
Membro titular – UNIUBE

*Dedico esse trabalho a minha esposa,  
Dariane, e aos meus amados filhos, Arthur e  
Lucas.*

.

*A tarefa não é tanto ver aquilo que  
ninguém viu, mas pensar o que ainda  
ninguém pensou sobre aquilo que todo  
mundo vê.*

*Arthur Schopenhauer*

## RESUMO

O setor sucroalcooleiro se caracteriza não somente pela alta produtividade, mas também alta demanda de água e pelas possibilidades de reutilização e reaproveitamento deste recurso natural. Neste contexto de sustentabilidade e uso racional de recursos hídricos devido à escassez, surgiram novas tecnologias em especial para produção sucroalcooleira, através do reaproveitamento hídrico da água gerada pelo processo de evaporação da vinhaça. As plantas de evaporação de vinhaça são grandes consumidoras de energia, inviabilizando o empreendimento, muitas das vezes. O objetivo deste trabalho foi estudar a operação de evaporação de vinhaça bem como algumas de suas características físico-químicas, propondo em escala laboratorial uma filtração simples de amostras de vinhaça de uma usina sucroalcooleira, com intuito de reduzir o consumo energético no processo de evaporação. Avaliando ainda as características qualitativas da água recuperada da evaporação, como resultado principal obteve-se em amostras de vinhaça previamente filtradas uma maior concentração do °brix, portanto, uma maior redução no volume de vinhaça, e maior geração de água para o reúso. Assim, os resultados quantitativos e qualitativos encontrados em relação a filtração da vinhaça para a operação de evaporação, apontam para benefícios financeiros e ambientais.

**Palavras-chave:** Filtração. Vinhaça. Evaporação. Água. Reúso

## **ABSTRACT**

The sugar and alcohol industry is characterized not only by high productivity, but also high demand for water and the possibilities of reuse and reuse of this natural resource. In this context of sustainability and rational use of water resources due to the scarcity, new technologies appeared especially for sugar and alcohol production, through the reuse of water generated by the process of evaporation of vinasse. . Evaporation plants of vinasse are great consumers of energy, making the venture impossible, many times. The objective of this work was to study the process of evaporation of vinasse as well as some of its physicochemical characteristics, proposing in a laboratory scale a simple filtration of vinasse samples from a sugar-alcohol plant, in order to reduce the energy consumption in the evaporation process. It also evaluates the qualitative characteristics of water recovered from evaporation. As a main result, a higher concentration of the brix was obtained in previously filtered vinasse samples, therefore, a greater reduction in vinasse volume, and a higher generation of water for reuse. Thus, the quantitative and qualitative results found in relation to the filtration of vinasse to the evaporation operation, point to financial and environmental benefits.

**Keywords:** Filtration. Vinasse. Evaporation. Water. Reuse.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1–Zoneamento da cana de açúcar no Brasil .....	5
Figura 2 - Organograma de geração e reúso de resíduos no setor sucroenergético.....	7
Figura 3– Esquema da destilação do etanol .....	9
Figura 4 – Evolução da produção de etanol e geração de vinhaça .....	12
Figura 5 - Balanço teórico de K <sub>2</sub> O e o potencial de área fertirrigada com vinhaça. ....	16
Figura 6 - Aspersão da vinhaça em lavoura de cana-de-açúcar. ....	17
Figura 7 – Sequências metabólicas e microrganismos envolvidos.....	18
Figura 8- Esquematização de reatores anaeróbios de alta taxa. ....	19
Figura 9 - Esquema de um evaporador simples.....	20
Figura 10 - Esquema de evaporador de múltiplo efeito. ....	21
Figura 11- Esquema de uma planta de evaporação de vinhaça. ....	25
Figura 12 - Esquema de um condensador evaporativo. ....	26
Figura 13 - Água recuperada pelo processo de concentração de vinhaça.....	27
Figura 14– Distribuição da água no mundo. ....	28
Figura 15- Distribuição dos recursos hídricos, da população e do território brasileiro. ....	29
Figura 16 - Entradas de água no processo de etanol e açúcar. ....	31
Figura 17 - Curva de tendência de captação de água na indústria sucroalcooleira (m <sup>3</sup> /t.cana). .....	32
Figura 18 - Distribuição da demanda de água na usina sucroalcooleira. (kg/t cana) .....	33
Figura 19 - Relação de água para potencial reutilização (kg/t cana). ....	34
Figura 20 - Balanço global de água na usina sucroalcooleira. ....	35
Figura 21- Condutivímetro de bancada.....	37
Figura 22 - pHmetro de bancada. ....	38
Figura 23 - Refratômetro digital. ....	39
Figura 24- Utilização do multímetro no experimento.....	41
Figura 25 - Esquema de filtração da vinhaça. ....	42
Figura 26 - Ebulidor elétrico, esquema evaporação de vinhaça, amostras para leitura do brix. .....	43
Figura 27 - Esquema de evaporação da vinhaça e recuperação da água de reuso.....	44
Figura 28 – °Brix, referente a etapa da evaporação da vinhaça <i>in natura</i> e filtrada.....	49
Figura 29 – Energia consumida na etapa de evaporação da vinhaça <i>in natura</i> e filtrada.....	52
Figura 30 - Etapa de filtração da vinhaça no processo de produção sucroalcooleira. ....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Teor alcoólico do vinho e produção de vinhaça. ....	9
Tabela 2 - Constantes K1 e K2.....	10
Tabela 3 - Volume de vinhaça pelo teor alcoólico do vinho.....	10
Tabela 4 - Caracterização físico-química da vinhaça .....	13
Tabela 5 - Valores dos coeficientes globais de transferência de calor .....	23
Tabela 6 - Coeficientes globais de transferência de calor (U) calculados para planta de evaporação de vinhaça .....	24
Tabela 7 - Redução percentual de volume em função da concentração e equivalente relação vinhaça por litro de etanol.....	26
Tabela 8 - Estimativa da proporção das diferentes formas de alcalinidade .....	46
Tabela 9 - Valores e média do pH, °Brix e condutividade das amostras .....	47
Tabela 10 - Elevação do °brix durante a evaporação .....	48
Tabela 11 - Quantidade sólidos retidos na filtração (g).....	50
Tabela 12 - Quantidade de sólidos na amostra de vinhaça após filtração (g) .....	50
Tabela 13 - Quantidade de sólidos em suspensão total e sólidos dissolvidos totais nas amostras .....	51
Tabela 14 - Energia consumida para evaporar a vinhaça.....	52
Tabela 15 - Resultados analíticos da água de reúso.....	53
Tabela 16 - Parâmetros analíticos da água industrial captada na indústria sucroalcooleira ....	54

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

AEAC – Álcool Etílico Anidro Carburante  
AEHC - Álcool Etílico Hidratado Carburante  
APP – Área de Preservação Permanente  
ANA - Agência Nacional de Águas.  
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
Conab – Companhia Nacional de Abastecimento  
Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
CTC – Capacidade de Troca Catiônica  
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio  
DQO – Demanda Química de Oxigênio  
MG – Minas Gerais  
PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos  
Proálcool – Programa Nacional do Álcool  
SMA – Secretaria do meio Ambiente  
SDT - Sólidos Dissolvidos Totais  
SST- Sólidos Solúveis Totais  
SP – São Paulo  
UNICA – União da Indústria de Cana de Açúcar

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>3</b>
<b>3 OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
3.1 OBJETIVO GERAL.....	4
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
<b>4 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
4.1 A CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL.....	5
4.2 PROCESSAMENTO DA CANA DE AÇÚCAR .....	6
4.3 RESÍDUOS E SUBPRODUTOS DA FABRICAÇÃO DE ETANOL .....	7
4.3.2 Alternativas para o uso da vinhaça .....	13
<b>4.4 A ÁGUA .....</b>	<b>27</b>
4.4.1 A água no Brasil .....	28
4.4.2 Legislação brasileira quanto ao uso da água.....	29
4.4.3 Água e o setor sucroalcooleiro .....	30
4.4.4 Reúso da água.....	33
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
5.1 COLETA DAS AMOSTRAS .....	36
5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA VINHAÇA .....	36
5.2.1 Massa específica.....	36
5.2.2 Condutividade .....	37
5.2.3 pH .....	38
5.2.4 Leitura do °Brix.....	38
5.2.5 Sólidos .....	39
5.3 CÁLCULO DA QUANTIDADE DE ENERGIA NECESSÁRIA PARA EVAPORAR A VINHAÇA <i>IN NATURA</i> E FILTRADA. ....	40
5.3.1 Filtração da vinhaça. ....	42

5.3.2 Evaporação da vinhaça. ....	43
5.4 GERAÇÃO DA ÁGUA DE REÚSO APARTIR DA VINHAÇA E SUA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA .....	43
5.4.1 Turbidez .....	44
5.4.2 Dureza total .....	45
5.4.3 Alcalinidade .....	46
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
6.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA VINHAÇA .....	47
6.1.2 pH, °brix e condutividade das amostras de vinhaça .....	47
6.1.3 Brix das amostras de vinhaça durante a evaporação. ....	47
6.1.4 Análise dos sólidos presentes nas amostras de vinhaça.....	49
6.2 ENERGIA NECESSÁRIA PARA EVAPOAR A VINHAÇA .....	51
6.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA DE REÚSO .....	53
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a atividade da agroindústria da cana-de-açúcar possui relevante importância, contribuindo para o desenvolvimento econômico, social, geração de emprego e renda nas regiões onde estão instaladas. A crescente demanda energética aliada a uma forte conscientização ambiental fez com que o bioetanol se consolidasse como uma fonte de energia renovável muito atrativa. Embasada principalmente nos conceitos de sustentabilidade, como já tinha sido previsto na década de 70, marcada pela criação do Programa nacional do Alcool (Proálcool), este combustível surgiu como alternativa à diminuição da dependência dos combustíveis fósseis, ou seja, substituir parte da gasolina por etanol (AMORIM & LEÃO, 2005).

O Brasil ocupa atualmente a segunda colocação no ranking em produção de etanol, sendo superado pelos Estados Unidos. A principal matéria-prima no país é a cana-de-açúcar, enquanto que no líder mundial essa produção se dá pelo processamento do milho (LEITE, 2011).

A principal utilização do bioetanol no Brasil é como combustível e chega a representar 44% do total de gasolina consumida no país (BASSO et al., 2008). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), foi colhida na safra 2015/16 uma área de 9.004 milhões de hectares, com total de cana-de-açúcar moída de 665.586,2 milhões de toneladas, 40,4 % para produção de açúcar, com produção de etanol total em 30.461.524,5 bilhões de litros; sendo 22,5% de etanol anidro e 37,1% de etanol hidratado.

Devido as mudanças climáticas globais faz-se necessário o uso de medidas de responsabilidade entre os agentes públicos e privados visando evitar o agravamento das condições ambientais e conseqüentemente queda na produção e qualidade de vida da população, a agroindústria de cana-de-açúcar cumpre seu dever em contribuir efetivamente para proteção da água com a utilização de tecnologias voltadas para o aproveitamento hídrico de seus resíduos.

Para as várias etapas de transformação da cana-de-açúcar nas usinas necessita-se consumir uma grande quantidade de água, conceito este fomentado pelos valores de captação praticados no passado e que graças a técnicas de reúso da água vem diminuindo abruptamente nas últimas décadas. O consumo do recurso estimado em 1990 era de 5,6 m<sup>3</sup> por tonelada de cana-de-açúcar processada, já em 2005 esse consumo se mostrou em 1,8 m<sup>3</sup>, graças a inovações tecnológicas inseridas no mercado sucroalcooleiro (CARVALHO, 2010). A Secretaria do Meio

Ambiente, através do decreto SMA-88 de 19 de dezembro de 2008, determina que, para novas usinas e para as ampliações de usinas existentes, o consumo de água deva ser de 0,7 m<sup>3</sup> por tonelada de cana processada (SILVA et al., 2011).

A escassez para as fontes de captação tem feito as indústrias canavieiras refletirem sobre alternativas que possam suprir a demanda pelo recurso e garantir a segurança hídrica das mesmas. Neste contexto ações e inovações tecnológicas visando o reaproveitamento hídrico da vinhaça merece destaque, pelos grandes volumes gerados e possibilidades de aproveitamento da água pela etapa de evaporação. Sendo esta técnica substancial para a redução da captação nos corpos d'água podendo garantir a segurança hídrica da indústria canavieira.

## 2 JUSTIFICATIVA

Devido à escassez dos recursos hídricos tornou-se essencial a redução do consumo de água pelos setores produtivos, racionalizando principalmente a captação para fins agroindustriais. A agroindústria da cana de açúcar é uma grande consumidora deste recurso nas etapas do processo para a produção de açúcar e do etanol, sendo assim emerge a necessidade de medidas para minimizar a captação nos corpos d'água com o uso de novas tecnologias e principalmente pelo reúso.

Como alternativa para o reaproveitamento da água surgiram as plantas de evaporação de vinhaça, tecnologia esta que possibilita a utilização da água contida neste efluente. Foram muitos os problemas enfrentados com as plantas de concentração de vinhaça, inviabilizando por certo tempo o investimento, dentre os principais problemas pode-se citar: alto consumo energético, problemas de incrustação devido à grande quantidade de sólidos presentes na solução e que por sua vez ocasionavam paradas sucessivas para a limpeza.

Este trabalho possui como propósito estudar o processo de evaporação da vinhaça *in natura* e filtrada, em escala laboratorial, comparar os resultados físico-químicos encontrados, avaliar o consumo energético nas duas situações, realizar análises físico-químicas da água gerada pelo processo evaporativo e propor sua reutilização.



### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade do reúso da água a partir da vinhaça por processos físicos de concentração.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Filtrar a vinhaça e evaporá-la.
- b) Analisar as propriedades físico-químicas da água de reúso.
- c) Comparar o gasto energético para evaporar a vinhaça submetida a uma filtração simples com a vinhaça *in natura*.
- d) Propor uma utilização para a água de reúso.

## 4 REVISÃO DA LITERATURA

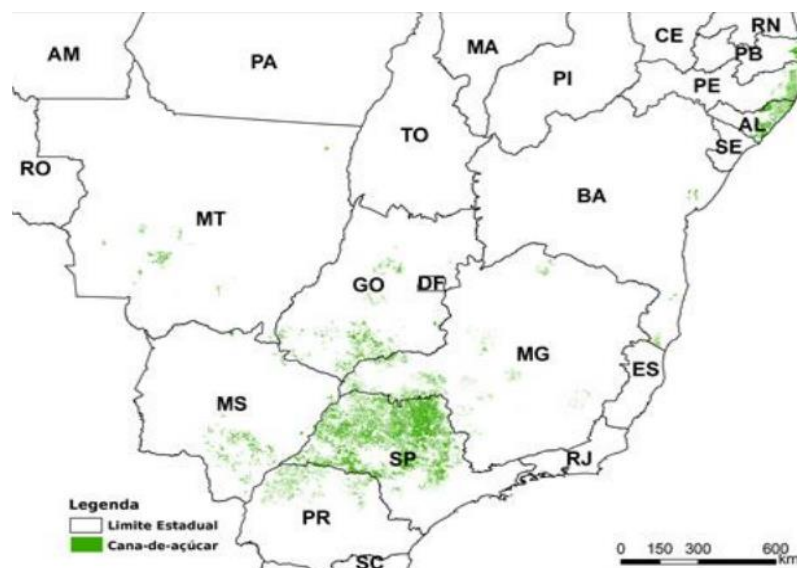
### 4.1 A CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL

No Brasil o plantio da cana-de-açúcar iniciou-se em São Vicente, em 1522, e depois em Pernambuco, em 1533. No século XVI a produção de cana-de-açúcar era 4,5 toneladas e no século seguinte elevava-se a 9 toneladas, alcançando acima de 300 milhões de libras e despertando a cobiça de outras nações (TAUK-TORNISIELO, 2001).

A cana-de-açúcar faz parte da história do Brasil, sendo um dos mais importantes produtos agrícolas do país, sendo cultivada desde a colonização. Do seu processo de industrialização obtêm-se como produtos o açúcar nas suas mais variadas formas e tipos e o álcool (anidro e hidratado) (AZANIA, 2003).

Atualmente as unidades industriais situam-se preferencialmente nas regiões favorecidas pelas melhores condições de solo, clima, logística e mercado consumidor, sobretudo no estado de São Paulo. Devido à escassez de áreas disponíveis para o plantio da cana juntamente com a elevação do preço exigido para este tipo de atividade fez com que os empreendimentos no setor migrassem para regiões menos tradicionais tais como, Triângulo Mineiro, Sul de Goiás e Mato Grosso do Sul, com destaque para o Triângulo Mineiro que foi a região com maior incremento neste tipo de atividade (SANTA CRUZ, 2011). A Figura 1 representa o zoneamento da cana de açúcar no Brasil.

**Figura 1**–Zoneamento da cana de açúcar no Brasil



Fonte: SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE, 2016

Dentre os principais produtos das agroindústrias de cana de açúcar tem-se o Álcool hidratado (AEHC), Álcool anidro (AEAC) e o açúcar nas suas mais variadas formas. Recentemente, as novas tecnologias, a busca constante de maiores eficiências energéticas e a melhor utilização das matérias primas e resíduos, fizeram surgir a “bioeletricidade”, que é produzida através da queima da biomassa da cana (PASSOS, 2009).

#### 4.2 PROCESSAMENTO DA CANA DE AÇÚCAR

Após o corte a cana é encaminhada para o setor industrial, onde serão gerados os produtos e os subprodutos do seu processamento. Transportada através de caminhões, a cana-de-açúcar inicia a primeira etapa industrial, denominada de pesagem. As análises das amostras de cana são feitas em relação aos teores de sacarose, e impurezas vegetais e minerais (MAGALHÃES, 2010).

Ainda segundo Magalhães, (2010) posteriormente a pesagem, a cana é descarregada nas mesas alimentadoras e encaminhada para moagem, onde são separados o caldo e o bagaço (biomassa) nesta etapa adiciona-se uma grande quantidade de água para melhor se lixiviar a sacarose.

Para Rein, (2007) não existe uma taxa mínima de embebição como ocorre em qualquer processo de extração sólido-líquido quanto maior a quantidade de líquido de extração é adicionada, maior é a extração.

Após a etapa de extração o caldo segue para a etapa denominada tratamento e o bagaço segue para a queima em caldeiras e posterior geração de vapor para suprir a demanda térmica das várias etapas do processo. Na etapa de tratamento do caldo, as impurezas orgânicas e minerais, ainda são encontradas no caldo, e essa etapa consiste em eliminá-las com o objetivo de obter um caldo claro, límpido e brilhante. A clarificação do caldo é constituída de três etapas: a sulfitação, seguido da calagem e o aquecimento. Para melhorar a clarificação, e eliminar os resíduos, como graxas e ceras vegetais, o caldo é submetido ao aquecimento na entrada de um decantador, feito através de trocadores de calor. A etapa do aquecimento do caldo seguido do resfriamento é de grande importância, pois permite que os microrganismos sejam eliminados. Atingindo a fase final, o caldo clarificado pode ser encaminhado para a produção do açúcar e do etanol (MAGALHÃES, 2010).

O caldo que segue para a produção de etanol é alimentado em biorreatores que possuem em seu interior microrganismos denominados de leveduras que são responsáveis por converter a sacarose em etanol, feito isto o mosto agora denominado de vinho segue para o processo de

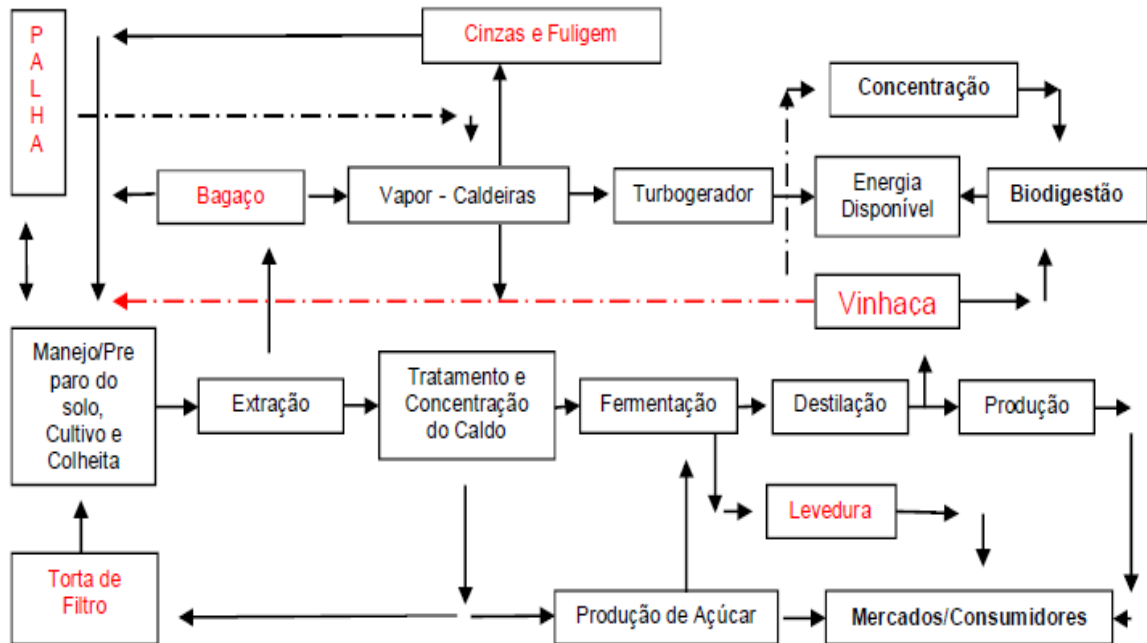
centrifugação onde ocorre a separação dessas leveduras do vinho. As leveduras voltaram a compor o processo fermentativo e o vinho segue para a então denominada destilação, onde o etanol é separado e concentrado e obtém-se como subproduto deste processo a vinhaça (CARVALHO, 2011).

#### 4.3 RESÍDUOS E SUBPRODUTOS DA FABRICAÇÃO DE ETANOL

A indústria sucroenergética assim como qualquer outro processo de industrialização gera resíduos. Desde que as usinas de etanol foram introduzidas no país nunca se deu tanta importância ao aproveitamento comercial destes resíduos, que se tornaram alternativas energéticas e financeiras para otimizar os ganhos. Entre os resíduos que mais têm ganhado esta relevância pode-se destacar: a vinhaça, o bagaço, a torta de filtro e a palha da cana (SANTA CRUZ, 2011).

A Figura 2 demonstra as fontes geradoras de resíduos e as etapas de possíveis reutilizações dos mesmos.

**Figura 2** - Organograma de geração e reúso de resíduos no setor sucroenergético.



Fonte - SANTA CRUZ, 2011.

O bagaço tem sua devida importância devida a sua utilização como combustível para queima em caldeiras e geração de vapor suprindo todo o processo e ainda tornando a unidade auto-suficiente em energia elétrica pois, este mesmo vapor aciona turbo geradores para a produção de energia elétrica, podendo o excedente ser vendido as concessionárias que distribuem a outros segmentos. A palha antes queimada no campo hoje pode potencializar a comercialização de energia uma vez trazida para a indústria e queimada nas caldeiras (DIAS, 2008).

Para Dias, (2008) assim como outros materiais lignocelulósicos o bagaço e a palha podem também produzir etanol por meio de processo de hidrólise.

A levedura pode ser desidratada e acrescentada em rações para alimentação de animais, a torta de filtros, cinzas e fuligem são acondicionadas por um tempo até decomponem a matéria orgânica e se transformarem em adubo tornando-se assim condicionadores do solo (SANTA CRUZ, 2011).

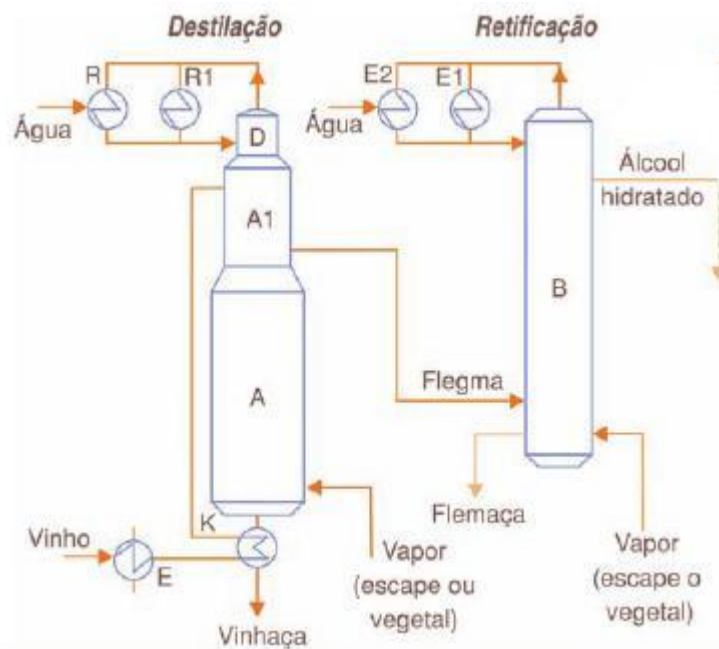
Como resíduo do processo de destilação do etanol a vinhaça merece destaque devido aos grandes volumes gerados. Há alguns anos ao destino final era os cursos d'água que devido ao seu potencial poluidor teve este fim proibido adotando-se a prática de irrigá-la em áreas de lavouras de cana recém cortadas porem é uma técnica dispendiosa e perigosa se não for bem aplicada pois, pode trazer prejuízos ao solo devido alterações no pH, saturação do solo em potássio e ainda lixiviação com conseqüente contaminação das águas subterrâneas mais superficiais (SILVA, 2012).

#### **4.3.1 Origem e caracterização da vinhaça**

A vinhaça é originada durante o processo de destilação do álcool e surge como produto de fundo da coluna "A". É um líquido de coloração marrom escura, natureza ácida e cheiro bem característico, tem em sua suspensão média 7% de sólidos onde 75% destes são orgânicos e biodegradáveis, possuindo alta Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO), dando origem ao seu grande potencial poluidor (PAULA, 2011).

A Figura 3 representa o sistema simplificado da destilação do etanol destacando a origem da vinhaça na coluna "A".

**Figura 3**– Esquema da destilação do etanol



Fonte – PAULA, 2011.

Segundo Paula, (2011) a estimativa de produção de vinhaça é de 10 a 15 litros para cada litro de etanol produzido, podendo ter sua quantidade variada dependendo da graduação alcoólica do vinho oriundo da fermentação, valores estes que estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1**- Teor alcoólico do vinho e produção de vinhaça.

Teor alcoólico do vinho °GL	Volume de vinhaça L/L etanol
10	8
9	9,11
8	10,5
7	12,29
6	13,65
5	16,65

Fonte – Adaptado de Paula, (2011).

Fernandes (2003), apresentou a quantidade gerada de vinhaça com uso da Equação 1 que segue:

$$V_{vinhaça} = (K1. (°GL\ vinho)^{-K2}). 0,816 \quad (1).$$

Onde:

K1 e K2 são constantes que dependem do tipo de aquecimento na base da coluna de destilação, ou seja, aquecimento direto o vapor de aquecimento entra em contato direto com o líquido; Aquecimento indireto quando se utiliza de aquecedores tipo casco tubo e então não existe contato direto do vapor de aquecimento com o líquido (CARVALHO, 2011).

Os valores das constantes são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** - Constantes K1 e K2

	Tipo de aquecimento	
	Indireto	Direto
<b>K<sub>1</sub></b>	119,19	130,36
<b>K<sub>2</sub></b>	1,0965	1,0518

Fonte – CARVALHO, (2011).

Considerando-se um teor alcóolico do vinho variando de 5% a 10% pode –se calcular a quantidade de vinhaça gerada. Os valores são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Volume de vinhaça pelo teor alcoólico do vinho.

°GL do vinho	Tipo de aquecimento	
	Indireto L de vinhaça/ L Etanol	Direto L vinhaça/ L Etanol
5	16,5	19,57
6	13,64	16,16
7	11,52	13,74
8	9,95	11,94
9	8,74	10,55
10	7,79	9,44

Fonte – CARVALHO, (2011).

Percebe-se que o aumento do teor alcóolico do vinho diminui a quantidade de vinhaça gerada, este efeito pode ser conseguido através de tecnologias com fermentações do mosto com altos teores de açúcares, o que atualmente é o grande desafio a ser enfrentado pelos fornecedores de levedura para a indústria sucroalcooleira.

Para Rein, (2007) a quantidade de vinhaça pode ser calculada fazendo-se um balanço de massa na coluna “A” de destilação admitindo alguns dados, conforme Equação 2.

**Balanço de massa:**

$$m_{vinho} + m_{vap} = m_{flegma} + m_{etanol\ 2a} + m_{vinhaça} \quad (2)$$

Dividindo-se pelo volume de etanol tem-se

$$\frac{m_{vinho}}{vol_{etanol}} + \frac{m_{vap}}{vol_{etanol}} = \frac{m_{flegma}}{vol_{etanol}} + \frac{m_{etanol\ 2a}}{vol_{etanol}} + \frac{m_{vinhaça}}{vol_{etanol}} \quad (2.1)$$

Onde:

$$tx_{vinhaça} = \frac{m_{vinhaça}}{vol_{etanol}}$$

$$\frac{m_{vinho}}{vol_{etanol}} = \frac{d_{vinho} \times {}^{\circ}GL_{etanol}}{{}^{\circ}GL_{vinho}} = \frac{1 \times 100}{8,5} = 11,76 \left[ kg_{vinho} / L_{etanol} \right]$$

$$\frac{m_{vap}}{vol_{etanol}} = Tx_{vapor-A}$$

$$\frac{m_{flegma}}{vol_{etanol}} = 2 \left[ kg_{flegma} / L_{etanol} \right]$$

$$\frac{m_{etanol\ 2a}}{vol_{etanol}} = 0,1 \left[ kg_{etanol\ 2a} / L_{etanol} \right]$$

$$tx_{vinhaça} = 11,76 + 2,5 - 2 - 0,1 = 12,2 \left[ kg_{vinhaça} / L_{etanol} \right]$$

**Em que:**

$Tx_{vinhaça}$  = taxa de produção de vinhaça kg/L etanol;

$V_{etanol}$  = volume de etanol produzido (L);

$m_{vinhaça}$  = massa de vinhaça (kg);

$m_{vinho}$  = massa de vinho (kg);

$m_{vapor}$  = massa de vapor na coluna A (kg);

$m_{flegma}$  = massa de flegma (kg);

$m_{etanol\ 2a}$  = massa de etanol de 2ª produzido na coluna "A" (kg);

$d_{vinho}$  = densidade do vinho = 1(kg/L);

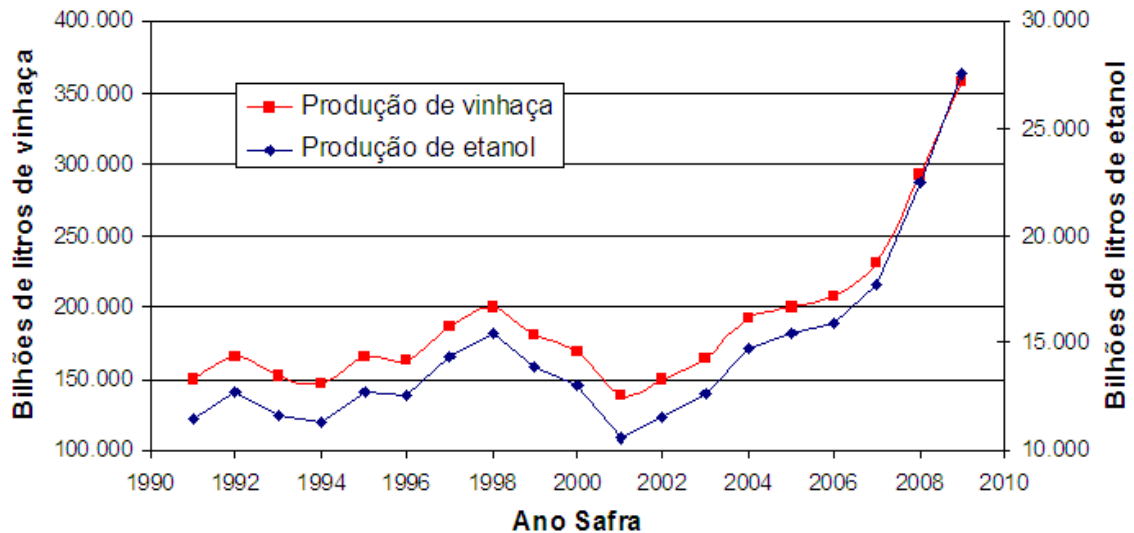
$Tx_{vapor-A}$  = uso de vapor na coluna "A", adotando 2,5kg/ m<sup>3</sup> de etanol;

${}^{\circ}GL_{vinho}$  = teor de etanol no vinho, adotando 8,5 °GL.



Carvalho, (2011) considerou a produção média de 13 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido, e apresentou em seu trabalho um gráfico da evolução da produção de etanol e geração de vinhaça, o qual estão representados na Figura 4

**Figura 4** – Evolução da produção de etanol e geração de vinhaça



Fonte – CARVALHO, (2011).

A vinhaça é considerada um adubo natural com nutrientes oriundos da cana-de-açúcar (potássio, nitrogênio, fósforo, etc.) porém possui características que lhe confere um alto poder poluente, devido às suas características, como baixo pH, elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e Demanda química de oxigênio (DQO) além de elevada temperatura na saída do destilador, podendo ser até cem vezes mais poluente que outros poluentes tais como o esgoto doméstico (SILVA; GRIEBELER; BORGES, 2007).

A DBO é a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar, a matéria orgânica composta por carbono, podendo ser uma indicação indireta, do carbono orgânico biodegradável (ANDRADE, 2012).

A vinhaça é constituída de 98% de água e 2% de sólidos dissolvidos) possibilitando o reúso da água contida na mesma, que é uma importante inovação tecnológica para a indústria canavieira (SOUZA et al., 2012).

Inúmeros fatores podem interferir na composição da vinhaça dentre os quais pode-se destacar, a composição da matéria prima, a composição do mosto, a condução da fermentação, as leveduras utilizadas na fermentação e até mesmo os equipamentos utilizados durante a destilação (PAULA, 2011).

A Tabela 4 apresenta uma caracterização geral da composição físico-química da vinhaça.

**Tabela 4 - Caracterização físico-química da vinhaça**

<b>Caracterização da vinhaça</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>
pH	3,5	4,15	4,9
Temperatura (°C)	65	89,16	110,5
DBO (mg/L)	6680	16949,8	75330
DQO (mg/L)	9200	28450	97400
Sólidos totais (ST) (mg/L)	10780	25154,6	388680
Sólidos suspensos totais (mg/L)	260	3967	9500
Sólidos suspensos fixos (mg/L)	40	294	1500
Sólidos suspensos voláteis (mg/L)	40	3632	9070
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	1509	18420	33680
Sólidos dissolvidos voláteis (mg/L)	588	6580	15000
Sólidos dissolvidos fixos (mg/L)	921	11872	24020
Cálcio (mg/l)	71	515,25	1096
Cloreto (mg/l)	489	12,18,91	2300
Cobre (mg/l)	0,5	1,2	3
Ferro (mg/l de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2	25,17	200
Fósforo total (mg/L)	18	60,41	188
Zinco (mg/L)	0,7	1,7	4,6
Magnésio (mg/L)	97	225,64	456
Manganês (mg/L)	1	4,82	12
Nitrogênio (mg/L)	90	356,63	885
Potássio total (mg/L)	814	2034,89	3852
Sódio (mg/L)	8	51,55	220
Sulfato (mg/L)	790	1537,66	2800
Etanol (% v/v)	0,09	0,1	1,19
Levedura (% v/v))	0,38	1,35	5

Fonte - Adaptado de Paula, (2010).

#### 4.3.2 Alternativas para o uso da vinhaça

Existem diferentes alternativas para tratamento e destinação da vinhaça, digestão anaeróbia e aeróbia, tratamento físico-químico, lagoas para estabilização, produção de metano e consequente produção de energia, concentração por osmose reversa ou com uso de evaporadores, concentração seguida de incineração, utilização como complemento na ração animal, reciclagem industrial e também a fertirrigação da vinhaça “*in natura*”, (CARVALHO, 2011).

#### 4.3.2.1 Legislação quanto ao uso da vinhaça.

Em virtude dos impactos gerados ao meio ambiente pelo descarte inadequado de resíduos agrícolas, em 1967, o Decreto Lei Federal nº 303 proibiu o lançamento e a poluição das águas superficiais por resíduos líquidos, sólidos ou de qualquer estado da matéria provenientes de atividades industriais, comerciais, agropecuárias, domiciliares e públicos. Posteriormente a Portaria GM nº 323, de 29 de novembro de 1978, proibiu, a partir da safra de 1979/1980, o lançamento, direto ou indireto, do vinhoto em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool instaladas ou que venham a se instalar no país (PINTO, 1999).

Assim, a legislação referente à vinhaça se aperfeiçoa e amplia-se gradativamente em busca de uma maior estabilidade ambiental.

Lei federal:

- Portaria do Ministério do Interior nº 158, de 03 de novembro de 1980 - Dispõe sobre o lançamento de vinhoto em coleções hídricas e sobre efluentes de destilarias e usinas de açúcar.
- Portaria do Ministério do Interior nº 323, de 29 de novembro de 1978 – Proíbe o lançamento de vinhoto em coleções de água.

#### 4.3.2.2 Fertirrigação *in natura* da vinhaça.

Segundo Santa Cruz, (2011) o uso da vinhaça *in natura* no solo supre os nutrientes que as plantas necessitam, podendo ainda aumentar a produtividade agrícola da cultura instalada. Entretanto o uso contínuo e descontrolado da vinhaça como fertilizante pode acarretar em prejuízos não podendo assim ser aplicada arbitrariamente em qualquer situação. Assim estabeleceu-se em 2006 a elaboração da normativa Técnica da CETESB P4.231, onde área a ser utilizada para a aplicação de vinhaça no solo deve atender determinadas condições tais como:

➤ **Segundo as restrições de aplicação:**

- Não estar contida no domínio das Áreas de Preservação Permanente (APP) ou de reserva legal, nem nos limites da zona de amortecimento definidos para as Unidades de Conservação de Proteção Integral.
- Não estar contida no domínio de área de proteção de poços.

- Não estar contida na área de domínio das ferrovias e rodovias federais ou estaduais.
- Estar afastada, no mínimo, 1000 metros dos núcleos populacionais compreendidos na área do perímetro urbano.
- Estar afastada, no mínimo, seis metros das APP's, e com proteção por terraços de segurança.
- A profundidade do nível d'água do aquífero livre, no momento de aplicação de vinhaça deve ser, no mínimo, de 1,50 m.
- A concentração máxima de potássio não poderá exceder 5% da CTC. Quando este limite for atingido, a aplicação ficará restrita à reposição desse nutriente em função da extração média pela cultura, que é de 185 kg de K<sub>2</sub>O por hectare por corte.

Segundo Kevin, (2009) no âmbito de minimizar os riscos maléficos causados pela aplicação indiscriminada da vinhaça nas lavouras de cana-de-açúcar, o que é uma pratica bastante tecnificada, e foi se difundindo paulatinamente ao ponto de ser batizada “fertirrigação” a CETESB, (2006) disciplinou a dosagem do efluente através de equação desenvolvida por especialistas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Prof. Nadir Almeida da Glória e Prof. José Luiz Loriatti Dêmatte). A Equação 3 foi desenvolvida levando-se em consideração o desenvolvimento radicular da planta e o nutriente de maior abundância presente na vinhaça, o Potássio.

$$Tx_{\text{aplicação}} = \frac{[(0,05 * CTC - K_{\text{solo}}) * 3744 + 185]}{K_{\text{vinhaça}}} \quad (3)$$

Onde:

$Tx_{\text{vinhaça}}$  = taxa de aplicação volumétrica da vinhaça m<sup>3</sup>/ha;

0,05 = 5% da CTC;

CTC = Capacidade de Troca Catiônica expressa em cmolc/dm<sup>3</sup> a pH 7, dada pela análise da fertilidade do solo;

$K_{\text{solo}}$  = quantidade de potássio do solo, expresso em cmolc/dm<sup>3</sup> a uma profundidade de 0 a 80 cm;

$3744$  = valor constante para transformar os resultados de análise de fertilidade para kg de potássio em volume de 1 hectare por 0,80 m de profundidade;

$185$  = massa em kg de  $K_2O$  extraído pela cultura por hectare, por corte;

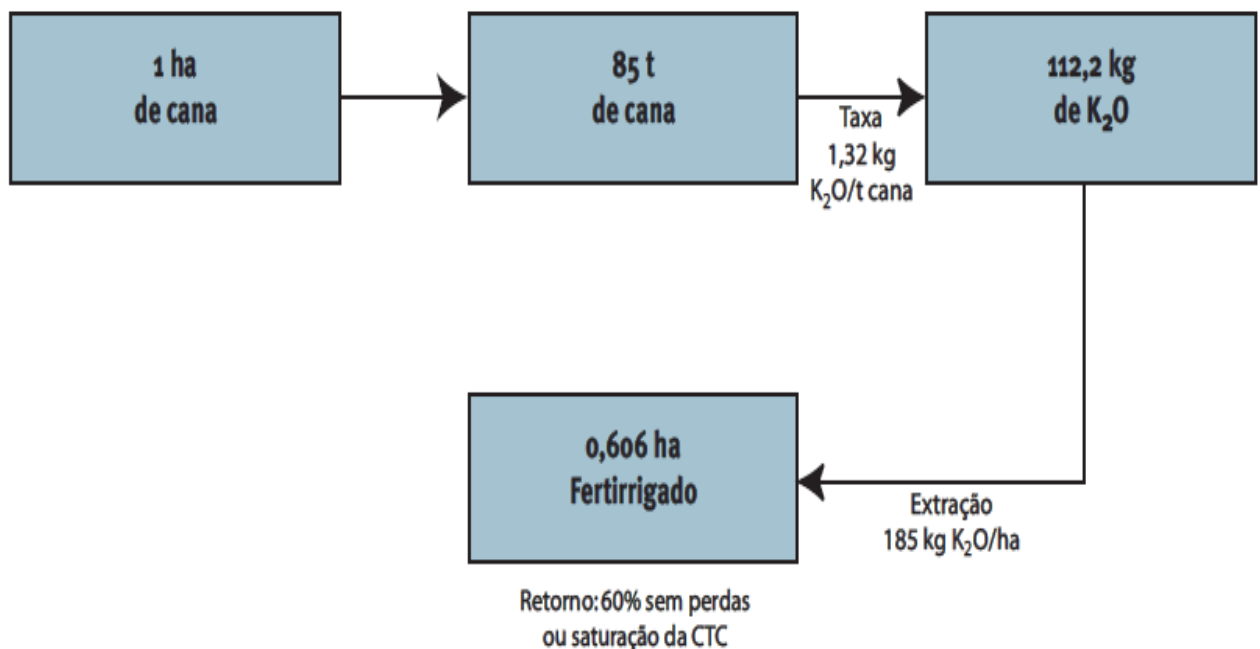
$K_{vinhaça}$  = concentração de potássio na vinhaça kg  $K_2O/m^3$ .

A dosagem da aplicação de vinhaça varia de acordo com 3 fatores:

1. Necessidade da planta;
2. Concentração de potássio disponível no solo;
3. Grau de saturação CTC que se pretende manter.

Segundo a CETESB, (2006) as dosagens a serem praticadas devem atender as necessidades nutricionais da planta em relação ao potássio o que é em torno de 185 kg de  $K_2O/ha$ , geralmente a vinhaça costuma variar de 1 a 3 kg de  $K_2O/m^3$  o que possibilita irrigar com taxas que variam de 100 a 300m<sup>3</sup>/há. Em um balanço médio são esperados na vinhaça de 1-1,6 kg de  $K_2O/ton.$  de cana processada podendo então estimar a área que poderá ser irrigada, como exemplificado na Figura 5.

**Figura 5** - Balanço teórico de  $K_2O$  e o potencial de área fertirrigada com vinhaça.



Fonte – AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, (2009).

Para ser fertirrigada a vinhaça recebe um tratamento visando diminuir a sua temperatura. Este tratamento ocorre em torres de resfriamento geralmente construídas em material não

corrosivo (fibra de vidro). O transporte da vinhaça até os canaviais pode ser feito de várias maneiras dentre elas se destacam a via caminhão, adutoras com uso de bombeamento e também por canais com o uso da gravidade (ANDRADE, 2012).

A Figura 6 mostra a aspersão da vinhaça em uma lavoura de cana-de-açúcar.

**Figura 6** - Aspersão da vinhaça em lavoura de cana-de-açúcar.



Fonte – SILVA, (2012).

#### 4.3.2.3 Biodigestão anaeróbia da vinhaça.

Este talvez seja atualmente o assunto mais discutido em trabalhos científicos, podendo esta técnica diminuir o potencial poluidor da vinhaça e ainda gerando um gás com valor agregado, pela possibilidade de geração de energia elétrica através de sua queima.

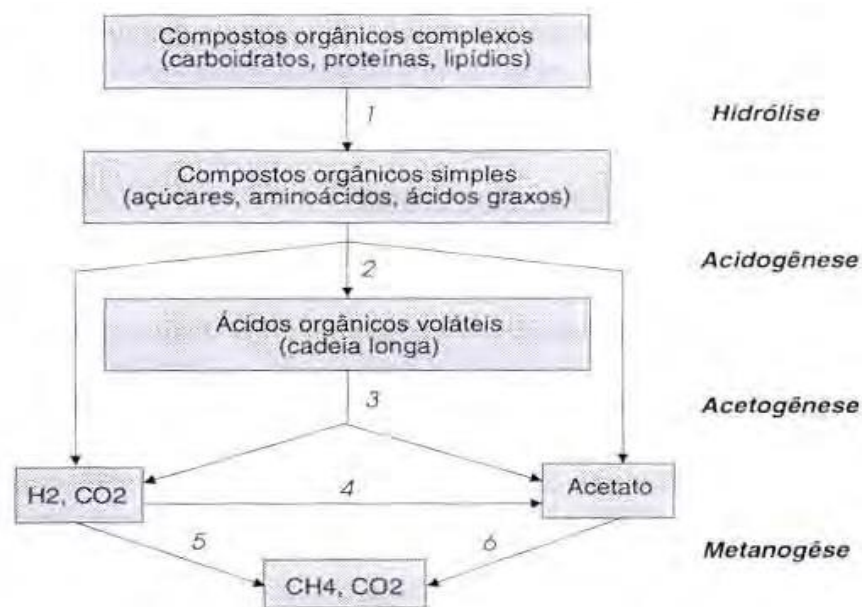
A biodigestão anaeróbia por si só e por mais eficiente que seja não consegue eliminar todo o potencial poluidor da vinhaça (redução de 80 a 90%) impossibilitando o seu lançamento em corpos d'água, necessitando então de outros tratamentos para este fim o que se torna financeiramente inviável (CETESB, 2006).

Santa Cruz, (2011) descreve a biodigestão anaeróbia como um processo de degradação bioquímica que se dá na presença de microrganismos (bactérias) onde desempenham função específica, obtendo como resultado a degradação da matéria orgânica com consequente formação de produto de valor econômico agregado, o biogás ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ).

O processo acontece em duas etapas distintas e dependentes, na primeira etapa bactérias fermentativas, mas que não produzem metano, atuam somente na quebra de polímeros orgânicos que depois são fermentados e incorporados em ácidos orgânicos, álcoois e  $\text{CO}_2$ . Em um segundo estágio estes produtos são transformados em metano e  $\text{CO}_2$  pela ação de bactérias acetogênicas e metanogênicas (SANTA CRUZ, 2011).

Carvalho, (2011) ilustra o processo bioquímico realizado por microrganismos específicos em quatro etapas, conforme Figura 7.

**Figura 7** – Sequências metabólicas e microrganismos envolvidos.



- 1,2: bactérias hidrolíticas fermentativas
- 3: bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio
- 4: bactérias acetogênicas consumidoras de hidrogênio
- 5: bactérias metanogênicas utilizadoras de hidrogênio
- 6: bactérias metanogênicas acetociásticas

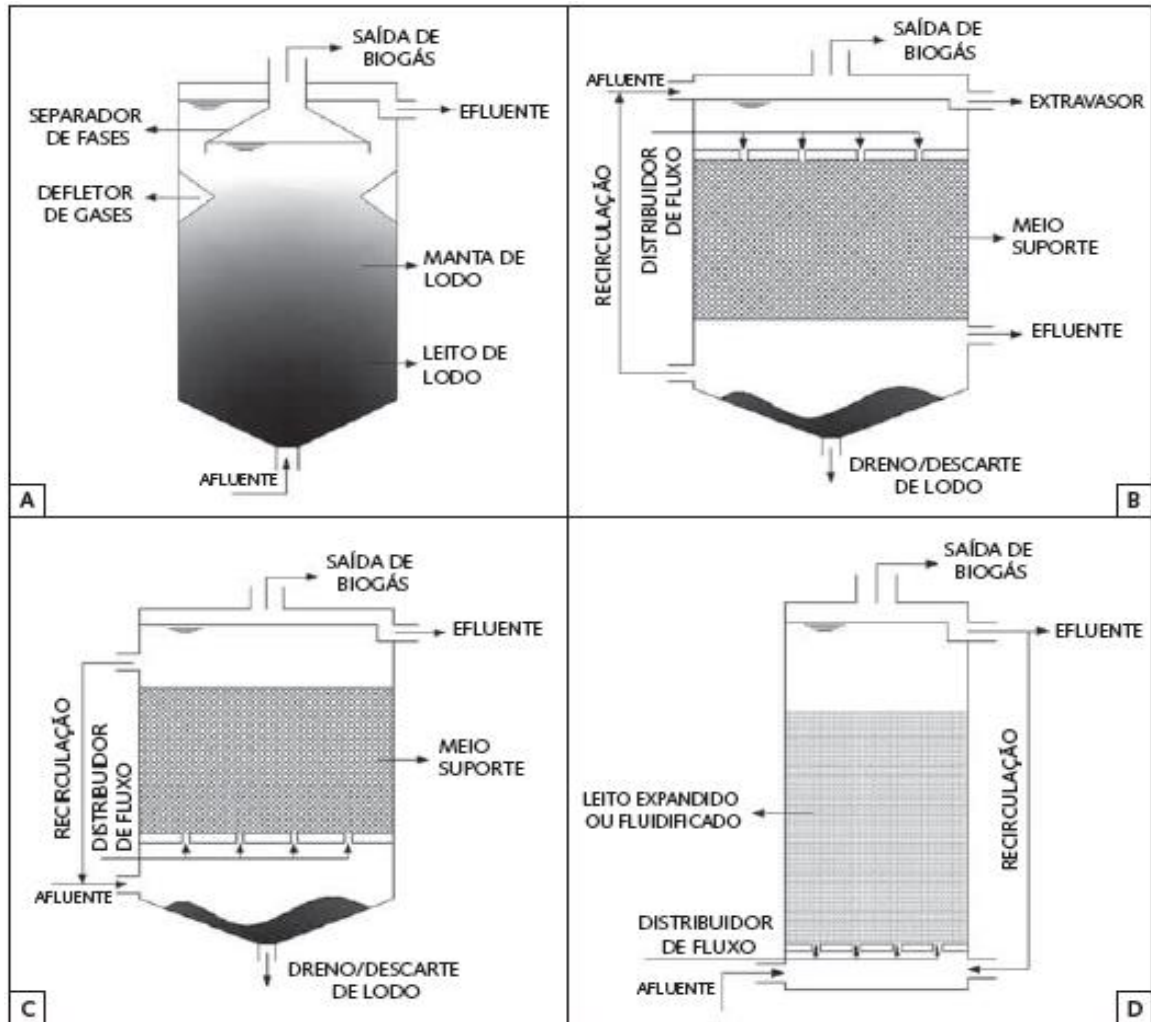
**Fonte** – Adaptado de Carvalho, (2011).

A presença de sulfetos na vinhaça tratada proporciona odores, que são efeitos indesejáveis e conferem ainda o caráter corrosivo, o mesmo efeito é percebido no biogás gerado, podendo comprometer a parte metálica de motores de combustão e de equipamentos usados em sua queima (FUESS, GARCIA, 2012).

Um dos principais obstáculos técnicos do processo de digestão anaeróbica da vinhaça foi o alto tempo de retenção, devido a baixa taxa de crescimento dos microrganismos. Estas dificuldades se mantiveram até desenvolvimento de processos de alta taxa utilizando reatores de alta eficiência geralmente os de fluxo ascendente (SANTA CRUZ, 2011).

A Figura 8 esquematiza alguns tipos de reatores de alta taxa.

**Figura 8-** Esquematização de reatores anaeróbios de alta taxa.



A – Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo;

B – Filtro anaeróbio de fluxo descendente;

C – Filtro anaeróbio de fluxo ascendente;

D – Reator anaeróbio de leito expandido ou fluidificado.

**Fonte** – Adaptado de Carvalho, (2011).

#### 4.3.2.4 Evaporação da vinhaça

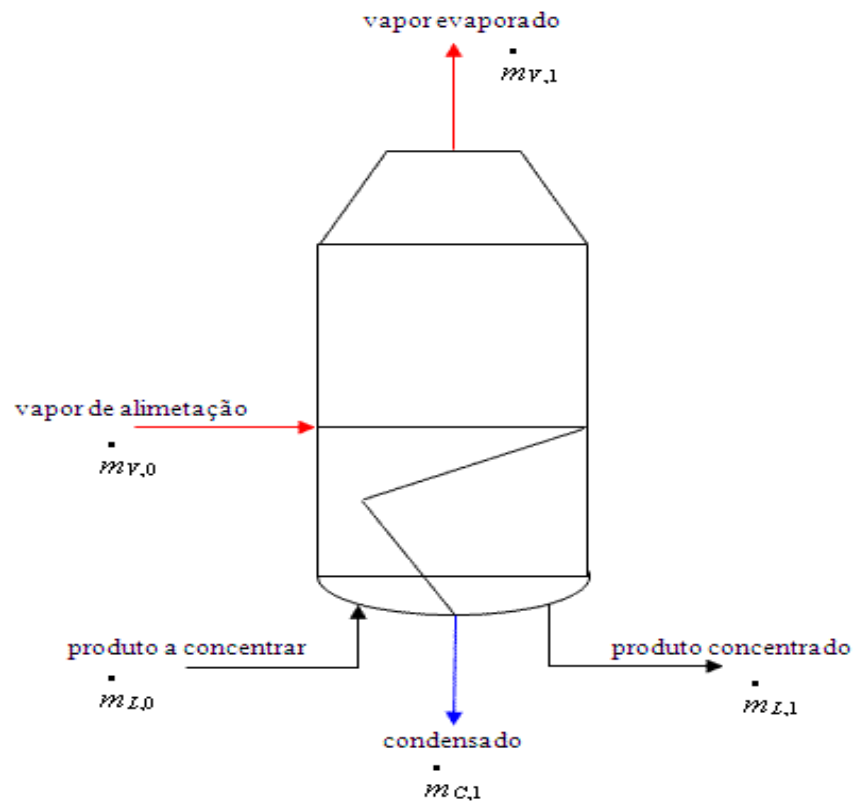
Segundo Carvalho, (2011) comenta que a técnica de evaporação é largamente utilizada pelas indústrias químicas e de processos com as mais distintas finalidades, desde se obter produtos mais concentrados ou suprir necessidades de se diminuir custos com o transporte, conforme descrito em seu trabalho. Na indústria sucroalcooleira o processo evaporativo do



caldo da cana é realizado para se concentrar os açúcares e mais recentemente para concentrar a vinhaça.

Como fonte de energia térmica para a evaporação nas usinas sucroalcooleiras utiliza-se o vapor proveniente das turbinas de geração de energia que, é saturado e com pressão de 1,5 kg/ cm<sup>2</sup> podendo ser chamado de vapor “vivo”. O vapor gerado pelo processo de evaporação é denominado de vapor vegetal, que possui baixa pressão em relação ao vapor vivo. Em si o evaporador consiste em uma superfície de aquecimento onde ocorrem as trocas térmicas e uma área de separação entre o concentrado e o vapor gerado como está ilustrado na Figura 9 (SILVA, 2012).

**Figura 9** - Esquema de um evaporador simples.



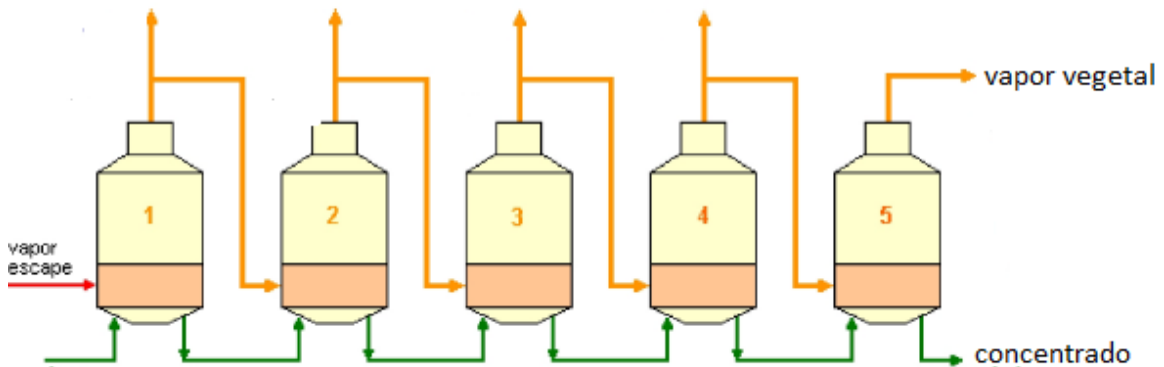
Fonte – CARVALHO, (2011).

Norbert Rillieux desenvolveu o sistema de evaporação de múltiplo efeito (Figura 10), nos anos de 1840, partindo de regras e princípios após estudar incansavelmente a indústria do açúcar e outras indústrias (REIN, 2007).

Carvalho, (2011) salienta que, quanto maior o número de efeitos maior será a economia de energia, permitindo que se forneça energia térmica apenas ao primeiro efeito para a etapa de

concentração. A economia térmica é dada pela razão da água evaporada e a quantidade de vapor fornecida ao sistema através do primeiro efeito, ao mesmo tempo este arranjo aumenta os custos fixos devido aos fatores termodinâmicos daí, somente através de um balanço econômico, pode-se quantificar o número de efeitos.

**Figura 10** - Esquema de evaporador de múltiplo efeito.



Fonte – Adaptado de Carvalho, (2011).

Na obra de Rein, (2007), os estudos sobre os coeficientes de transferência de calor em evaporadores se estenderam por vários anos, concluindo que os valores precisos para este coeficiente devido as dificuldades dos parâmetros dos processos e das variáveis.

Carvalho, (2011) afirma que o coeficiente de transferência de calor do líquido decresce do primeiro para o último efeito, devido ao aumento da viscosidade. Muitos autores tentaram correlacionar o valor do coeficiente com a viscosidade, concentração de sólidos e até mesmo diferenças de temperatura de ebulição, porém fracassaram mesmo com todas as variáveis se correlacionando.

Para Rein, (2007) a melhor fórmula para taxa de evaporação é a de Dessin (Equação 4) expressa em unidades inglesas (lb/ft<sup>2</sup>.h.°F), a qual leva todos estes efeitos em consideração.

$$\tau_{evaporação} = \frac{(100 - W_{Ds,s}) \times (T_{St} (^{\circ}F) - 130)}{18000} \quad (4)$$

Sendo:

$W_{Ds,s}$  = concentração mássica de sólidos na saída do evaporador;

$T_{St}$  = temperatura do vapor na calandra do evaporador.

Em unidades métricas (kg/h.m<sup>2</sup>.K) a equação pode ser escrita:

$$\tau_{evaporação} = 0,00089. (100 - W_{Ds,s}). (T_{St} - 54) \quad (5)$$

Convertendo a Equação 5 para coeficiente global de transferência de calor temos que multiplicar pela entalpia de vaporização assumida de 2300 kJ/kg.

$$U = 0,000567. (100 - W_{Ds,s}). (T_{St} - 54) \quad (6)$$

Sendo  $U$  o coeficiente global de transferência de calor expresso em kW/ (m<sup>2</sup>.K).

Percebendo que era muito improvável que os valores de  $U$  fossem linearmente relacionados à concentração de sólidos e a temperatura, Rein, (2007) apresentou outra equação para o cálculo do coeficiente global e transferência de calor.

$$U = a. (100 - W_{Ds})^b. T_v^c \quad (7)$$

Sendo:

a, b, c = constantes;

$W_{Ds,s}$  = concentração mássica dos sólidos na saída do evaporador;

$T_v$  = temperatura do vapor de alimentação.

Ainda segundo Rein, (2007) Guo em 1983 obteve uma equação semelhante à dele após estudos em laboratório, desprezando efeitos de perda de carga e considerando nível ótimo do líquido dentro dos tubos e temperatura de ebulição dos líquidos.

$$U = 0,16. (100 - W_{Ds})^{0,4}. T_L^{0,25} \quad (8)$$

Sendo:

$T_L$  = Temperatura de ebulição do líquido no interior do evaporador.

Rein, (2007) apresenta valores para os coeficientes globais de transferência de calor a serem usados em projetos de evaporadores de caldo, (Tabela 5) que foram por muito tempo utilizados na África do Sul.

**Tabela 5** - Valores dos coeficientes globais de transferência de calor

<b>Efeito</b>	<b>Evaporação com 4 efeitos (kW/m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>Evaporação com 5 efeitos (kW/m<sup>2</sup>.K)</b>
1º	2,5	2,5
2º	2,2	2,5
3º	1,7	2,0
4º	0,7	1,5
5º	-	0,7

Fonte – REIN, (2007).

Rein, (2007) constatou que as mudanças na temperatura e no °brix nos 3 primeiros efeitos eram pequenas quando comparadas ao último efeito, aplicando então uma correlação com a temperatura deste efeito, proposta por Smith e Taylor, (1981) (Equação 9).

$$U = 0,034 \cdot T_{VS,N} - 1,13 \quad (9)$$

Sendo:  $T_{VS,N}$  = temperatura do último efeito.

Finalmente em 2004 Jesus, utilizou uma expressão simplista, (Equação 10) para calcular o coeficiente global de transferência de calor na evaporação de caldo de cana.

$$U = 0,465 \cdot \frac{T_{caldo}}{Brix_{caldo}} \quad (10)$$

Sendo:

$U$  expresso em kW/m<sup>2</sup> °C;

$T_{caldo}$  = temperatura do caldo na saída do evaporador em °C;

$Brix_{caldo}$  = concentração de sólidos na saída do evaporador.

Carvalho, (2011) calculou os coeficientes globais de transferência de calor durante seus estudos em uma planta de evaporação de vinhaça, os resultados estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** - Coeficientes globais de transferência de calor (U) calculados para planta de evaporação de vinhaça

Equações para U	U, kW/m <sup>2</sup> .K				
	1º Efeito	2º Efeito	3º Efeito	4º Efeito	5º Efeito
(6) $U = 0,000567 \cdot (100 - WDS)(T_{St} - 54)$	3,20	2,12	1,92	1,51	1,10
(8) $U = 0,16 \cdot (100 - WDS)^{0,4} \cdot TL^{0,25}$	3,07	3,04	2,95	2,86	2,61
(9) $U = 0,034 \cdot T_{Vs,N} - 1,13$	-	-	-	-	0,98
(10) $U = 0,465 \cdot \frac{T_{caldo}}{Brix_{caldo}}$	8,11	6,52	4,73	3,18	1,53

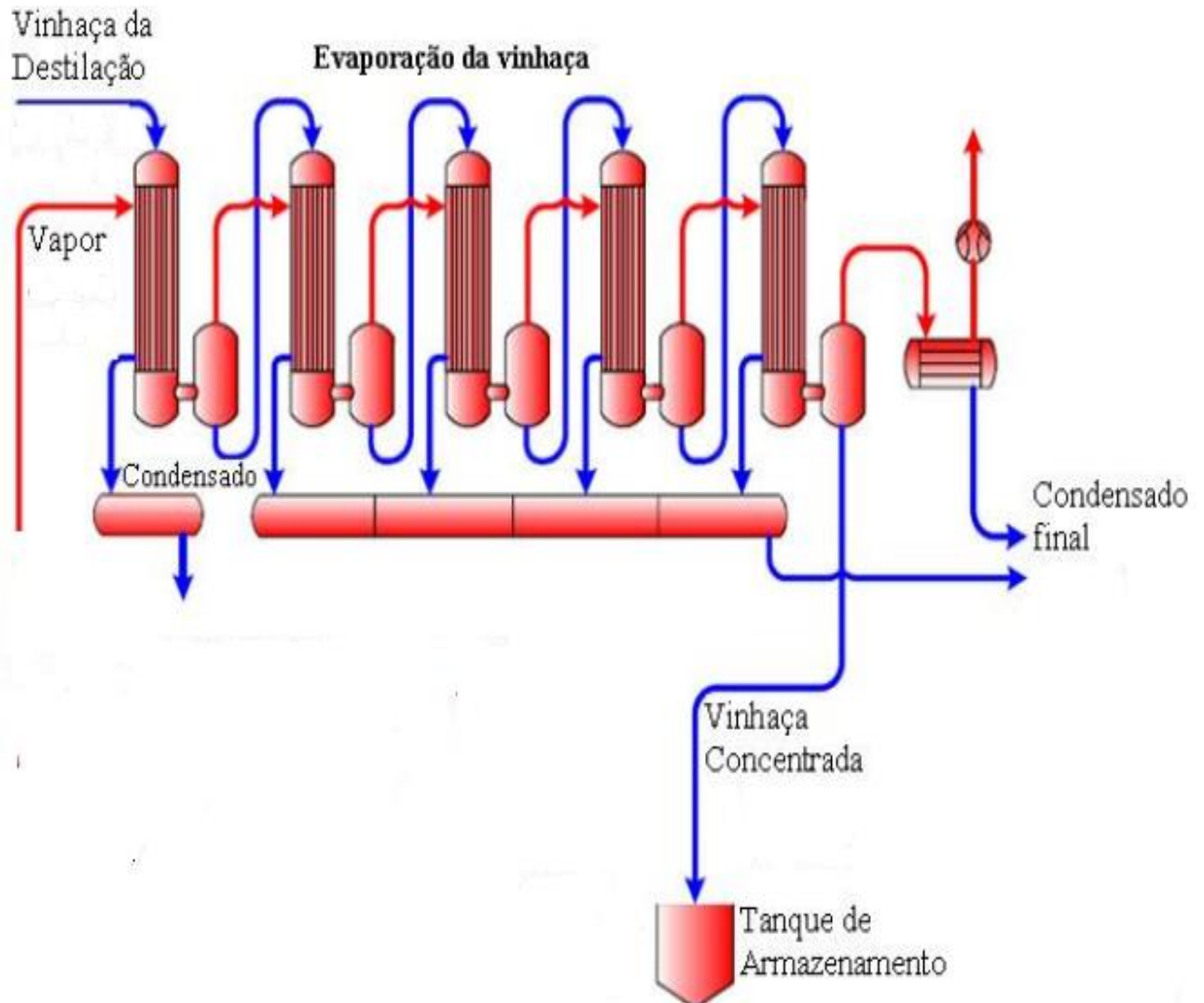
Fonte – Adaptado de Carvalho, (2011).

Carvalho, (2011) pôde observar que os valores encontrados pela Equação 8 resultam em evaporadores de maior área, tornando os valores apresentados por Rein, (2007) na Tabela 5 mais conservadores ainda. Ele observou ainda que os valores para apresentados pelas equações 7 e 8 do 1º ao 3º efeito se aproximam bastante dos valores apresentados por Smith e Taylor, 1983 (3,5 e 1,8 KW/m<sup>2</sup>.K). Sugere também que não se utilize a equação 10 pois, os valores encontrados se distanciam muito dos valores sugeridos por Rein, (2007) e Smith e Taylor, (1983).

O primeiro registro sobre evaporação de vinhaça data de 1954, onde então a empresa de origem austríaca denominada Vogelbush fabricou o primeiro equipamento para concentração da vinhaça. No Brasil em uma usina do estado de Pernambuco no ano de 1978 consta a instalação de um evaporador de vinhaça, porém foi desativado pouco tempo depois devido à imperfeições e problemas operacionais da planta. Com avanços nos estudos e aperfeiçoamento dos equipamentos, na mesma década na usina Santa Elisa no estado de São Paulo foi colocado em operação um equipamento fabricado pela empresa brasileira CONGER S.A, porém ainda apresentava alto gasto energético, em 1984 no mesmo estado a usina Cerradinho coloca em operação um equipamento capaz de concentrar vinhaça a 25 °Brix (SILVA, 2012).

A concentração da vinhaça (Figura 11) analisada pelo lado ambiental refere-se não somente para a redução do consumo de água captada pelas plantas industriais, mas também, para a racionalização do uso da vinhaça fertirrigada (menores quantidades) (SANTA CRUZ, 2011).

**Figura 11-** Esquema de uma planta de evaporação de vinhaça.



**Fonte** – Adaptado de Passos, 2009.

Para Silva, (2012) concentrar a vinhaça significa retirar água sem perder a sua constituição de sólidos, esta redução é em função da concentração do °Brix. A Tabela 7 demonstra a redução do percentual do volume em função da concentração e a equivalente relação vinhaça por litro de etanol.

A redução do volume de vinhaça por elevação do teor alcóolico do vinho também é uma alternativa, entretanto o desenvolvimento dos microrganismos fermentadores, capazes de suportar altos teores de açúcar, ainda não foram aprimorados relata Amorim, (2005).

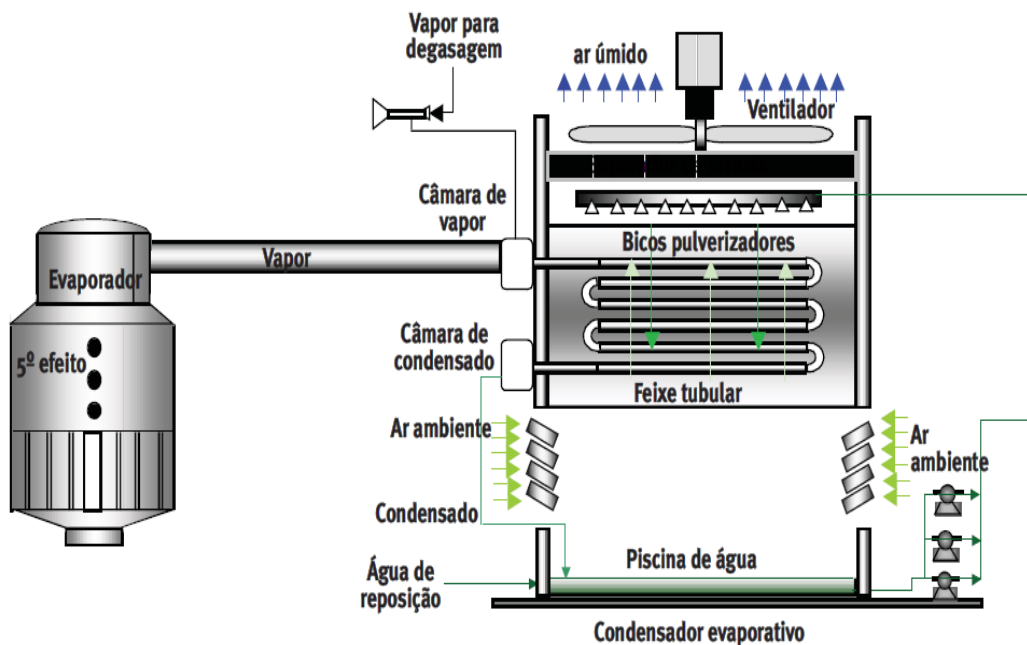
**Tabela 7** - Redução percentual de volume em função da concentração e equivalente relação vinhaça por litro de etanol.

Concentração (° Brix)	Relação vinhaça/etanol	Redução de volume (%)
3	13	0,0
5	7,8	40,0
10	3,9	70,0
15	2,6	80,0
20	1,95	85,0
25	1,56	88,0
30	1,30	90,0
60	0,65	95,0

Fonte - Adaptado de Silva, (2012).

Ao sistema de evaporação de múltiplos efeitos na evaporação da vinhaça é necessário instalar um equipamento denominado de “condensador evaporativo” possibilitando assim a condensação de todo vapor gerado pelo sistema. Este equipamento é de constituição simples composto por carcaça, bomba, tubos, borrifadores de água e entrada de vapor a ser condensado, conforme Figura 12 (CARVALHO, 2011).

**Figura 12** Esquema de um condensador evaporativo.



Fonte – Adaptado de carvalho, (2011).

A geração de águas condensadas pelo processo de evaporação (Figura 13) permite uma possibilidade de uso dessa água nas operações da usina de etanol levando-se em conta as

características quantitativas e qualitativas das correntes geradas, propõe-se então a sua utilização (RODRIGUES, et.al., 2013).

**Figura 13** - Água recuperada pelo processo de concentração de vinhaça.



Fonte – CARVALHO, (2011).

#### 4.4 A ÁGUA

A água é parte constituinte de todos os seres vivos, recurso natural essencial para a vida de nosso planeta. A água tem sua importância não somente no desenvolvimento das atividades biológicas humanas, mas também às atividades para produção de alimentos e bens de consumo. Apesar da superfície terrestre ser coberta por 70% de água, a ONU, concluiu que 1,8 bilhões de pessoas deverão sofrer com escassez de água em meados de 2025 (ELIA NETO, et.al 2009).

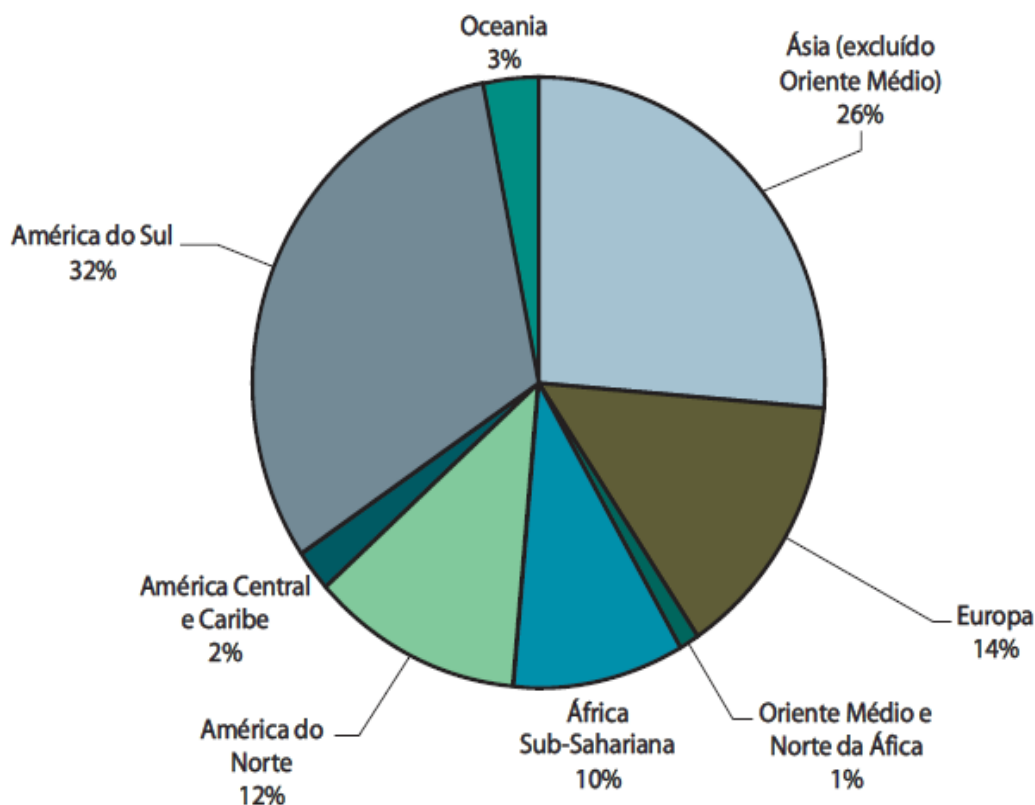
Ainda para Elia Neto, (2009) a água é um recurso natural finito, significando que há uma quantidade fixa de água, atualmente mensurada 1,42 bilhões km<sup>3</sup>, sendo 97% de água salgada, 2,5% indisponível nas geleiras e profundezas do solo, restando então a menor parcela de água doce utilizável.

A água é tema de interesse mundial, pois somente através deste recurso pode-se garantir a manutenção da vida no planeta, e o que ocorre é a sua crescente escassez. Por ser um recurso natural, renovável através dos processos físicos do ciclo hidrológico, chegou-se a pensar que esse recurso seria inesgotável, no entanto atualmente se verifica que a sua distribuição no planeta não é uniforme e está ligado a condições climáticas de cada região, podendo ainda ter



sua disponibilidade afetada por atividades humanas gerando assim poluição e escassez (RIBEIRO, 2011). A distribuição dos recursos hídricos renováveis no mundo está representada conforme Figura 14.

**Figura 14**– Distribuição da água no mundo.



Fonte – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, (2009).

#### 4.4.1 A água no Brasil

As características climáticas e condições geomorfológicas do Brasil, faz com que o país possua índices pluviométricos variando de 1000 a 3000 milímetros nas zonas intertropicais com predominância de climas quentes e úmidos, a grande exceção é o sertão Nordestino o qual ocupa 10% do território nacional. O Brasil tem como característica uma extensa rede pluvial fazendo com que o mesmo detenha de 12 a 15% da água do planeta (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2009).

O fato do Brasil possuir uma extensa rede hídrica e abundância em suas águas superficiais não significa que este recurso natural está bem distribuído pelo seu território, conforme esta apresentado na Figura 15.

**Figura 15-** Distribuição dos recursos hídricos, da população e do território brasileiro.



Fonte – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, (2009).

Fomentado pela aparente abundância de água o Brasil sustenta a cultura do desperdício deste recurso precioso e cada vez mais escasso. Nenhum dos estados da federação apresenta disponibilidade inferior que 1000 m<sup>3</sup> anuais por habitante com exceção do sertão pelas irregularidades climáticas

#### 4.4.2 Legislação brasileira quanto ao uso da água

No âmbito federal a constituição brasileira de 5 de outubro de 1988, descreve que é de competência da união instituir o sistema de gerenciamento de recursos hídricos bem como definir os critérios de outorga para o uso. A lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997 regulamenta o inciso da constituição e institui então a Política Nacional de Recursos Hídricos-PNRH, quando surge então o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos (ELIA NETO, 2009).

Ainda para Elia neto, (2009) a política nacional de recursos hídricos foi criada baseando-se nos princípios e fundamentos de que a água é um bem público, recurso natural limitado,

possui valor econômico, que seu uso deve ser prioritário para o consumo humano e de animais em situações de escassez, a gestão de recursos hídricos deve sempre priorizar o múltiplo uso, que as bacias hidrográficas devem ser os locais de implementação da PNRH onde sempre deverá atuar o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos sendo descentralizado e com participação do poder público, comunidade e usuários.

Dentre os principais objetivos da PNRH podemos destacar a disponibilidade de água para a atual e futuras gerações em padrões adequados de qualidade, bem como o uso racional e integrado onde inclui-se também o transporte hidroviário. (ELIA NETO, 2009).

Para Ribeiro, (2011) o PNRH possui instrumentos que se relacionam entre si e podem ser destacados como:

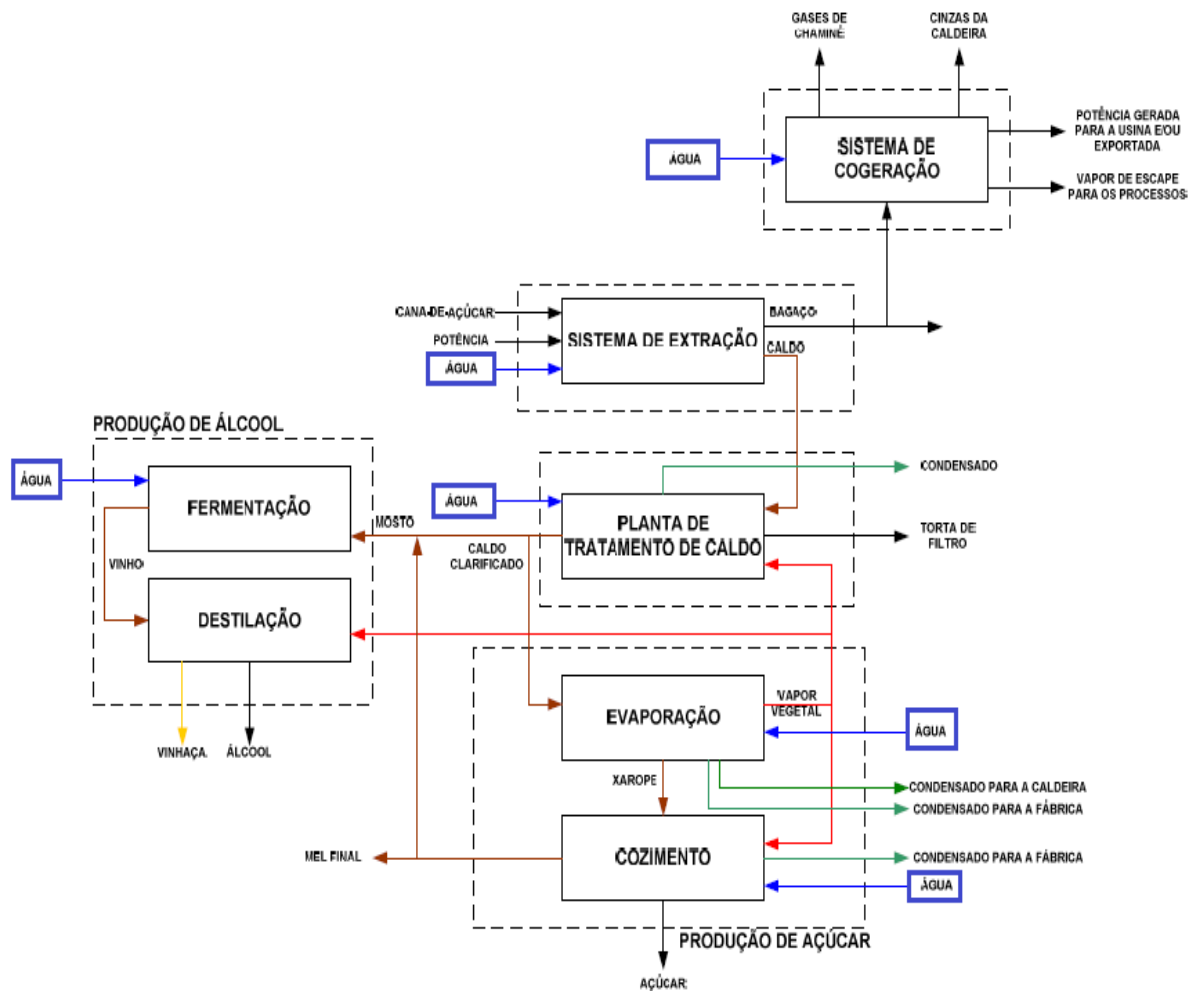
- Planos de recursos hídricos: é o resultado das discussões e definições acordadas socialmente pelas partes representadas pelo poder público, usuários e população, com vistas ao futuro das águas e do meio ambiente.
- Classes de corpos d'água: corresponde ao estabelecimento de objetivos de qualidade a serem alcançados através de metas da qualidade da água, propõe que o corpo adquira ou mantenha um nível de qualidade (classe) em determinado período, de acordo com os usos a que se destina.
- Outorga de direito de uso: criada com o objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e garantindo o direito de acesso à água. É um ato administrativo pelo qual a autoridade outorgante concede ao outorgado o direito de uso do recurso hídrico, determinando prazo. A outorga não representa alienação (venda) das águas, uma vez que são inalienáveis
- Cobrança pelo uso: não é imposto ou taxa, constitui-se como uma retribuição que o usuário faz à sociedade por utilizar o recurso que é de uso comum. No Brasil atualmente, são pagos somente os serviços de tratamento e captação e não pela utilização.
- Sistema de informação sobre recursos hídricos: constitui-se em um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre os recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão.

#### **4.4.3 Água e o setor sucroalcooleiro**

Assim como todo processo de produção industrial o processo de produção sucroalcooleira também faz uso da água, conforme a Figura 16. O balanço hídrico é o início de

um processo ou projeto que vise minimizar o uso e maximizar o reúso da água na indústria, identificando os pontos de intervenção para redução da captação deste recurso natural. As formas de ação podem variar desde o tipo de equipamento, condução do processo ou simplesmente implantando uma nova cultura na empresa e seus funcionários, (Produção mais Limpa, P+L), (ELIA NETO, 2009).

**Figura 16** - Entradas de água no processo de etanol e açúcar.

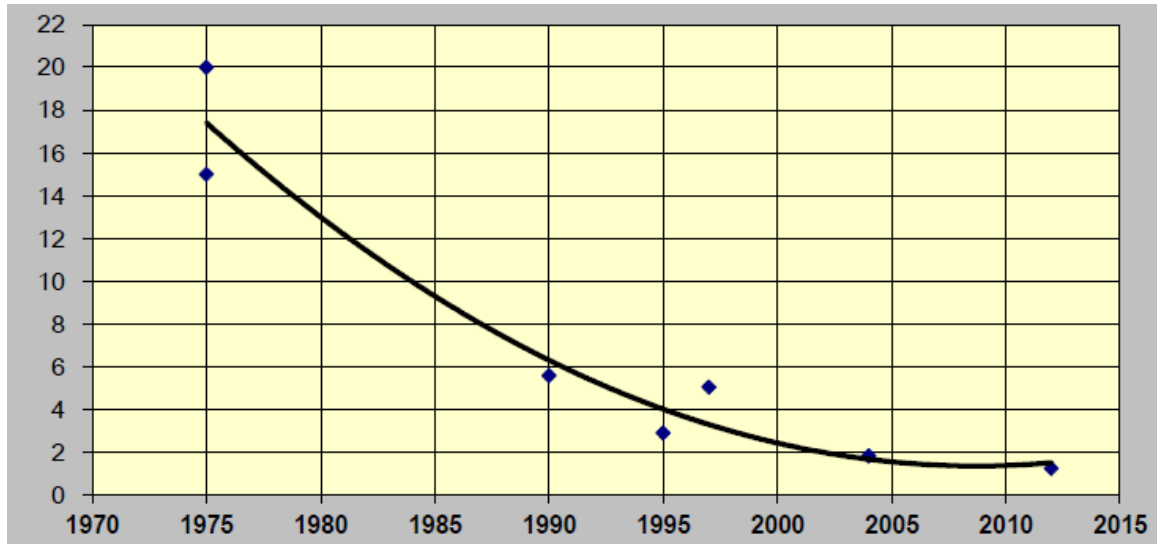


Fonte – Adaptado de Pellegrini, (2009).

Tradicionalmente rotulou-se a indústria canieira como grande consumidora de água. A quantidade requerida depende dos *layouts*, da tecnologia dos equipamentos e das operações unitárias sendo a captação do recurso natural relativo à capacidade de processamento da cana-de-açúcar nas unidades fabris (SILVA, 2011).

Na Figura 17 observa-se a tendência da taxa captação de água decresce com o passar dos anos, isso se deve principalmente às inovações tecnológicas implantadas no setor, (ELIA NETO, 2009).

**Figura 17** - Curva de tendência de captação de água na indústria sucroalcooleira ( $\text{m}^3/\text{t.cana}$ ).



Fonte - Adaptado de Elia Neto, (2009).

Muitos autores relatam em seus trabalhos a preocupação com o alto consumo de água para a produção de etanol, o que poderia gerar um conflito social sobre o seu uso, onde é retirada de rios, lagos e subterrâneo para consumo das usinas de cana-de-açúcar.

Segundo Rodrigues et.al, (2013) notoriamente métodos e técnicas sistemáticas para redução do consumo deste recurso natural pela indústria têm normalmente tomado duas abordagens diferentes:

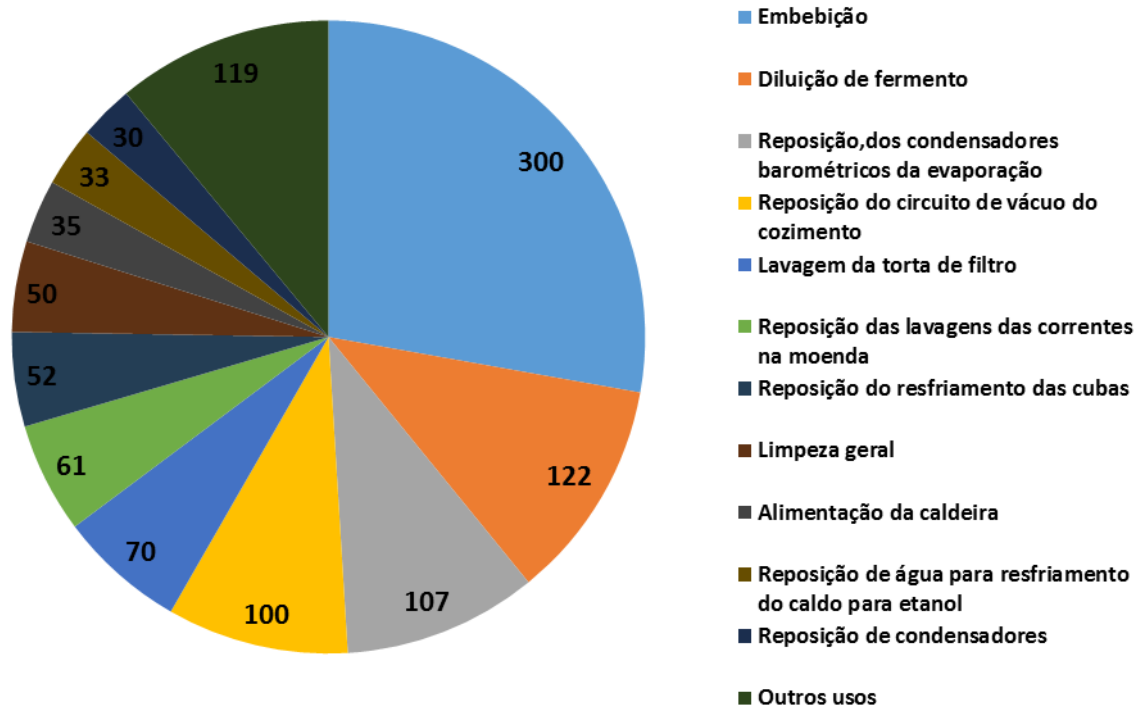
1. Waterpinch: a tecnologia busca identificar as possibilidades de reúso (reciclo) durante o processo produtivo, identificando possíveis reduções no volume no efluente gerado ou reduzindo a carga de contaminantes.
2. Métodos baseados em otimização matemática.

Contudo o grande número de parâmetros necessários para caracterizar os efluentes da indústria sucroalcooleira torna ambas abordagens muito difíceis de serem executadas.

Em estudo recente Rodrigues et al, (2013) demonstrou em seu trabalho de simulação de um processo produtivo de açúcar e etanol a distribuição da demanda de água conforme Figura 18, onde pode-se perceber claramente que nas operações que ocorrem para a produção de açúcar e ou etanol a que mais consome água é a etapa de embebição que ocorre na extração do caldo

pois, utiliza-se um grande volume (300 kg/t.cana), para ajudar a lixiviar a sacarose contida nas células dos colmos de cana-de-açúcar.

**Figura 18** - Distribuição da demanda de água na usina sucroalcooleira. (kg/t cana)



Fonte: Adaptado de Rodrigues et al, (2013).

#### 4.4.4 Reúso da água

Segundo a OMS (Organização Mundial de Saúde), (2003) a definição de reúso da água se dá de três formas, tendo como objetivo a redução no consumo de água e controle de efluentes:

1. Reúso indireto: ocorre quando a água já utilizada uma ou mais vezes no uso industrial ou doméstico é descarregada em águas superficiais e usadas a jusante;
2. Reúso direto: Uso planejado de esgoto tratado com finalidades de uso industrial, irrigação ou recarga de aquíferos;
3. Reciclagem interna: Reúso planejado utilizado internamente às instalações industriais,

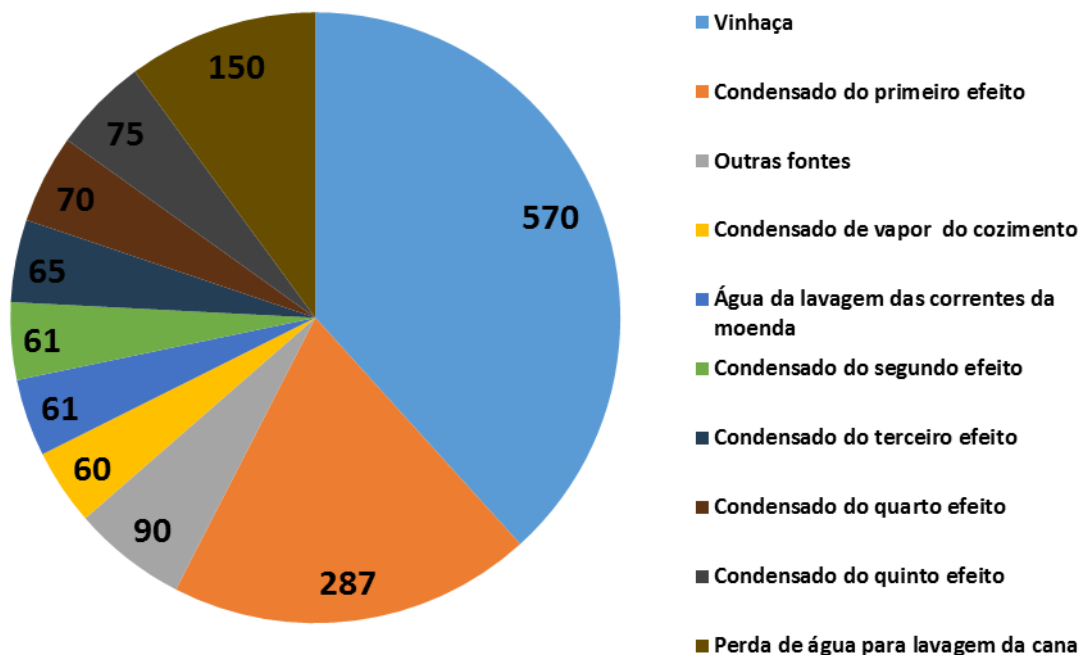
Os benefícios proporcionados pelo reúso da água estão contidos no âmbito social, ambiental e econômico.

Atualmente existe uma grande preocupação em preservar este recurso natural essencial para a sobrevivência de todo um ecossistema e a humanidade, através da qual pôde gerar riqueza e saúde para todos que a usufruem ao longo das bacias hidrográficas, porém em contrapartida

este recurso pode se tornar uma importante via de disseminação de doenças pelo seu mal-uso. A água é um recurso natural finito podendo ser fronteira para o de desenvolvimento econômico, social, e em especial de produção para as usinas (SILVA, et al., 2011).

O potencial de reúso das correntes de água na usina estão ilustradas na Figura 19. Essas correntes dependendo do local de reúso poderiam sofrer algum tipo de tratamento físico ou químico atendendo assim as necessidades qualitativas. Apesar de ser a maior corrente hídrica da usina, o estudo proposto por Rodrigues, et al., (2013) não considerou a vinhaça, pois, a utilização direta deste recurso hídrico se torna difícil devido a sua grande carga de sólidos em suspensão, alta DBO e baixo pH.

**Figura 19** - Relação de água para potencial reutilização (kg/t cana).



**Fonte:** Adaptado de Rodrigues et al, (2013).

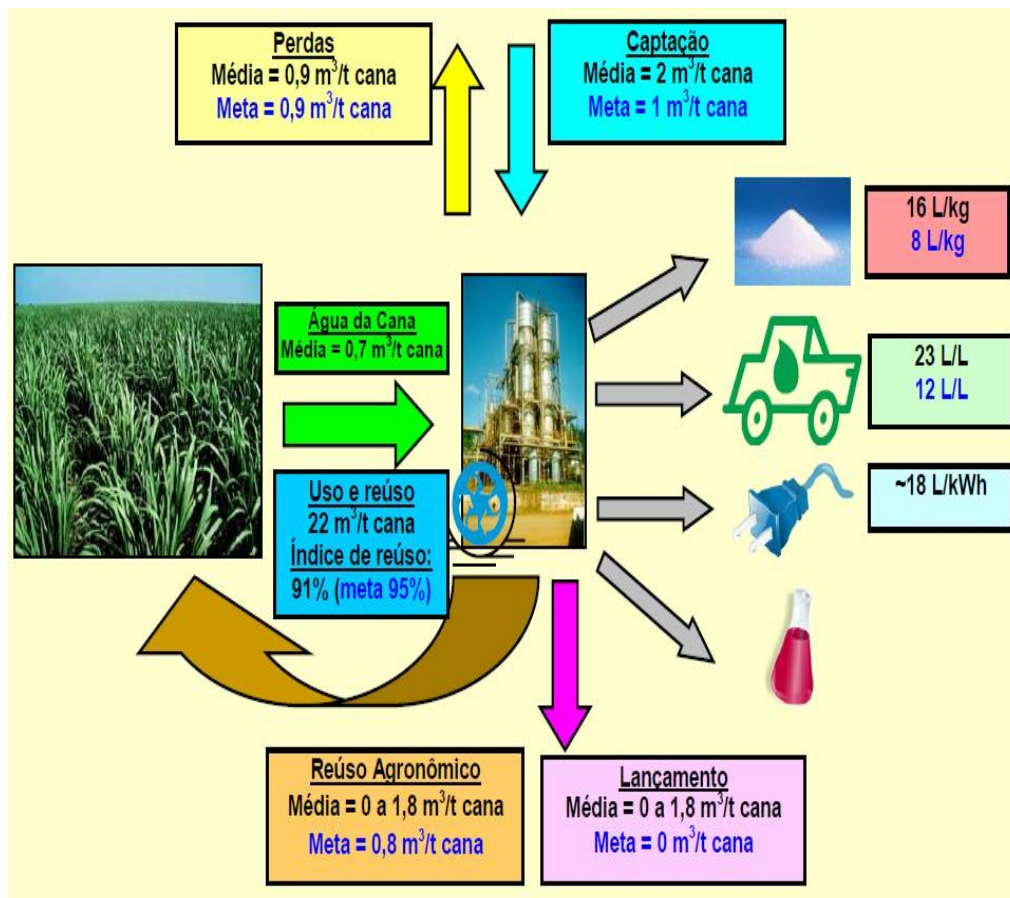
Normalmente para os projetos de reúso da água na indústria são necessários alguns tipos de tratamento afim de atender as várias etapas do processo dentre os quais pode-se destacar: O abrandamento (remoção de cálcio e magnésio), desmineralização (ânions e cátions), filtração (particulados) e osmose reversa (remoção de íons) (RODRIGUES ET AL. 2013).

O setor sucroalcooleiro busca cada vez mais reutilizar a água, proporcionando menores pressões sobre os recursos hídricos, despontando com as inovações tecnológicas, atingindo patamares de captação de água capazes de conseguir certificações ambientais, o “BONSUCRO” é uma certificação a qual estabelece limites de captação para produção de açúcar (20 kg H<sub>2</sub>O/

kg açúcar) e etanol (37,5 L/L.etanol), o que equivale de 2 a 3,2m<sup>3</sup> de água captada por tonelada de cana processada. (CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013).

A Figura 20 representa um balanço médio global de água em uma indústria sucroalcooleira, considerando 50% do processamento de cana de açúcar para produção de açúcar e 50% para etanol e suas respectivas metas. Neste balanço é perceptível que o reúso da água chega a atingir uma taxa de 95% (ELIA NETO, et.al. 2009).

**Figura 20** - Balanço global de água na usina sucroalcooleira.



Fonte – ELIA NETO, et.al, (2009).



## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

A abordagem da pesquisa é quantitativa. A parte experimental foi desenvolvida em laboratório, envolvendo observação e aplicação de técnicas analíticas, análises de pH, porcentagem de sólidos solúveis, grau Brix (°Brix), e condutividade foram realizadas no laboratório da usina logo após a coleta; os ensaios de evaporação e análises da água de reúso foram realizados no Laboratório de Análises Físico-Químicas do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) em Uberaba-MG. A metodologia dessas análises e os equipamentos empregados serão descritos nos tópicos a seguir.

As análises do °Brix após o processo de evaporação também foram realizadas no laboratório da usina. Todas as análises foram realizadas em triplicatas.

### 5.1 COLETA DAS AMOSTRAS

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando amostras de vinhaça coletadas na destilaria de uma usina de açúcar e etanol, localizada no município de Uberaba – MG. Foram coletadas por amostra aproximadamente três (3) litros de vinhaça (de uma só vez), entre os meses de outubro e novembro de 2016 (em semanas distintas). As coletas foram realizadas em quadruplicatas.

Logo as amostras foram armazenadas em frascos plásticos, colocado em caixa térmica a 4°C e transportado para o local de realização das análises físico-químicas e ensaio de evaporação.

### 5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA VINHAÇA

#### 5.2.1 Massa específica

A massa específica da vinhaça é um parâmetro importante a ser analisado, já que valores elevados indicam uma maior quantidade de matéria orgânica e/ou inorgânica em sua composição. Essa análise foi realizada pelo método da picnometria.

Para garantir que os valores encontrados fossem adequados, fez-se uma calibração no picnômetro, determinando seu volume real. Esse volume foi determinado utilizando água

destilada, já que é um líquido e possui a densidade conhecida em várias temperaturas, em posse de sua massa, foi determinado o volume real do picnômetro, pela Equação 11.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (11)$$

Sendo:

$\rho$  = massa específica (kg/m<sup>3</sup>);

m = massa (kg);

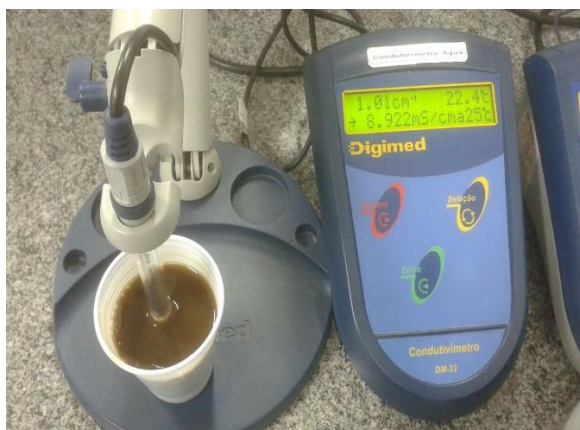
V = volume (m<sup>3</sup>).

Após quantificar-se o volume real do picnômetro, determinou-se a densidade da vinhaça de forma semelhante ao procedimento realizado no processo de calibração, em que a massa foi determinada pela diferença da massa do picnômetro com vinhaça e a massa do picnômetro vazio. A medição da densidade da vinhaça ocorreu em condições ambientes.

### 5.2.2 Condutividade

A condutividade das amostras de vinhaça foi mensurada utilizando o condutivímetro digital de bancada, marca DIGIMED modelo DM-22, (Figura21). A célula de condutividade foi lavada com água destilada e seca com papel macio e absorvente. Primeiramente, calibrou-se o aparelho, em seguida efetuou-se a leitura da condutividade da amostra. Vale destacar que a condutividade elétrica foi expressa em  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sendo diretamente proporcional a quantidade de íons livres, eletrólitos, existentes na composição química da vinhaça.

**Figura 21-** Condutivímetro de bancada.



Fonte – Do autor, (2017).

### 5.2.3 pH

Os valores de pH das amostras de vinhaça foram determinados utilizando pHmetro de bancada digital, marca DIGIMED modelo DM-22(Figura 22). A leitura da amostra feita ao imergir os eletrodos limpos e secos na devida amostra, deixando-se equilibrar por aproximadamente um minuto, sempre mantendo a amostra sob agitação suave para garantir sua homogeneidade. Os valores foram anotados com 1 casa decimal.

**Figura 22** - pHmetro de bancada.



Fonte – Do autor, (2017).

### 5.2.4 Leitura do °Brix

A escala de foi criada por Adolf F. Brix, sendo o grau Brix a quantidade de sólidos solúveis em produtos líquidos, tais como, caldo de cana, melado, melado, xarope de frutas. Uma unidade de brix corresponde a 1g de sólidos solúveis em suspensão em 100 g de solução (% m/m ou % m/v) à uma determinada temperatura. Entretanto, como este não é um método específico, o brix também pode determinar outros tipos de sólidos que possam estar solúveis que é o caso da vinhaça. (CARVALHO, 2011).

Neste trabalho a leitura do °brix foi realizada por um refratômetro digital marca Anton Paar modelo Abemat 200, conforme Figura 23 de propriedade da usina em questão.

**Figura 23** - Refratômetro digital.



Fonte – Do Autor, (2017)

### 5.2.5 Sólidos

Por definição segundo norma técnica da SABESP, (1999) sólido é o estado da matéria caracterizado pela rigidez, por uma forma própria e pela existência de um equilíbrio com o líquido proveniente de uma fusão. Assim, podemos definir que toda substância que permaneça com as características acima na vinhaça, mesmo após operações de secagem e calcinação, pode ser denominada sólidos.

As réplicas do experimento de análise dos sólidos em suspensão e dissolvidos ocorreram com filtração e evaporação de aproximadamente 140 mL de amostra de vinhaça em um cadinho previamente seco a uma temperatura de 103 a 105°C e pesado, até sua massa permanecer constante.

A amostra de vinhaça foi filtrada à vácuo em filtro seco e pesado previamente, com poro de diâmetro  $\leq 1,2 \mu\text{m}$ , antes da evaporação. Neste caso, o material retido no filtro foi seco a 103 a 105°C em estufa enquanto o material filtrado foi evaporado usando bico de Bunsen e seco a 180°C também em estufa, para determinar os sólidos em suspensão e dissolvidos, respectivamente.

#### 5.2.5.1 Sólidos em suspensão total.

Após a filtração à vácuo, transferiu-se o filtro para um cadinho previamente pesado colocando o mesmo para secar em estufa a uma temperatura variando de 103 a 105°C. Foram realizadas pesagens até massa constante ou a diferença entre as pesagens consecutivas serem <

4% ou 0,5 mg (o que ocorresse primeiro) (SABESP, 1999). O cálculo foi realizado empregando-se a Equação 12.

$$\text{Sólidos em suspensão totais} = \frac{P1-P2}{Vol.am} \times 1000.000 = \left[ \frac{mg}{L} \right] \quad (12)$$

Onde:

$P1$  = Tara do cadinho;

$P2$  = Cadinho com amostra após secagem;

$Vol.am$  = Volume da amostra.

#### 5.2.5.2 Sólidos dissolvidos totais.

O filtrado da vinhaça foi colocado em cadinho previamente pesado, a evaporação foi efetivada dispendo o cadinho sobre uma tela de amianto e aquecido do bico de Bunsen. Ao final da etapa de evaporação a amostra foi então seca na estufa a 180°C realizadas pesagens até a sua massa constante ou a diferença entre as pesagens consecutivas serem < 4% ou 0,5 mg (o que ocorrer primeiro) (SABESP, 1999). O cálculo foi realizado empregando-se a Equação 13.

$$\text{Sólidos dissolvidos totais} = \frac{P2-P1}{Vol.am} \times 1000.000 = \left[ \frac{mg}{L} \right] \quad (13)$$

Onde:

$P1$  = Tara do cadinho;

$P2$  = cadinho com amostra após secagem;

$Vol.am$  = Volume da amostra.

### 5.3 CÁLCULO DA QUANTIDADE DE ENERGIA NECESSÁRIA PARA EVAPORAR A VINHAÇA *IN NATURA* E FILTRADA.

Aferindo se a corrente fornecida pela rede elétrica e ligando-se em sério o multímetro com o ebulidor em funcionamento pôde-se chegar ao valor exato da potência do equipamento pela Equação 14.

$$P = U \cdot I \quad (14)$$

Sendo:

$P$  = Potência (W);

$U$  = tensão (V),

$I$  = Corrente (A).

O cálculo da energia necessária para a evaporação da vinhaça foi dado pela equação 15.

$$E = P \times \Delta t = [J] \quad (15)$$

Onde:

$E$  = Energia consumida (Joules),

$P$  = Potência do equipamento (W)

$\Delta t$  = Tempo de uso do equipamento (minuto).

Foi necessário a utilização de um multímetro para se determinar a potência real do ebulidor durante a realização do experimento para a concentração da vinhaça como pode ser visto na Figura 24.

**Figura 24-** Utilização do multímetro no experimento.



Fonte – Do autor, (2017).

### 5.3.1 Filtração da vinhaça.

Em estudos onde não é exigido um grau de precisão elevado, pode-se eliminar o uso do filtro-membrana (custo relativamente alto), executando-se o procedimento inverso, isto é, filtrando-se a amostra em papel de filtro comum e analisando-se o filtrado recolhido em cápsula de porcelana (sólidos dissolvidos). Neste método, o menor grau de precisão atingido deve-se ao fato de que os poros do papel de filtro mais fino são maiores do que os do filtro-membrana, permitindo assim maior passagem de material durante esta operação analítica (SABESP, 1999).

Paula, (2010) em seus experimentos passou a vinhaça em peneira de 50 mesh retendo assim os sólidos suspensos que posterior secagem serviu de ração.

Um sistema de filtração simples foi empregado, filtrando-se 1L da amostra de vinhaça em escala laboratorial, uma alternativa econômica, prática e rápida, dispensando assim, equipamentos de controle de vazão e de nível, diminuindo o custo do trabalho e simplificando o procedimento como um todo.

Sendo assim, esse sistema constituiu-se de um único filtro, composto por um elemento filtrante (malha de nylon) utilizado para a filtração de caldo de cana na usina de açúcar e etanol com 200 mesh (0,074mm) de abertura, colocado em um funil, instalado em um suporte de laboratório conforme Figura 25.

**Figura 25** - Esquema de filtração da vinhaça.



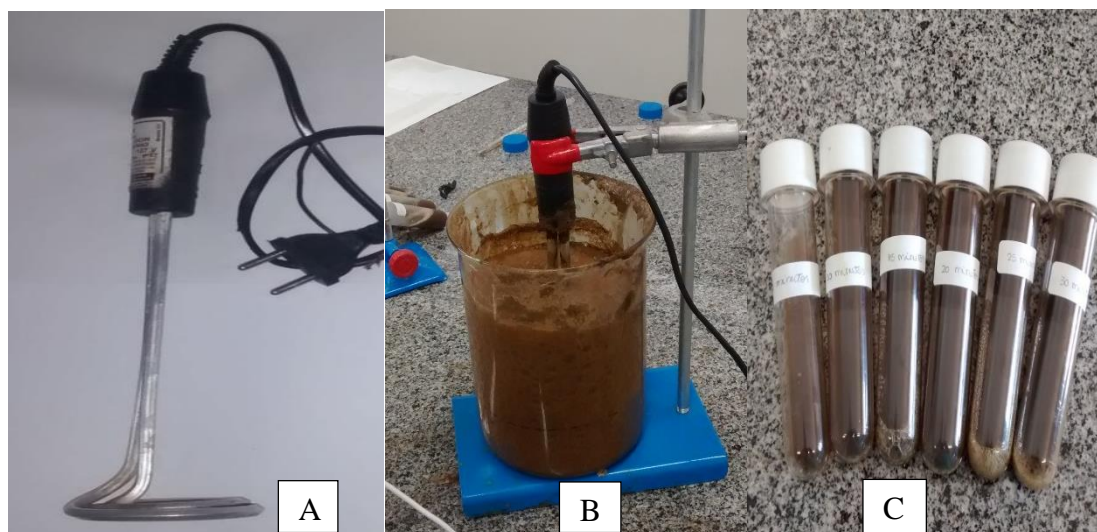
**Fonte** – Do autor, (2017).

### 5.3.2 Evaporação da vinhaça.

A etapa de concentração foi realizada pela sua evaporação e projetado pensando-se da mesma forma que o processo de filtração, ou seja, em escala laboratorial, prático e rápido, diminuindo o custo econômico do trabalho e simplificando o procedimento como um todo.

Utilizou-se um ebulidor elétrico comercial para evaporar 1 litro de vinhaça durante 30 minutos. A cada 5 minutos após a solução atingir 90 °C coletava-se aproximadamente 10 mL de amostra a qual era colocada em recipiente hermeticamente fechados e identificados (Figura 26), para a realização da leitura do °brix em refratômetro digital em uma usina da região. A análise ocorreu de 2 a 3 horas após o experimento, não interferindo assim na qualidade das amostras. No total 12 amostras foram produzidas, sendo seis de vinhaça evaporada *in natura* e seis de vinhaça evaporada após ser submetida ao processo de filtração simples, como descrito na sessão 5.3.1.

**Figura 26** - Ebulidor elétrico, esquema evaporação de vinhaça, amostras para leitura do brix.



- A- Ebulidor elétrico;
  - B- Evaporação da vinhaça;
  - C- Amostras concentradas para análise de brix.
- Fonte** – Do autor, (2017).

### 5.4 GERAÇÃO DA ÁGUA DE REÚSO APARTIR DA VINHAÇA E SUA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

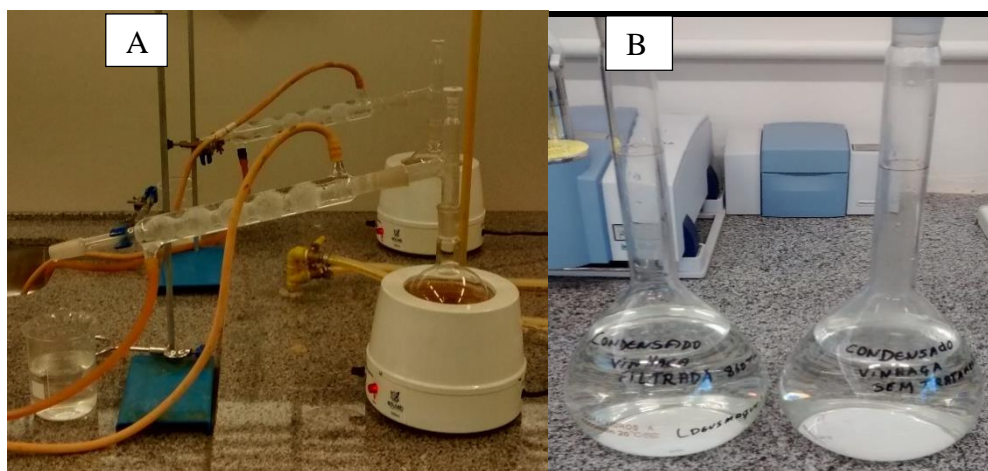
Para a geração de água a partir da vinhaça foi utilizado um sistema de evaporação a nível laboratorial onde, uma manta aquecedora forneceu a energia térmica para o sistema, 1



litro de vinhaça *in natura* foi colocado em balão volumétrico e submetido a evaporação durante 1 hora. Para a recuperação da água da vinhaça foi acoplado um condensador na saída do balão e coletada a água para que posteriormente fossem realizadas as análises físico-químicas como está ilustrado na Figura 27.

O mesmo sistema foi adotado para a vinhaça filtrada, onde o procedimento de filtração já foi descrito no item 5.3.1 deste trabalho.

**Figura 27** - Esquema de evaporação da vinhaça e recuperação da água de reúso.



A – Sistema de evaporação com recuperação da água

B – Condensado recuperado a ser analisado.

Fonte - Do autor, (2017).

Análises empregadas na caracterização da água de reúso quanto ao pH e condutividade foram semelhantes às descritas na caracterização da vinhaça nos itens 5.2.2 a 5.2.3 deste trabalho.

As amostras de água também foram submetidas as análises de turbidez, dureza total, alcalinidade total e cor conforme descrito a seguir:

#### 5.4.1 Turbidez

A turbidez foi determinada pelo princípio de nefelometria em célula fotoelétrica, medindo a quantidade de luz que emerge perpendicularmente a um feixe luminoso que atravessa a amostra na cubeta transparente e incolor, o padrão de comparação foi preparado a partir de solução de formazina e os valores expressos em unidades nefelométricas de turbidez (NTU) com precisão de 0,1 NTU. (SABESP, 1999)

### 5.4.2 Dureza total

Para a análise foi utilizado o método volumétrico não requerendo instrumentação sofisticada

A dureza total das amostras de água foi determinada empregando a titulação por complexação, empregando o EDTA como solução titulante. Inicialmente, pipetou-se 50 ml da amostra de água para um erlenmeyer de 250 mL, adicionou-se 2 mL de solução tampão  $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{NH}_4\text{OH}$  e cerca de 0,05g do indicador Erio. T. Fez-se a titulação lentamente com a solução padronizada de EDTA 0,01 M até que a cor vermelha desapareceu e surgiu uma coloração azul persistente por 30 s. Logo depois, pipetou-se mais 50 mL da amostra e transferindo a mesma para um erlenmeyer de 250 mL, adicionando-se 2 mL de NaOH 0,1 M e cerca de 0,05 g do indicador sólido murexida. Repetiu-se o processo de titulação lentamente até que a cor rosa desapareceu e surgiu uma coloração violeta persistente por 30s (SABESP, 1999) O cálculo se deu pela Equação 16.

$$D. \text{ total, } \text{mgL}^{-1} \text{ CaCO}_3 = \frac{V \text{ titulante (mL)} \times 0,01 \text{ molL}^{-1} \times FC \times 100.000 \text{ mgmol}^{-1} \times \text{CaCO}_3}{V. \text{ amostra (mL)}} \quad (16)$$

Onde:

FC = mL  $\text{CaCO}_3$ /mL EDTA e para uma solução de  $\text{CaCO}_3$  mol.L<sup>-1</sup>, FC = mg  $\text{CaCO}_3$ /mL EDTA

#### 5.4.2.1 Dureza cálcica e magnésiana

Pipetou se 50 mL da amostra de água condensada e transferiu para um erlenmeyer de 250 mL. Adicionou-se 2 mL de NaOH com concentração 1,0 mol L<sup>-1</sup> e cerca de 0,05g de indicador sólido murexida. Titulou-se lentamente com a solução padronizada de EDTA, concentração 0,01 mol.L<sup>-1</sup> até o ponto do aparecimento da cor violeta permanente (SABESP, 1999).

Os cálculos da dureza cálcica e magnésiana se deram pelas Equações 17 e 18 respectivamente.

$$D. \text{ cálcio, } \text{mgL}^{-1} . \text{ Ca CO}_3 = \frac{V \text{ EDTA (mL)} \times FC \times 1000 \text{ mL.L}^{-1}}{V \text{ amostra (mL)}} \quad (17)$$

$$mg.L^{-1}.Ca = Dureza\ c\acute{a}lcio \times \frac{40,08\ mg\ Ca}{100\ mg\ Ca\ CO_3}$$

$$D\ magn\acute{e}sio.\ mgL^{-1}.Ca\ CO_3 = Dureza\ total - dureza\ de\ c\acute{a}lcio \quad (18)$$

$$mgL^{-1}\ Mg = (dureza\ total - dureza\ de\ c\acute{a}lcio) \times \frac{24,3mg\ Mg}{100mg\ Ca\ CO_3}$$

### 5.4.3 Alcalinidade

A medida da alcalinidade das amostras foi realizada empregando a titulação ácido-base. O titulante empregado foi uma solução de ácido sulfúrico 0,2 M. Os valores foram expressos em equivalência ao carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>).

Pipetou-se 100 mL da amostra de água transferindo-a para um erlenmeyer de 250 mL adicionando 4 gotas de fenolftaleína, pipetou-se solução de ácido sulfúrico 0,02 eqL<sup>-1</sup> até a descoloração rósea da amostra anotando o volume gasto como ‘‘F’’. Adicionou-se 3 gotas de verde bromocresol e titulou-se até o ponto de viragem da cor azul para a cor esverdeada, anotando os volumes gastos como a letra ‘‘B’’, anotou-se os volumes totais gastos da solução de ácido sulfúrico 0,02 eqL<sup>-1</sup> gastos com o verde bromocresol e com a fenolftaleína como letra ‘‘T’’, da temos o cálculo pela Equação 19 (SABESP, 1999)

$$Alcalinidade\ total = \frac{T \times 0,02\ eqL^{-1} \times 50.000\ mg\ eq^{-1}CaCO_3}{100\ mL\ amostra} \quad (19)$$

Uma estimativa da proporção das diferentes formas de alcalinidade presentes numa amostra pode ser obtida diretamente da determinação de alcalinidade, conforme apresentada pela Tabela 8.

**Tabela 8** - Estimativa da proporção das diferentes formas de alcalinidade

Resultado da titulação	Formas de alcalinidade		
	Hidróxido	Carbonato	Bicarbonato
F= 0	0	0	T
F < 1/2 T	0	2F	T – 2F
F = 1/2 T	0	2 F	0
F > 1/2T	2F - T	2 (T –F)	0
F =T	T	0	0

Fonte - MOUNTEER; NASCIMENTO e BASTOS, (2008).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do estudo estão dispostos em Tabelas e Gráficos para a melhor compreensão conforme descrito nos subitens a seguir.

### 6.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA VINHAÇA

#### 6.1.2 pH, °brix e condutividade das amostras de vinhaça

A Tabela 9 apresenta as leituras, valores médios e desvio padrão calculados para as amostras de vinhaça coletadas que foram utilizadas neste trabalho. Conforme o Centro de Tecnologia Canavieira, (2008) estes valores podem variar devido a vários fatores dentre os quais pode-se destacar a composição da matéria-prima, composição do mosto, condução da fermentação e destilação. Carvalho, (2010) em seus estudos apresentou valores de °brix para vinhaça “*in natura*” variando de 3 a 5%, valores estes bem próximos aos encontrados neste trabalho.

O resultado encontrado para o pH foi idêntico ao resultado encontrado por Paula, 2010, onde apresentou valores de pH em vinhaça oriunda de mosto (caldo/méis) variando de 4,4 a 4,6. Quanto a condutividade não foi possível correlacionar pois, a bibliografia pesquisada não apresentou valores para o mesmo.

**Tabela 9** - Valores e média do pH, °Brix e condutividade das amostras

<b>Amostra</b>	<b>°Brix</b>	<b>Condutividade</b>	<b>pH</b>
<b>I</b>	3,30	8,922	4,72
<b>II</b>	2,09	6,332	4,67
<b>III</b>	2,90	9,717	4,67
<b>Resultado</b>	2,76 ± 0,63	8,32 ± 1,77	4,68 ± 0,03

Fonte – Elaborado pelo autor, (2017).

#### 6.1.3 Brix das amostras de vinhaça durante a evaporação.

A Tabela 10 apresenta os resultados do °brix durante o ensaio de evaporação realizado.

**Tabela 10** - Elevação do °brix durante a evaporação

<b>Tempo (Minutos)</b>	<b>°Brix médio da vinhaça Filtrada (%)</b>	<b>°Brix médio da vinhaça <i>In natura</i> (%)</b>
<b>5</b>	3,12 ± 0,84	2,92 ± 0,34
<b>10</b>	3,94 ± 0,95	3,46 ± 0,39
<b>15</b>	5,36 ± 1,21	4,42 ± 0,67
<b>20</b>	6,96 ± 1,54	5,36 ± 0,86
<b>25</b>	9,01 ± 2,14	6,90 ± 1,32
<b>30</b>	15,03 ± 3,68	9,53 ± 2,49

Fonte – Elaborado pelo autor, (2017).

Carvalho, (2010) ressalta que evaporação é uma operação unitária largamente utilizada pelas indústrias químicas e de processos com o objetivo de se obter produtos mais concentrados comuns na fabricação de doces, geleias, ou seja, com menor quantidade de soluto volátil, na maioria das vezes água.

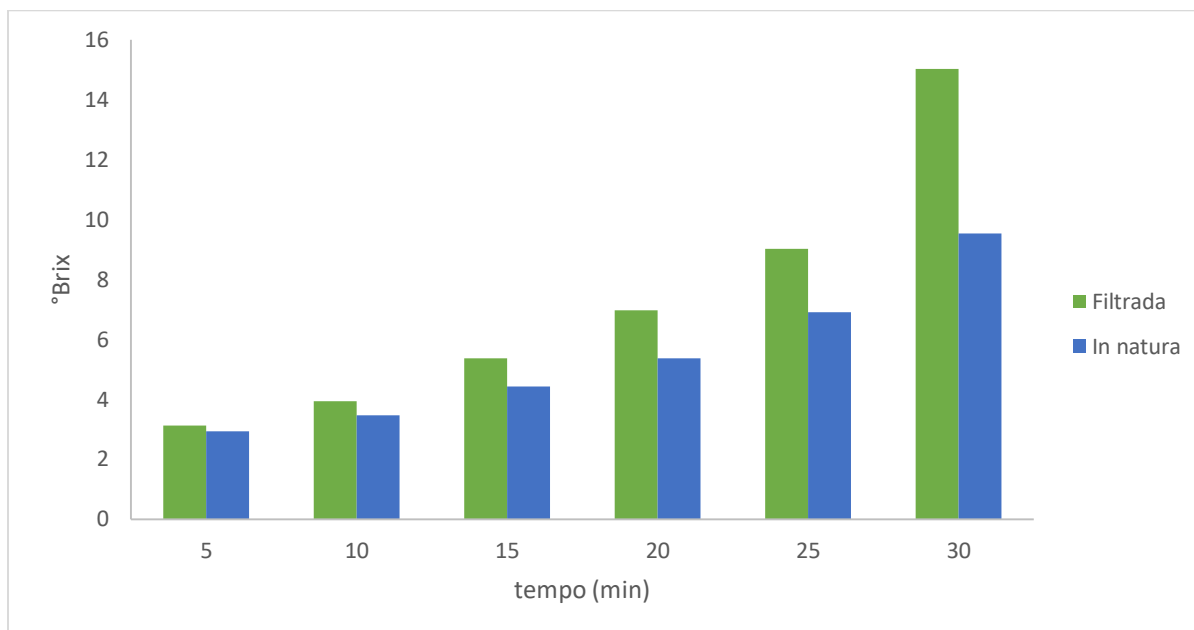
Quanto a vinhaça *in natura* já se sabe que ela possui baixos teores de sólidos os quais podem variar de 2 a 5% em função da matéria prima utilizada. O efeito da evaporação provoca uma elevação do °brix consequentemente redução de seu volume, sendo esta técnica importantíssima no ponto de vista ambiental pois, possibilita a reutilização da água gerada, no processo industrial (SANTA CRUZ, 2011).

Por análise comparativa do gráfico da triplicata do experimento (Figura 28) onde está representado o comportamento do °Brix ao longo dos 30 minutos de evaporação da vinhaça, percebe-se que a vinhaça após ser filtrada obteve uma maior concentração, devido a solução estar livre de partículas em suspensão o que atrapalha a troca térmica e consequentemente a evaporação.

Houve, portanto, maior redução de volume na vinhaça submetida a filtração simples gerando assim maior quantidade de água de reúso o que possibilitaria uma maior redução na captação nos corpos d'água.

Pode se afirmar certamente que os volumes de vinhaça a ser enviado para as lavouras de cana de açúcar serão menores acarretando assim, em economia energética uma vez que os meios de transporte são grandes consumidores de energia.

**Figura 28** – °Brix, referente a etapa da evaporação da vinhaça *in natura* e filtrada



**Fonte** – Elaborado pelo autor, (2017).

#### 6.1.4 Análise dos sólidos presentes nas amostras de vinhaça

A qualidade do tratamento aplicado nas águas residuárias estão relacionadas as diversas substâncias nela existentes, pela variedade ou quantidade destas substâncias. Os dados de sólidos têm sua importância para o acompanhamento e avaliação da eficiência dos sistemas de tratamento das águas residuais, que é o caso da vinhaça de cana de açúcar (SABESP, 1999).

Embora sejam parâmetros físicos, os níveis de sólidos em suas diversas frações fornecem informações preliminares para qualificar o efluente. A ação de interferentes em análises de sólidos é limitada pela sua própria concentração nas amostras (SABESP, 1999).

As Tabelas 11 e 12 apresentam os valores quantificados para os sólidos que ficaram retidos durante o processo de filtração e os que permaneceram no filtrado da vinhaça, respectivamente. Pela análise dos resultados verifica-se que o filtro conseguiu reter aproximadamente em média 2,5g (1,8% m/m) de sólidos da amostra os quais poderão ser adicionados a outros fertilizantes organominerais provenientes da planta industrial e posterior aplicação nas lavouras de cana de açúcar.

**Tabela 11** - Quantidade sólidos retidos na filtração (g)

<b>Amostra</b>	<b>Sólidos retidos (g)</b>
<b>I</b>	2,3409 ± 0,20
<b>II</b>	2,7259 ± 0,20
<b>III</b>	2,4278 ± 0,20
<b>Resultado</b>	2,4982 ± 0,20

Fonte – Elaborado pelo autor, (2017).

Nos estudos de controle e caracterização de efluentes industriais, as determinações dos níveis de concentração das diversas frações de sólidos resultam em um quadro geral da distribuição das partículas com relação ao tamanho, (sólidos em suspensão e dissolvidos) e com relação à natureza (fixos ou minerais e voláteis ou orgânicos) (SABESP, 1999).

Como já era esperado o processo de filtração não reteve todos os sólidos, 2g de sólidos permaneceram na amostra de vinhaça, provavelmente composto por sais, açúcares fermentescíveis, outros produtos misturados ao mosto de caldo de cana utilizados para a produção de etanol, que resultaram na composição da vinhaça.

**Tabela 12** - Quantidade de sólidos na amostra de vinhaça após filtração (g)

<b>Amostra</b>	<b>Sólidos (g)</b>
<b>I</b>	2,1975 ± 0,05
<b>II</b>	2,0630 ± 0,05
<b>III</b>	2,1119 ± 0,05
<b>Resultado</b>	2,1241 ± 0,05

Fonte – Elaborado pelo autor, (2017).

Segundo CTC, (2008) conforme citado por Paula, (2011) em estudos sobre a utilização da vinhaça em lavadores de gases de caldeiras de usinas sucroalcooleiras, relata que a composição da vinhaça de cana de açúcar possuía em média 18420 mg/L de sólidos dissolvidos totais (SDT) em amostras de usinas do estado de São Paulo, neste trabalho foram encontrados aproximadamente 16000 mg/L em média das amostras analisadas. Comparando os resultados encontrados pelo CTC, (2008) a respeito dos sólidos solúveis totais (9500 mg/L) pode se dizer que este trabalho encontrou um resultado maior (11410 mg/L). A Tabela 13 mostra os valores calculados para as concentrações dos sólidos em suspensão total e sólidos dissolvidos totais nas amostras de vinhaça em questão.

**Tabela 13** - Quantidade de sólidos em suspensão total e sólidos dissolvidos totais nas amostras

<b>Amostra</b>	<b>SST (mg/L)</b>	<b>SDT (mg/L)</b>
<b>I</b>	10381,89 ±1299,51	16534,73 ±511,15
<b>II</b>	13218,76 ±1299,51	15522,71 ±511,15
<b>III</b>	10630,14 ±1299,51	15390,28 ±511,15
<b>Resultado</b>	11410,63 ±1299,51	15815,90 ±511,15

Fonte – Elaborado pelo autor, (2017).

A concentração de sólidos em suspensão é uma medida importante no controle de decantadores e unidades de separação de sólidos, constituem também parâmetro utilizado em análises de balanço de massa. O excesso de sólidos dissolvidos pode levar a graves problemas de salinização do solo assim como a condutividade também se relaciona com presença de sólidos dissolvidos (CETESB, 2005).

## 6.2 ENERGIA NECESSÁRIA PARA EVAPOAR A VINHAÇA

Segundo Silva, (2012) durante seus estudos sobre a viabilidade econômica e ambiental das técnicas de disposição da vinhaça concluiu que o consumo de vapor de uma planta de evaporação de vinhaça é da ordem de 0,22 a 0,27 Kg/L de água evaporada e a energia elétrica em torno de 0,0134 kW/L de água evaporada.

Carvalho, (2011) com uso de simulador específico para balanço de massa e energia em evaporadores (Sugars<sup>TM</sup>) conclui que, para uma planta de evaporação de vinhaça com capacidade de 325m<sup>3</sup>/h seria necessário fornecer 57 t/h de vapor a 170 KPa e 115°C para garantir a concentração da vinhaça até 21,44% de brix, recuperando-se 250 m<sup>3</sup>/h de água de reúso.

Ainda para Carvalho, (2011) para que uma planta produza 1000 m<sup>3</sup>/dia de etanol são necessários o processamento de aproximadamente 22 t/dia de cana e ainda produção de 36.000 sacos de açúcar diários. Sendo assim, a implantação de um sistema de evaporação de vinhaça nesta unidade poderia representar o retorno de 0,28 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O/t.cana, o que representa 28% do consumo estabelecido pela resolução do CONAMA.

Em posse dos valores de leitura (realizada por multímetro) de tensão fornecida da rede elétrica e corrente consumida pelo equipamento usado para a evaporação (ebulidor elétrico, Figura 26 A), pôde-se calcular através das Equações 14 e 15 respectivamente (apresentadas na seção 5, sub-itens 5.3) o valor da energia consumida durante o experimento; Conforme Tabela 14.



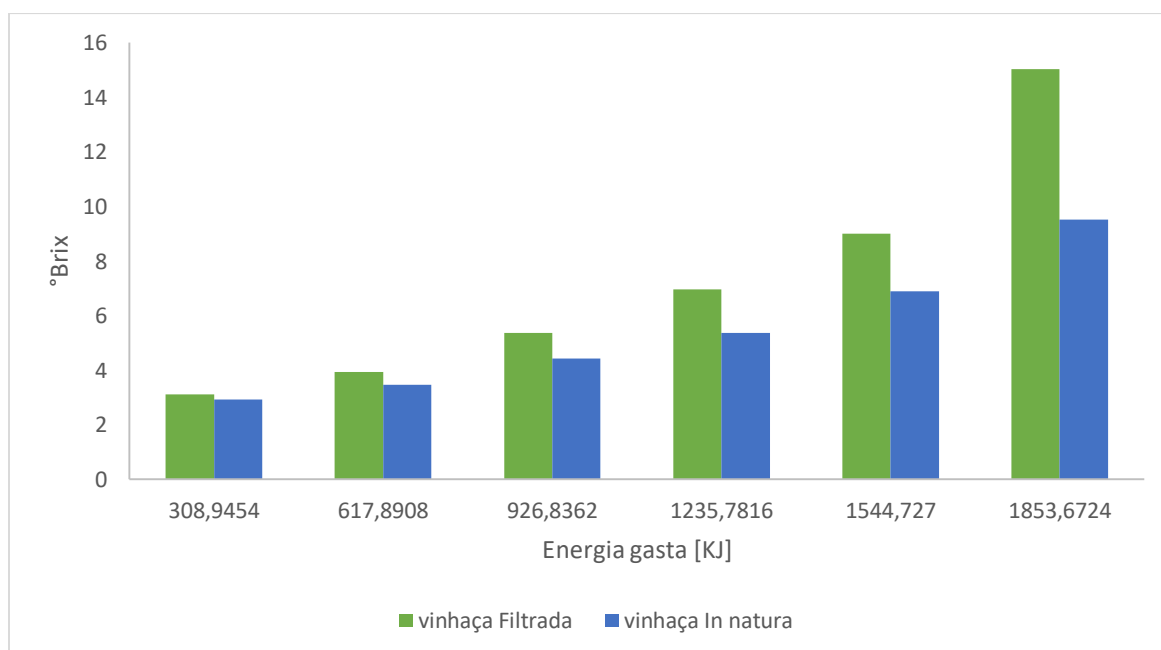
**Tabela 14** - Energia consumida para evaporar a vinhaça

Tempo (Minutos)	°Brix médio vinhaça filtrada (%)	°Brix médio vinhaça <i>in natura</i> (%)	Energia consumida (J)
5	3,12	2,92	308945,4
10	3,94	3,46	617890,8
15	5,36	4,42	926836,2
20	6,96	5,36	1235781,6
25	9,01	6,9	1544727,0
30	15,03	9,53	1853672,4

Fonte – Elaborado pelo autor, (2017).

Para as duas situações do experimento foram encontrados os mesmos valores de consumo energético, o que já era esperado. Entretanto, a concentração (°brix) na amostra de vinhaça filtrada mostrou-se com valores mais elevados conforme Figura 29.

Pode-se afirmar que o processo de filtração da vinhaça para evaporação obteve melhor desempenho frente ao outro processo (evaporação da vinhaça “*in natura*”), em função do volume de vinhaça reduzido (diminuindo os gastos com o transporte), e quanto ao volume gerado de água de reúso (diminuindo a captação).

**Figura 29** – Energia consumida na etapa de evaporação da vinhaça *in natura* e filtrada

Fonte – Elaborado pelo autor, (2017).

### 6.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA DE REÚSO

A aplicação e utilização da água em determinadas fases de um processo industrial determina diferentes tipos de tratamento e respectivos equipamentos, (MARINI, 2012)

Para se atender a demanda qualitativa da água de reuso é essencial entender os processos e realizar análises físico-químicas. Assim, pode-se destiná-la para reutilização direta ou submetê-la a algum tipo de tratamento, afim de adequá-la às condições exigidas por equipamentos ou processos.

É sabido que o potencial de recuperação de água pela evaporação da vinhaça é grande, entretanto as aplicações e utilização desta água de reuso devem ser bem estudadas, bem como a necessidade de tratamento. (CARVAHO, 2011)

A Tabela 15 apresenta os resultados encontrados da água recuperada das amostras de vinhaça, submetidas ao processo de evaporação.

**Tabela 15** - Resultados analíticos da água de reuso

<b>Parâmetro</b>	<b>Água da vinhaça filtrada</b>	<b>Água da vinhaça <i>in natura</i></b>
<b>pH</b>	4,50 ±0,01	4,50 ±0,01
<b>Turbidez (NTU)</b>	1,95 ±0,32	1,81±0,24
<b>Dureza total (ppm) *</b>	75,00 ±0,78	70,00 ±0,60
<b>Dureza cálcica (ppm) *</b>	49,00 ±0,28	50,00 ±0,29
<b>Dureza magnésiana (ppm) *</b>	26,00 ±0,50	20,00 ±0,42
<b>Alcalinidade Total (ppm) *</b>	44,00 ±0,40	45,00 ±0,36
<b>Condutividade(μS/cm,25°C)</b>	125,00 ±0,10	115,70 ±0,22

\* Partes por milhão

Fonte – Elaborado pelo autor, (2017).

A Tabela 16 apresenta os parâmetros da água desejados oriunda da captação (água bruta ou industrial) e que permite realizar a comparação com os resultados analíticos obtidos neste trabalho.

O tanque de água bruta da unidade industrial é o tanque de armazenamento onde a água de captação é colocada antes de seguir para as tubulações e etapas de tratamento ou usada diretamente. A nomenclatura “bruta”, é adotada pois, a água ainda não foi submetida a nenhuma operação de tratamento para sua utilização.

**Tabela 16** - Parâmetros analíticos da água industrial captada na indústria sucroalcooleira

Parâmetro	Limites
<b>pH</b>	6,8 – 8,0
<b>Turbidez (NTU)</b>	Max 20,0
<b>Dureza total (ppm) *</b>	Max 40,0
<b>Dureza cálcica (ppm) *</b>	Max 30,0
<b>Dureza magnésiana (ppm) *</b>	-
<b>Alcalinidade Total (ppm) *</b>	Max 60
<b>Condutividade (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>, 25°C)</b>	Max 100

Fonte – Adaptado de Marini, (2012).

Segundo Marini, 2012 valores muito elevados de alcalinidade podem ser indesejáveis em uma água a ser utilizada para fins industriais, uma vez que podem ocasionar problemas de formação de depósitos e corrosão, de acordo com a utilização desta água. Percebe-se então que o valor encontrado para a alcalinidade está na faixa proposta pelo autor.

A etapa de filtração da vinhaça não alterou a qualidade da água de reúso quanto aos parâmetros analisados quando comparado a água de reúso da vinhaça *in natura*.

O pH da água de reúso ficou na faixa de acidez, herdando esta característica da vinhaça, devendo-se então ajustá-lo para a faixa recomendada para que o mesmo não possa causar corrosão ou danos nos equipamentos ou tubulações da planta industrial.

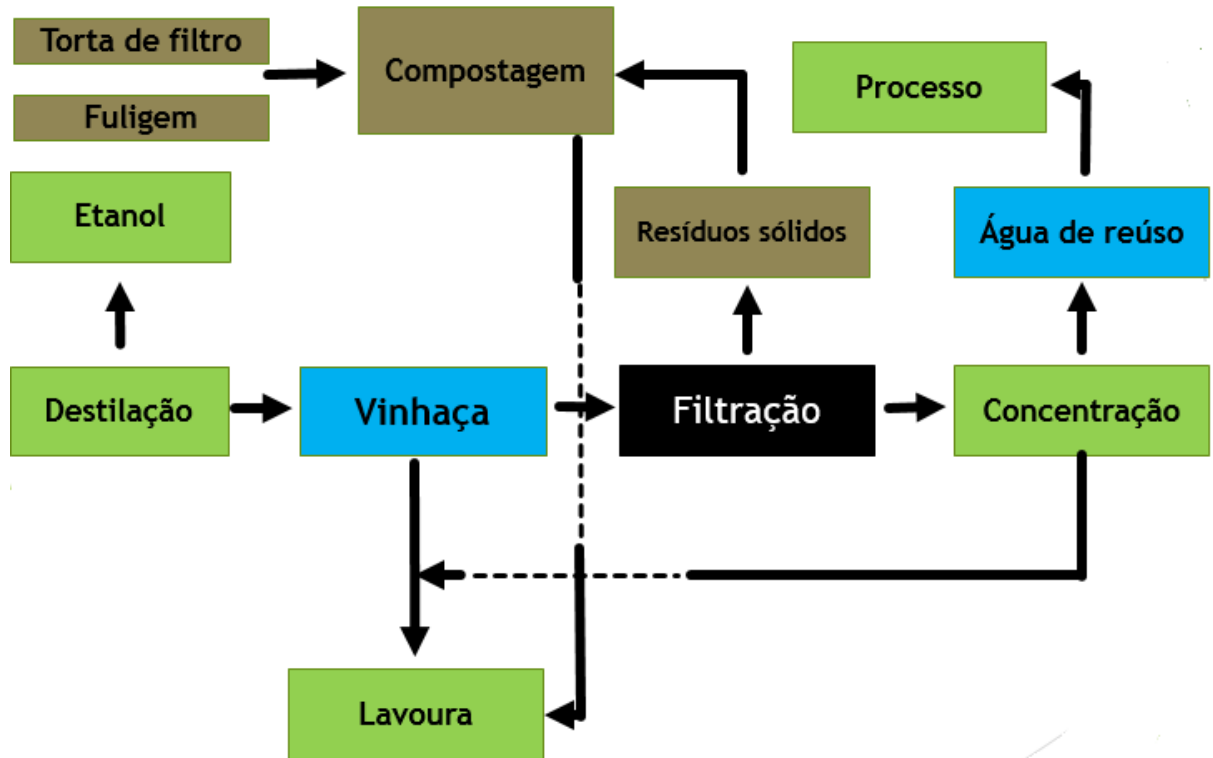
Os bicarbonatos de cálcio e de magnésio, que também são responsáveis pela alcalinidade, causam a dureza. A dureza de uma água pode variar de zero a centenas de miligramas por litro, dependendo da fonte e do tratamento aplicado. O tratamento da água dura para a retirada de  $\text{Ca}_2^+$  e  $\text{Mg}_2^+$  é conhecido por abrandamento e pode ser realizado de duas maneiras: Precipitação química e troca iônica. A escolha entre os processos depende das características da água a ser tratada, das necessidades e da disponibilidade de recursos de cada empresa (MARINI, 2012).

A turbidez também é um parâmetro que indica a qualidade estética das águas para abastecimento, nas estações de tratamento de água. A turbidez, é um parâmetro operacional de extrema importância para o controle das etapas de coagulação-floculação, sedimentação e filtração (MOUNTEER, 2008). Entretanto o resultado obtido nos permite afirmar que não seria necessário aplicar nenhum tipo de tratamento para a remoção da turbidez na água de reúso.

Tendo em vista os benefícios quantitativos alcançados pela filtração da vinhaça para a etapa evaporativa da mesma, representa-se na figura esquemática 30 a inserção da etapa de filtração. Pode-se notar que há o surgimento de um novo resíduo sólido no processo produtivo o qual recomenda-se incorporar aos outros existentes, assim existe também um incremento na

carga de fertilizantes organominerais oriundos do processo de produção nas usinas sucroalcooleiras.

**Figura 30** - Etapa de filtração da vinhaça no processo de produção sucroalcooleira.



Fonte - Elaborado pelo autor, (2017).

## 7 CONCLUSÃO

No estudo desenvolvido foram realizadas etapas de filtração e evaporação da vinhaça em escala laboratorial, analisando-se as propriedades físico-químicas da água gerada, onde se verificou que a etapa de filtração da vinhaça não alterou as propriedades da água de reúso, entretanto foi notório a maior concentração dos sólidos solúveis, 15,03 °Brix, na vinhaça filtrada, contra 9,53 °Brix na vinhaça *in natura* após as etapas de evaporação. Indicando-se assim a filtração simples da vinhaça para uma maior elevação do °brix e conseqüentemente maior geração de água para reúso.

De maneira geral os objetivos propostos por este trabalho foram alcançados pois demonstrou-se que existe a viabilidade do reúso da água a partir do processo de concentração da vinhaça de cana de açúcar, podendo utilizá-la com fins menos nobres tais como limpeza geral, reposição de água em torres de resfriamento, ou submetida aos tratamentos para atender as necessidades dos equipamentos ou das etapas do processo. O pH manteve-se na faixa ácida de 4,5 e dureza total de 75 ppm enquanto recomenda-se faixas de 6 a 8 para o pH e no máximo 40 ppm de dureza total. O consumo energético mostrou-se idêntico.

Enfim o desenvolvimento sustentável e inovador da indústria canavieira deve ser delineado com base no triângulo: economia-sociedade-meio ambiente, e para atender à demanda de água os efluentes devem ser usados como uma ferramenta para a proteção das fontes, maximizando a eficiência e reduzindo a captação nas fontes. Os efluentes devem ser vistos como uma oportunidade, em vez de subproduto.

## REFERÊNCIAS

AMORIM, Henrique V.; LEÃO, R. M. **Fermentação alcoólica: ciência e tecnologia**. Piracicaba. Fermentec, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília: agência Nacional de águas; Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; União da Indústria da cana de açúcar; centro de tecnologia canavieira, 2009.

ANDRADE, F. P. **Uso da vinhaça na fertirrigação: revisão da literatura sobre a técnica e seus benefícios**. 2012. 57 p. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de Lorena-USP, Lorena, 2012.

AZANIA, Andréa Aparecida de Pádua Mathias. **Potencialidade de herbicida do óleo fúsel**. Jaboticabal, 2007.

BASSO, Luiz C., AMORIM, Henrique V. de, OLIVEIRA, Antônio J. de, LOPES, Mário L. **Yeast Selection For Fuel Ethanol Production On Brazil**. Federation of European Microbiological Societies, FEMS Yeast Res v.8, p.1155–1163, ago. 2008.

CARVALHO, Túlio Camaçari. **Redução do volume de vinhaça pelo processo de concentração**; Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia Mecânica, Bauru, SP- 2011.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. Norma Técnica P4.231. São Paulo, 2005. 12 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab), **disponível em:** <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>, acesso em: 10 de abr. 2015.

CRH - CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo - PERH 2012-2015** - Volume I. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos, São Paulo, 2013.

DIAS, Marina Oliveira de. **Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço**. Dissertação (mestrado) – Universidade estadual de Campinas – Faculdade de engenharia Química, Campinas, São Paulo, 2008.

ELIA NETO, André; SHINTAKU, A; PIQ, A.A.B.; CONDE, A.J.; FRANCESCO, F.; DONZELLI, J. L. **Manual de conservação e Reuso da Água na Indústria Sucroenergética**. Coordenação Técnica: André Elia Neto. Publicado por ANA – Agência Nacional de águas, FIESP –Federação da Indústrias do Estado de São Paulo, UNICA - União da indústria da cana-de-açúcar, CTC – Centro de Tecnologia Canavieira. Brasília, 2009. 288.p.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na Agroindústria da Cana-de-açúcar**. STAB. Sociedade dos técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, p. 162, 2003.

FUESS, L T; GARCIA, M. L. **Qual o valor da vinhaça? Mitigação de impacto ambiental e recuperação de energia por meio de digestão anaeróbia.** Cultura Acadêmica Universidade paulista, Pró-reitoria de graduação. São Paulo, 2012; 130.p.

JESUS, C. D. F. **Validação da simulação dinâmica das etapas de evaporação e cristalização da produção de açúcar com dados obtidos em plantas industriais.** Tese (doutorado), Universidade Federal de São Carlos, 2004.

Kevin R Fingerma, Margaret S Tornl, Michael HO'Hare and Daniel M Kammen. **Accounting for the water impacts of ethanol production.** Environ. Res. Lett. 5 (2010) 014020 (7pp). Disponível em: IOPSCIENCE.IOP.ORG, acesso em: 30 nov.2015.

LEITE, Inácio Ramos. **Avaliação da ação de antibiótico natural na fermentação alcoólica contaminada por cultura mista.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2011.

MAGALHÃES, Andollini. **Metabolismo das Fermentações.** Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2010.

MARINI, Valter. **Apostila prática de tratamento de águas industriais- Fluid-Brasil,** apostila elaborada por Valter Marini. São Paulo, 2012.

MOUNTEER, Ann. H; NASCIMENTO, Luís Eduardo do; BASTOS, Rafael Kopschitz Xavier. **CIV-442 Qualidade da água. Apostila de aulas práticas.** Universidade Federal de Viçosa-Centro de Ciências exatas e tecnológicas – Departamento de Engenharia Civil. Viçosa, 2008.

PASSOS, R. R G. **Avaliação energético-econômica da utilização da vinhaça via biogás ou evaporação seguida de incineração** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2009.47 p.

PAULA, Nélia Alves de. **Avaliação da utilização de vinhaça como líquido em lavadores de gases.** Dissertação (mestrado) – Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP – Ribeirão Preto, SP, 2011.

PELLEGRINI, L. F. **Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade.** 2009. 350p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PINTO, Cláudio. Plaza. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável.** Dissertação (mestrado) Universidade estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, São Paulo. 1999.

REIN, Peter, **Engenharia do açúcar de cana,** Verlag Dr Albert Bartens KG, Berlin, 2007. Traduzido por César Miranda e Ericson Marino, Impressão e encadernação: Elbe Drnckerei Wittenberg.

RIBEIRO, Fabíola Maria Gonçalves. **Usos da água na indústria sucroalcooleira: estudo de caso.** Dissertação (Mestrado) -Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, SP: 2011.

RODRIGUEZ, Mauro F. Chaves. SALAZAR, Klever Joao Mosqueira; ENSINAS, Adriano V.; NEBRA, Silvia A. Energy for Sustainable Development. **Water reuse and recycling according to stream qualities in sugar–ethanol plants**. Fev. 2013, p. 546-554.

SABESP. Companhia de Saneamento Básico de São Paulo **Norma Técnica Interna NTS 013**. Revisão 1. São Paulo - 1999 SP.

SANTA CRUZ, Luiz Felipe Lomanto. **Viabilidade técnica/ Econômica/Ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o setor sucroenergético do Estado de São Paulo**. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

SILVA, Alline da. **Vinhaça concentrada de cana de açúcar: Monitoramento das propriedades químicas do solo e mineralização líquida do nitrogênio**. Tese (doutorado) – Centro de energia nuclear da universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SILVA, F. C. da. CESAR, M. A. A.; MRAES, J. de. VILELA, M.; MENDES, C. **Diagnóstico hídrico em destilarias de álcool em São Paulo**. Bioenergia em Revista: Diálogos, Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 93-117, jan. /jun., 2011.

SILVA, G.A. da; **Avaliação das tecnologias de disposição de vinhaça de cana de açúcar quanto ao aspecto de desenvolvimento ambiental e econômico**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo- USP- São Carlos, SP,2012.

SILVA, M.A. S. da; 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. 8, n. 1, p.108-114, set. 2007.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE – SMA. **Resolução SMA Nº 88 de 19 de dezembro de 2008**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde>>. Acesso em: 20 Ago. 2016.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE – SMA. **Mapa Zoneamento Agroambiental para o setor Sucroalcooleiro do Estado se São Paulo**. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde>>. Acesso em: 20 Ago. 2016.

SMITH, I. A., Taylor L. A. W. **Some data on heat transfer in multiple effect evaporators**. Proc. S. Afr. Sugar Technol. Ass, pp. 127-131, 1981.

SOUZA, J. K. C. et al. **Importância da irrigação para a produção de cana de açúcar no nordeste do Brasil**. Revista Educação Agrícola Superior, Brasília, v. 27, n. 2, p.133-140, 2012.

TAUK-TORNISIELO, S.M., DOMINGOS, R.N, ROSSI, A., SILVA, C.E.F., PAES, F.M., JARDINETTI-GIMENES, S., AMARAL, W. **A Cultura da cana-de-açúcar e agricultura sustentável na sub-bacia do rio Corumbataí, SP**. Disponível em: <http://www.seb-ecologia.org.br/forum/art1a.htm> acesso em: 20 de Abr. 2015.