

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO - MTA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DA REDUÇÃO DO VOLUME DA VINHAÇA POR
EVAPORAÇÃO**

JOÃO BATISTA ALVES AMORIM

CATANDUVA

2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO - MTA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DA REDUÇÃO DO VOLUME DA VINHAÇA POR
EVAPORAÇÃO**

JOÃO BATISTA ALVES AMORIM

**Monografia apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Gestão do Setor
Sucroenergético - MTA.**

Aluno: João Batista Alves Amorim

**Orientador: Prof.Dr. Antônio Roberto
Crystal Bello**

CATANDUVA

2015

RESUMO

Diante do cenário atual que estamos vivendo relacionado ao constante aumento na produção de etanol combustível, logo nos sobrevém uma grande preocupação a respeito da enorme quantidade de vinhaça gerada, subproduto da produção de etanol pelas Destilarias Autônomas e Usinas de Açúcar e Etanol. A vinhaça que antes era lançada diretamente nos cursos d'água, a partir da década de 70, com o aumento dos preços dos fertilizantes minerais, passou a ser reutilizada como subproduto para a adubação canavieira. Recentemente, com a evolução da política ambiental do setor, suas práticas agroindustriais passaram a priorizar o uso eficiente de seus subprodutos, sejam através da racionalização em suas aplicações ou pelo uso de tecnologias que potencializem os seus benefícios. É considerado um poluente com alto teor de orgânicos e que precisa ser tratada. Atualmente, a utilização da vinhaça in natura no solo é comum, porém, há controvérsias sobre salinização do solo e contaminação de aquíferos subterrâneos. No estado de São Paulo, a norma P4.231 da CETESB restringiu a aplicação de vinhaça em muitos solos, resultando na necessidade de distribuí-la em áreas distantes da usina. Porém, devido à grande quantidade de água no resíduo, o transporte torna-se inviável do ponto de vista econômico. Uma alternativa para diminuir os custos de transporte é reduzir o volume por evaporação, originando a vinhaça concentrada (VC). Dentre os processos de tratamento da vinhaça, encontram-se na literatura científica, vários trabalhos a respeito da fertirrigação e digestão anaeróbia, mas não a respeito da evaporação da vinhaça, que pode ser realizada através de evaporadores tipo fallingfilm.

Palavras-chave: Evaporação. Vinhaça. Subproduto.

ABSTRACT

In today's scenario we are living related to the constant increase in the production of fuel ethanol, then the dreaded concern about the huge amount of vinasse generated by-product of ethanol production by autonomous distilleries and mills Sugar and Ethanol. The vinasse was once released directly into waterways, from the 70s, with the rise in prices of mineral fertilizers, is now reused as a byproduct for the sugarcane fertilization. Recently, with the development of environmental policy in the industry, its agribusiness practices have to prioritize the efficient use of by-products, whether through streamlining your applications or the use of technologies that enhance its benefits. It is considered a pollutant with high content of organic and needs to be treated. Currently, the use natural vinasse in the soil is common, however, is controversial soil salinization and contamination of groundwater aquifers. In São Paulo, the standard CETESB P4.231 restricted the application of vinasse in many soils, resulting in the need to distribute it in remote areas of the plant. However, due to the large amount of water in the waste, transport becomes unviable economic point of view. An alternative to reduce transportation costs and reduce the volume by evaporation, yielding the concentrated vinasse (VC). Among the vinasse treatment processes are found in scientific literature, several studies regarding fertigation and anaerobic digestion, but not about the evaporation of vinasse, which can be accomplished via falling film evaporators.

Keywords: Evaporation. Vinasse. Byproduct.

1. INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial Inglesa, em meados do século XVIII, até os dias de hoje, a humanidade vem se utilizando dos inúmeros recursos (naturais ou não) disponíveis a fim de alcançar níveis de desenvolvimento cada vez maiores, seja na busca de benfeitorias para os seres humanos em geral ou, em sua grande maioria, para o simples conforto da maioria concentradora de riquezas.

Nos últimos anos, as oscilações do preço do barril do petróleo, as projeções de escassez para as fontes petrolíferas e os problemas ambientais oriundos da queima desses combustíveis têm feito o mundo refletir sobre alternativas que possam ser inseridas na matriz energética global. A tendência é a busca por combustíveis renováveis e menos agressivos ao meio ambiente como o etanol.

Ao final do processo de fabricação do etanol, ocorre a produção de vinhaça. Trata-se de um líquido de coloração marrom escura, proveniente da destilação do caldo fermentado de cana-de-açúcar, que apresenta elevada demanda bioquímica de oxigênio e é produzida na proporção média de 13 litros por litro de álcool destilado (NETO, 2008).

A perspectiva de aumento da produção de etanol combustível é fato marcante devido ao aumento da frota veicular (criação dos veículos flexfuel) e ao consumo de álcool anidro no mercado interno e externo, o que faz crescer a preocupação com o destino a ser dado à vinhaça.

A vinhaça é um poluente com alto teor de orgânicos e que precisa ser tratada. Sua disposição em qualquer coleção hídrica foi proibida pela portaria nº 323 de 29 de novembro de 1978 do extinto Ministério do Interior. Atualmente, a utilização da vinhaça através da fertirrigação é comum e impede que seja descartada nos corpos aquáticos, possibilitando a fertilização dos solos agricultáveis, além da redução dos custos de plantio. Porém, há controvérsias sobre salinização excessiva do solo e contaminação de aquíferos subterrâneos (CARVALHO, 2010).

A fertirrigação promove a dispersão “in natura” de um volume de vinhaça que varia entre 400 a 500 m³/ha, aumentando as quantidades de cálcio, potássio, nitrogênio e fósforo no solo. Considerando a dispersão em áreas próximas às unidades produtoras, durante anos consecutivos, devido à redução de custos de

transportes e disponibilidade de recursos e equipamentos adequados, o volume de vinhaça aplicado supera o recomendado(GRANATO, 2003).

Quatro grupos de opções tecnológicas para destinação da vinhaça foram identificados: Evaporação, fermentação aeróbia, digestão anaeróbia e outros usos, tais como: Fertirrigação e reciclagem na fermentação alcoólica (CORAZZA, 2001).

1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar através da pesquisa bibliográfica, o potencial de redução do volume da vinhaça por meio do processo de evaporação, e conseqüentemente diminuição no transporte por caminhões tanques da vinhaça para a fertirrigação e também um possível reuso industrial da água da evaporação, tendo em vista que algumas usinas já agregam este potencial da redução da captação de água, uma vez que o condensado retirado da vinhaça já retorna para o sistema produtivo das plantas industriais, podendo ser utilizado em diversos setores da cadeia produtiva com algumas restrições relacionadas à composição tecnológica, o que pode ser resolvido e direcionado a sua utilização específica após a caracterização físico química do condensado gerado, submetido a um possível tratamento caso haja necessidade.

Propor um diagrama esquemático de um processo de evaporação da vinhaça de uma Usina de Açúcar e Álcool genérica também é objetivo deste estudo.

Outro objetivo é conhecer algumas características físico-químicas da vinhaça concentrada em comparação à vinhaça in natura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Processo de fabricação do etanol da cana-de-açúcar

O etanol é um líquido incolor, de odor característico obtido da fermentação alcoólica do caldo de cana ou da mistura de caldo e mel, produto resultante de uma das etapas da fabricação do açúcar, para posterior destilação. A portaria nº 2 da Agência Nacional do Petróleo (ANP) estabelece as especificações para comercialização em todo o território nacional e define obrigações sobre o controle de qualidade do Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC), adicionado à gasolina na proporção de 20% a 25%, e do Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC), utilizado como combustível direto nos automóveis movidos a etanol. Segundo tal portaria, o AEAC deve apresentar o mínimo de 99,3 °INPM e o AEHC deve apresentar entre 92,6 e 93,8 °INPM (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2002).

O grau INPM é uma unidade utilizada pelo Instituto de Pesos e Medidas para expressar a porcentagem de etanol em peso em uma mistura hidroalcoólica, assim um frasco de etanol com 92 °INPM possui 92% em massa de etanol e 8% em massa de água (GUARANI, 2011).

Após ser extraído pelas moendas, parte de todo o caldo de cana é encaminhada para o processo de fabricação de etanol, a outra parte é encaminhada para o processo de fabricação de açúcar. Pode-se variar a produção de etanol e açúcar, variando-se as quantidades de caldo que são encaminhadas para os dois processos de acordo com o mix de produção e respeitando-se as capacidades e limitações das usinas (GUARANI, 2011).

Antes de ser utilizado na fabricação do etanol, o caldo deve passar por um tratamento que pode incluir a adição de cal, aquecimento e posterior decantação e filtração para a retirada de sólidos. Após a retirada de sólidos, o caldo pode passar não por um processo de concentração de açúcares através de evaporação, antes de ser resfriado até a temperatura de 30°C. Livre de impurezas, tais como bagacilhos, areia e demais sólidos e tratado termicamente, o caldo está pronto para ser encaminhado à fermentação alcoólica (GUARANI, 2011).

O caldo pode ser misturado ao mel ou melaço, subproduto da fabricação do açúcar e à água para ter sua concentração de açúcares ajustada antes da fermentação. Essa mistura preparada para a fermentação é denominada mosto. Na fermentação propriamente dita, que pode variar de 4 a 12 horas aproximadamente, os açúcares do mosto em contato com leveduras ou fermento passam por um processo de reações bioquímicas nas dornas ou tanques reatores, resultando em uma mistura que contém etanol, água e outros subprodutos como álcoois superiores, glicerol e aldeídos, além de ocorrer liberação de gás carbônico. Essa mistura de etanol e outros subprodutos são denominados de vinho (GUARANI, 2011).

Após a fermentação, na maioria das usinas brasileiras, o vinho é encaminhado à centrifugação para a separação do fermento utilizado nas dornas. O fermento recuperado recebe um tratamento e é encaminhado novamente ao processo de fermentação. O vinho, após a retirada do fermento, é encaminhado à destilação para a separação do etanol dos demais subprodutos (GUARANI, 2011).

Na destilação, o vinho que geralmente contém cerca de 7% a 10% de etanol (7° GL a 10° GL) é encaminhado para um conjunto de colunas e condensadores, onde o etanol é separado. É nesta etapa que é produzida a vinhaça, resíduo da destilação do etanol contendo cerca de 90% de água e nutrientes como o potássio. A vinhaça é obtida da usina a uma temperatura entre 80°C e 105°C, dependendo de como sua energia é aproveitada para aquecer outros fluidos na indústria. Deve ser resfriada entre 60 °C e 65°C antes de ser enviada aos canais para se evitar maiores prejuízos à lavoura (GUARANI, 2011).

O etanol obtido na destilação é o etanol hidratado, uma mistura binária “etanol água” com aproximadamente 96% de concentração volumétrica (96° GL). O etanol hidratado é resfriado e encaminhado para tanques de armazenagem. Parte do etanol hidratado é encaminhada para um processo de desidratação que envolve destilação extractiva, destilação azeotrópica ou outro método de retirada de água como a absorção que ocorre em peneiras moleculares. Após esse processo, obtém-se o etanol anidro que é utilizado na mistura com gasolina (GUARANI, 2011).

O fluxograma da Figura 1 ilustra resumidamente o processo de produção do etanol a partir da cana-de-açúcar. Conforme foi descrito, o processo pode ser segmentado em quatro setores: moendas, tratamento do caldo,

fermentação e destilação. Este fluxograma, em particular, ilustra o método de destilação azeotrópica utilizando o ciclohexano.

2.2 Vinhaça

Líquido derivado da destilação do vinho, que é resultante da fermentação do caldo da cana ou do melaço, subproduto do processo de fabricação de açúcar (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, 2005). Trata-se de um produto constituído por sais e de elevada DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio). Na Tabela 1, estão apresentadas as composições químicas das vinhaças provenientes de três tipos de mosto: mosto de melaço, mosto de caldo e mosto misto (melaço e caldo).

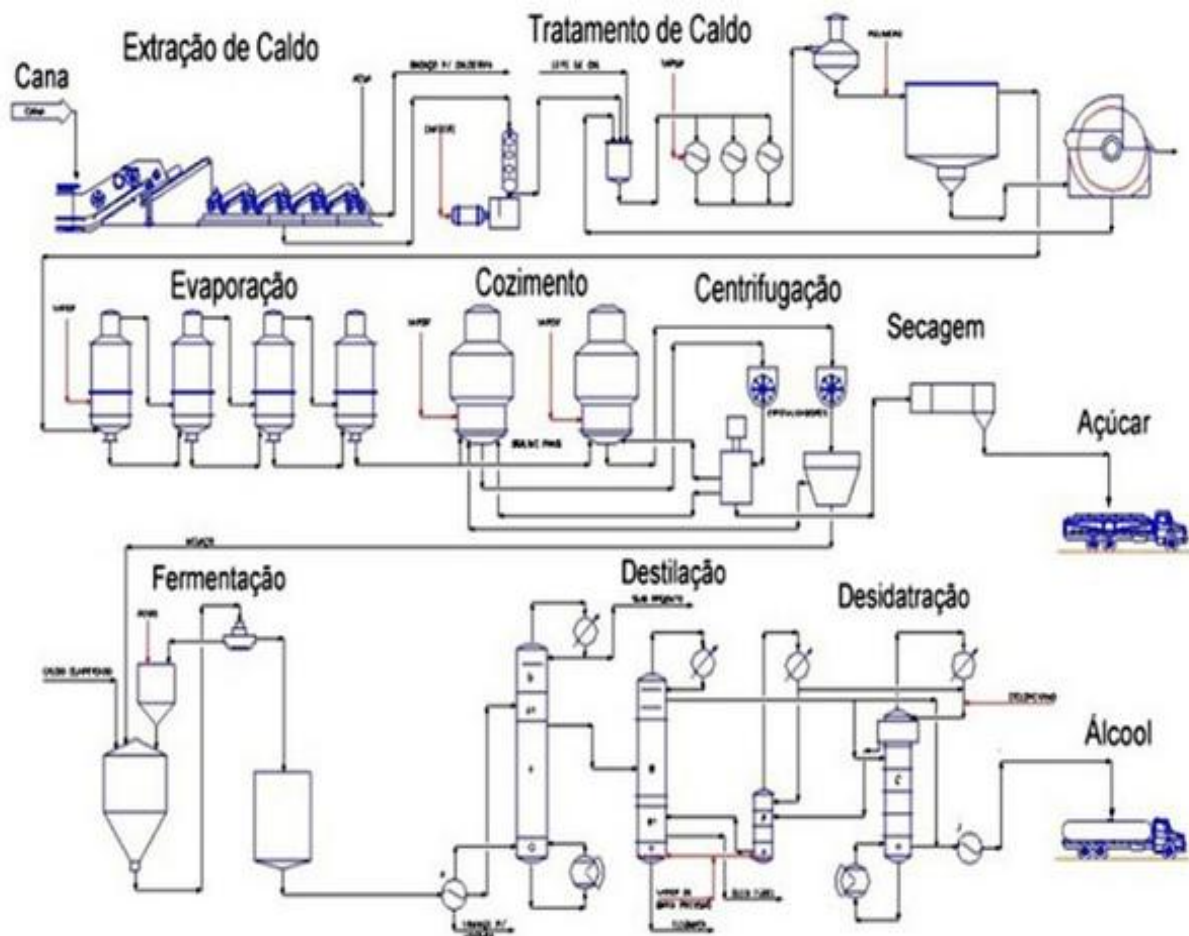


Figura 1 - Fluxograma simplificado do processo de fabricação de etanol. Fonte: SINE (2015).

Nas décadas de 40 e 50, a quantidade de vinhaça produzida não era tão grande como nos dias atuais, sendo depositada nos mananciais e em áreas de sacrifício, mas mesmo assim, já despertava preocupação nos órgãos ambientais e na comunidade científica (CORAZZA, 2001).

Tabela 1 – Composições da vinhaça em função do tipo de mosto

Variáveis (mg/l)	Melaço	Caldo	Misto
Sólidos Totais	81.500	23.700	52.700
Sólidos Voláteis	60.000	20.000	40.000
Sólidos Fixos	21.500	3.700	12.700
Carbono	11.200 – 22.900	5.700 – 13.400	8.700 – 12.100
Potássio (K ₂ O)	3.740 – 7.880	1.200 – 2.100	3.340 – 4.660
Enxofre (SO ₄ ⁻)	6.400	600 – 760	3.700 – 3.380
Cálcio (CaO)	450 – 5.180	130 – 1.540	1.330 – 4.570
Relação C/N	16 – 16,27	19,7 – 21,07	16,4 – 16,43
Nitrogênio (N)	450 – 1.610	150 – 700	480 – 710
Magnésio (MgO)	420 – 1.520	200 – 490	580 – 700
Fósforo (P ₂ O ₅)	100 – 290	10 – 210	9 – 200
DBO	25.000	6.000 – 16.500	19.800
DQO	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Acidez (pH)	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
Temperatura (°C)	80 – 100	80 – 100	80 - 100

Fonte: CARVALHO (2010)

Em 1975, o governo criou o Proálcool, visando incentivar a produção de etanol para compor uma mistura com a gasolina e assim diminuir a dependência do país em relação ao petróleo. Em meados da década de 70, o país produzia cerca de 580 milhões de litros e em 1980 a produção chegou a 3.676 milhões. Esse aumento da produção de etanol representava um aumento proporcional na produção de vinhaça. Em 1978, a portaria n° 323 do Ministério do Interior proibiu a disposição da vinhaça nos mananciais (FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA, 2010).

Constatado o valor da vinhaça como fertilizante devido principalmente aos teores de potássio, cálcio e magnésio e pelo alto teor de matéria orgânica, a disposição da mesma diretamente no solo passou a ser a solução mais empregada

pelas usinas, muito embora, isso representasse um risco para contaminação do lençol freático (VIANA, 2006).

Fernandes (2003) apresentou a equação a seguir, que relaciona a produção teórica de vinhaça em relação ao etanol produzido.

$$V_{\text{vinhaça}} = \left(K_1 \cdot (GL_{\text{vinho}})^{-K_2} \right) \cdot 0,816 \quad (1)$$

As constantes K1 e K2 dependem de como o aquecimento é feito na base da coluna de destilação, isto é, se é utilizado aquecimento direto ou indireto. No aquecimento direto, o vapor de aquecimento entra em contato com o líquido da base da coluna. No aquecimento indireto, não ocorre o contato, são utilizados aquecedores tipo casco e tubos. Os valores dessas constantes estão apresentados na Tabela 2.

Supondo o teor alcoólico do vinho variando de 5% a 10%, podem-se calcular através da Equação (1) os valores teóricos para volume de vinhaça produzido. A Tabela 3 mostra tais valores.

Tabela 2 – Constante K1 e K2.

	Tipo de aquecimento	
	Indireto	Direto
K1	119,19	130,36
K2	1,0965	1,0518

Fonte: FERNANDES (2003)

Tabela 3 – Volume de vinhaça produzido por volume de etanol produzido.

GL vinho	Tipo de aquecimento	
	Indireto L vinhaça/L etanol	Direto L vinhaça/L etanol
5	16,65	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: FERNANDES (2003)

Assim, para uma destilaria fictícia que produza 1.000 m³/dia de etanol, dependendo do grau alcoólico do vinho e do tipo de aquecimento, o volume de vinhaça produzido pode variar de 325 m³/h a 815 m³/h. O aumento do grau alcoólico do vinho pode ser obtido através da fermentação do mosto com maiores concentrações de açúcares, o qual é obtido através da evaporação do caldo destinado à fermentação. A primeira alternativa para redução do volume da vinhaça é a operação de fermentações com vinhos de grau alcoólico maiores.

Em março de 2005, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) homologou a norma técnica P4. 231 – Vinhaça – Critérios e Procedimentos para Aplicação no Solo Agrícola. Essa norma baseia-se nas legislações federal e estadual e nas normas da ABNT e determina dentre os critérios e procedimentos que a concentração máxima de potássio no solo não poderá exceder 5% da Capacidade de Troca Catiônica – CTC. Caso esse limite seja atingido, a aplicação da vinhaça fica restrita em função da extração média pela cana de açúcar, que é de 185 kg de K₂O por hectare por corte.

A produção atual de etanol chegou a 27,5 bilhões de litros na última safra 2013/2014 (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR - UNICA, 2014), representando também um aumento gigantesco na produção de vinhaça. A Figura 2 mostra a evolução da produção de etanol desde 1990 até os dias atuais segundo dados da UNICA. Considerando a produção de vinhaça dentro da proporção média de 13 litros por litro de etanol, pode-se inserir no mesmo gráfico a evolução da geração de vinhaça.

2.2.1 Comparação das propriedades físico-químicas entre as vinhaças

A tabela 4 demonstra um comparativo entre a vinhaça concentrada (VC) e a vinhaça não concentrada (VNC). Onde podemos verificar alguns parâmetros físico-químicos considerados relevantes na caracterização das vinhaças, principalmente da VC, em se tratando de um subproduto constatado como fertilizante que será destinado à fertirrigação das lavouras de cana-de-açúcar.

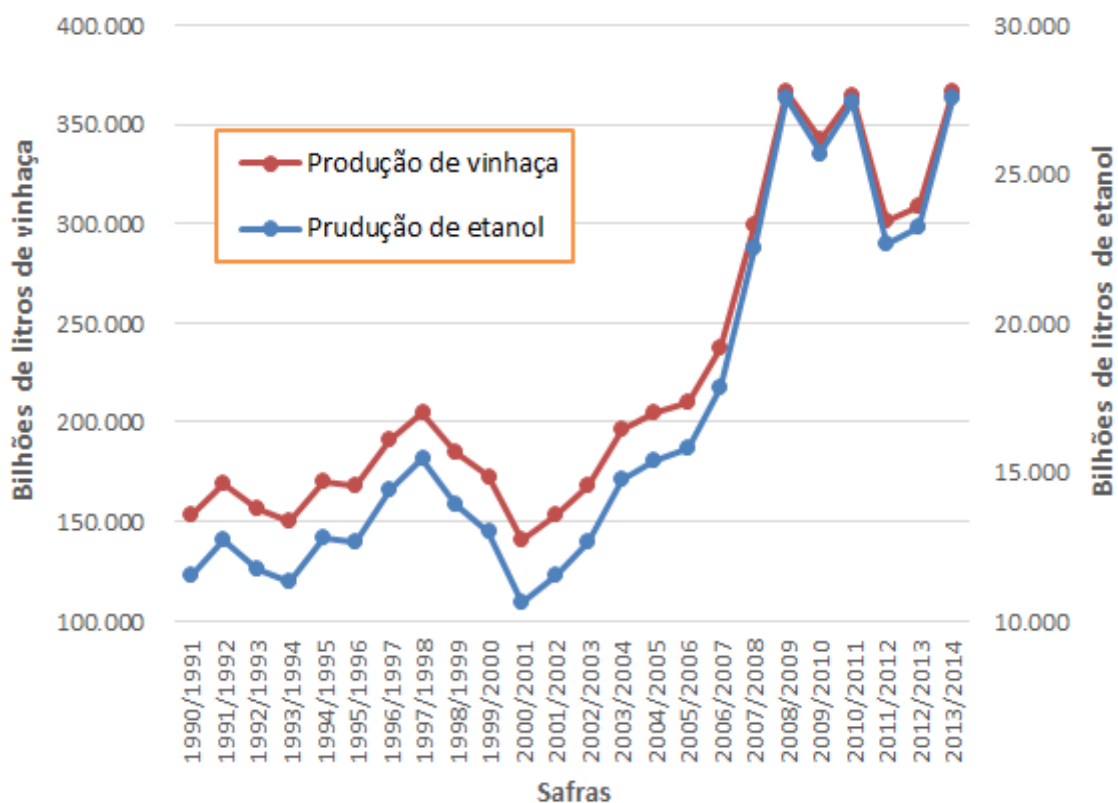


Figura 2 – Evolução da produção de etanol e vinhaça.

Tabela 4 – Análises químicas da vinhaça não concentrada (VNC) e da vinhaça concentrada (VC)

	pH	Ntotal g L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	Na ⁺ g L ⁻¹	K ₂ O g L ⁻¹	Ca ⁺² g L ⁻¹	Mg ⁺² g L ⁻¹	SO ₄ ⁻² g L ⁻¹
VC	4,7	6,0	46,6	15,8	3,0	64,0	33,9	1,0	1,4	6,2
VNC	4,4	0,9	24,9	3,0	1,0	7,9	3,6	0,36	0,39	1,8

Fonte: SILVA (2012)

Segundo Silva (2012), ficaram evidenciadas algumas diferenças no processamento de concentração da vinhaça, onde os resultados da vinhaça concentrada (VC) apresentaram grande variabilidade entre as amostragens para alguns dos elementos determinados. Além disso, amostras retiradas na mesma usina, porém em dias diferentes, também apresentaram variações na concentração dos elementos. As médias que apresentaram alto coeficiente de variação foram: NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, Na⁺ e SO₄⁻² conforme tabela 5.

Tabela 5: Composição química de dez amostras de vinhaça concentrada coletadas na Usina I e II no período compreendido entre 2010 e 2011.

Amostra	Usina	pH	CE	Dureza	Ntotal	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	PO ₄ ⁻²	RNF	DBO	DQO
1	I	4,7	49,8	29,95	3,7	48	2,3*	1*	61,9	33,3	2,9	5,2	18,3	1,7	56		
2	I	4,2	38,7	25,91	1,8	22,90	4	1*	80,6	23,3	3,1	4,4	16,2	1,3	19		
3	I	4,7	49,2	8,5	6	466	15,8	3	6,4	3,39	1,03	1,44	6,2	0,6	30		
4	I	4,2	40,8	33,5	2,4	27,1	5,9	1*	75,6	24,4	5	7,4	22,2	1,3	19		
5	I	4,2	57,4	19,48	1,64	144,5	7,50	2	49,4	18,8	2,28	3,37	2,04	2,9	59	132	21,8
6	I	5,1	53,3	19,27	5,8	378,90	22	5,5	74,8	21,89	2,31	3,3	12,1	2,98	61,5	150	27,5
7	I	4,7	71,3	34,06	3,98	134,9	2,4	0,8	581,5	20,97	4,03	5,83	18,63	2,23	82,5	145	24,3
8	II	4,5	40,5	11,59	1,95	212,7	4,4	1,3	252,7	22,04	1,35	2	2,02	1,31	42,8	75	13,1
9	II	5,3	41,9	18,71	2,7	99,6	1*	1*	62,1	15,82	2,98	2,73	9,79	1,28	45	85	14,4
10	II	5,3	42,4	17,45	2,92	112,2	1*	1*	54,3	17,09	2,47	2,74	10,2	1,28	52	85	15
Média		4,7	48,53	21,84	3,29	155,62	6,53	1,76	129,93	20,1	2,74	3,84	11,77	1,69	46,68	112	19,35
DPM		0,1	0,16	0,33	0,38	0,59	0,84	0,59	0,88	0,25	0,31	0,39	0,49	0,36	0,33	0,27	0,27
CV(%)		7,1	15,80	33,01	38,46	59,03	84,13	59,32	88,41	25,17	31,22	38,88	48,59	36,23	33,25	27,08	26,80

RNF = resíduo não filtrado; DBO = demanda bioquímica de oxigênio; DQO = demanda química de oxigênio; DPM = desvio padrão da média; CV = coeficiente de variação. * Valores iguais a 1 estão abaixo do limite de detecção

Fonte: SILVA (2012)

Avaliando-se os dados individuais e valores médios da DQO e DBO da tabela 5, nota-se valores maiores da DBO em relação à DQO, o que não nos parece tecnicamente lógico e tem necessidade de mais informações do autor sobre o caso.

A composição da vinhaça é variável em função de diversos fatores. Quando se utiliza o caldo da cana para fermentação, a vinhaça obtida é menos concentrada do que a vinhaça do mosto de melaço ou do mosto misto. A variedade de cana, a maturação, o tempo de processamento da cana na usina, a fertilidade do solo onde a cana estava plantada são fatores que interferem na qualidade da matéria prima e por consequente, nas características do resíduo (SILVA, 2012).

É possível que o coeficiente de variação elevado para teor de Na⁺ deva-se à limpeza do equipamento utilizado na concentração da VNC, pois é comum a utilização de soda cáustica (NaOH) periodicamente. Considerando que as amostragens foram realizadas em dias diferentes, a grande variação entre os resultados (6,4 a 581 g L⁻¹) pode estar relacionada aos resíduos de Na⁺ proveniente do produto utilizado na limpeza (SILVA, 2012).

Quanto aos teores de CaCO₃ expresso pela dureza (g L⁻¹), verifica-se correlação significativa com o K⁺, Ca⁺², Mg⁺², SO₄⁻² conforme demonstrado na figura

3, pois os valores dessa variável aumentam em função, principalmente, da presença de cátions bivalentes, assim quanto maior a concentração de Ca^{+2} e Mg^{+2} , maior é o valor da dureza do resíduo (SILVA, 2012).

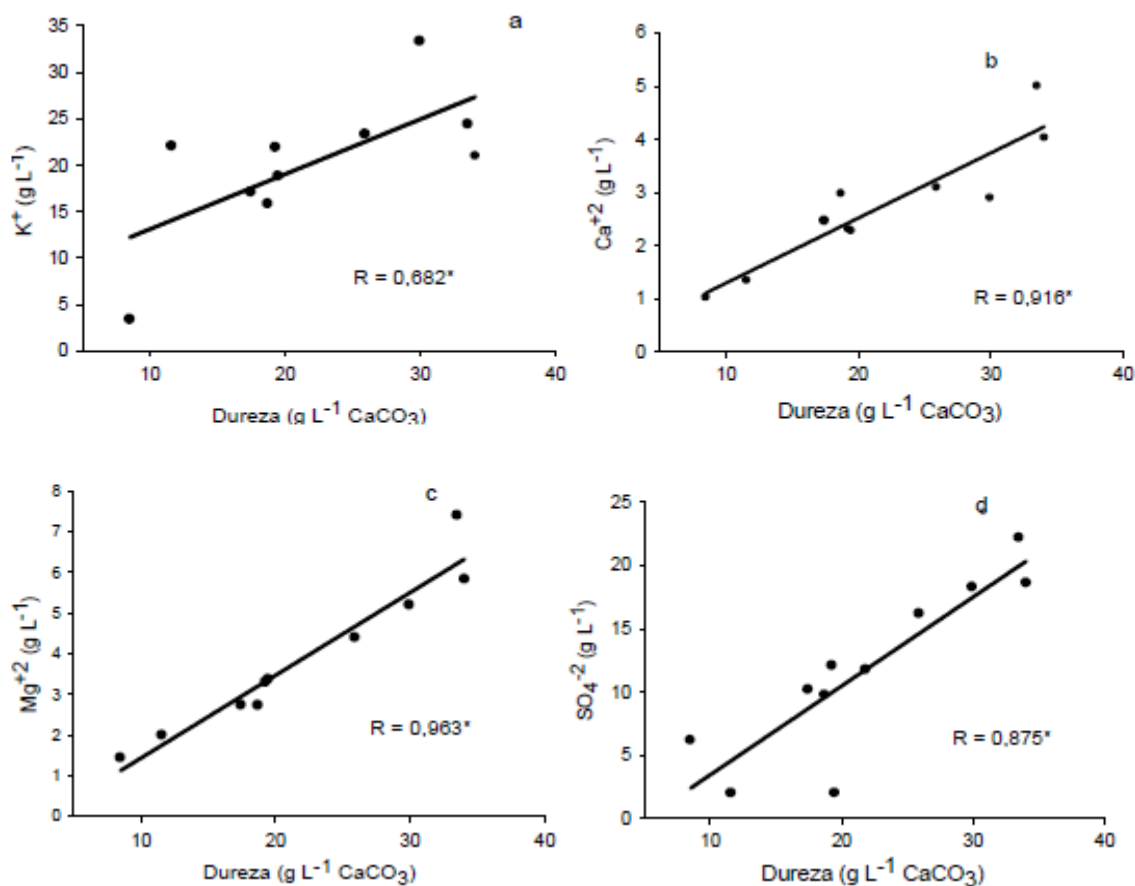


Figura 3: Correlação entre os valores de dureza (g L^{-1}) e os teores de o K^+ (a), Ca^{+2} (b), Mg^{+2} (c), SO_4^{-2} (d) da vinhaça concentrada. Fonte: SILVA (2012).

2.2.2 Aplicação da vinhaça no solo

Segundo Silva (2012), foi verificado que após a aplicação da vinhaça no solo, houve risco de NO_3^- poluir a água subterrânea, pois apesar de pequena, foi observada lixiviação de íons abaixo da profundidade de 1,20 m. Verificado também a influência da aplicação de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça/ano por 15 anos e foi observado que o nitrogênio lixiviado na forma de NO_3^- aumentou na água subterrânea, embora os teores fossem abaixo do limite máximo recomendado para o uso humano. Avaliado também a influência das doses de 150 a $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça nos aquíferos de Botucatu e concluiu-se que pode haver risco de contaminação da água subterrânea pelo Cl^- .

A concentração de K^+ nos tratamentos com vinhaça não foram superior em valor ao tratamento controle, mesmo quando aplicado elevadas quantidades na linha de cana ($30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), indicando a capacidade do solo em reter esse nutriente. Esse fato pode ser atribuído ao alto teor de argilatabela 6, onde as concentrações de íons na solução lixiviada dependem das características do solo, o qual tendo elevado teor de argila, mesmo na maior dose, é capaz de absorver parte do K^+ existente na vinhaça(SILVA, 2012).

Tabela 6: Análise química,física e granulométrica das amostras de solo coletadas nas profundidades entre 0-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 m.

Profundidade cm	pH CaCl ₂	MO g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al mmol _c dm ⁻³	CTC	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	K/CTC %	Argila	Silte	Areia	DS g cm ⁻³	Curva Retenção (Bar)		
																				0,1	0,33	15
0-0,20	5	34	10	0,2	7	2	40	49	14	0,7	3	26	15	1	0,41	576	179	243	1,43	0,46	0,42	0,33
0,20-0,40	5	30	9	0,2	16	6	38	60	67	0,3	3	20	10	0	0,41	675	161	164	1,41	0,43	0,38	0,29
0,40-0,60	5	24	4	0,1	13	4	31	48	70	0,3	2	14	5	0	0,2	675	173	152	1,30	0,45	0,36	0,29

MO=matéria orgânica; CTC=capacidade de troca de cátion; K/CTC=saturação de K^+ na CTC; DS=densidade aparente do solo. **Fonte:** SILVA (2012).

Em resumo, apesar de não ser possível tirar conclusões devido às dificuldades de coleta da solução percolada e da variabilidade elevada entre as amostragens, de maneira geral, os resultados obtidos mostraram que a aplicação da vinhaça no solo não acarreta grandes preocupações quanto às questões ambientais, pois os valores do percolado estão abaixo dos teores máximos permitidos pela legislação vigente(SILVA, 2012).

2.2.3 Tratamentos para a vinhaça

Existem algumas alternativas para o tratamento da vinhaça como as lagoas de estabilização, filtros biológicos (digestão aeróbia e anaeróbia),tratamento físico-químico, produção de proteína, produção de metano, lançamento “in natura” na lavoura, reciclagem industrial, osmose reversa, evaporação,incineração e lagoas de aguapé (CARVALHO, 2010). A Figura 4 apresenta foto de uma lagoa de vinhaça.

Paoliello (2006) menciona as seguintes alternativas para o tratamento da vinhaça: reciclagem, fertirrigação, tratamento físico-químico, utilização como complemento de rações animais, produção de proteína celular, concentração e combustão, produção de metano e produção de energia elétrica.



Figura 4– Foto de uma lagoa de vinhaça. Fonte: CARVALHO (2010).

A reciclagem da vinhaça tem o objetivo de diminuir o volume da mesma através de decantação, removendo parte da matéria orgânica e diminuindo a carga poluidora. A vinhaça também pode ser utilizada para diluir o melaço para compor o mosto da fermentação, ajustando a concentração de açúcares do mesmo e promovendo a diminuição do volume de vinhaça destinada à lavoura. Porém, a utilização da mesma na fermentação apresenta problemas operacionais, decontaminação, de inibição e de perda de rendimento e produtividade, o que inviabiliza a utilização desta técnica.

A fertirrigação é praticada por todas as usinas de etanol e tem a função de irrigar a vinhaça sobre a lavoura de cana, melhorando as propriedades físicas e químicas do solo, bem como a sua fertilidade e aumentando a microflora. Porém, a aplicação da vinhaça “in natura” no solo deve ser estudada e controlada de acordo

com as características regionais, visto à elevada carga orgânica que é destinada à lavoura, além de poder causar odores e proliferação de moscas. Altas taxas de aplicação podem comprometer a qualidade da cana para produção de açúcar, poluição do lençol freático, salinização do solo, dentre outros.

Experimentos com tratamento físico-químico da vinhaça não tem obtido sucesso. A sedimentação da vinhaça, mesmo com a adição de agentes coagulantes, não tem apresentado bons resultados, além de produzir odores devido à fermentação anaeróbia do sedimento (PAOLIELLO, 2006).

Carvalho (2010) menciona realização de experimento visando estudar o tratamento físico-químico da vinhaça através da técnica da coagulação e floculação, utilizando como agentes coagulantes o óxido de cálcio e o sulfato ferroso. O experimento apresentou resultados para a remoção de DQO na faixa de 30% a 52%, verificando que os melhores resultados ocorrem para um pH mais alto, exceto quando se utiliza os dois agentes coagulantes combinados.

Segundo Paoliello (2006), alguns estudos propõem a utilização da vinhaça como complemento para ração de animais, como ruminantes, aves e suínos. Embora haja demonstrações de aumento da produção de leite, os mesmos estudos relatam o efeito laxativo que a ração complementada com vinhaça pode causar ao gado.

Existem também estudos para a utilização da vinhaça como substrato para a realização de fermentação aeróbia por microrganismos, visando a produção de proteína para consumo humano e animal. Porém, tal processo ainda necessita de aprimoramentos, principalmente com relação ao conceito dos fermentadores (PAOLIELLO, 2006).

Existem também estudos que indicam a utilização da osmose reversa para o tratamento da vinhaça. Esse processo utiliza membranas poliméricas para obtenção da vinhaça concentrada, sendo uma alternativa à evaporação e que apresenta um menor consumo energético. No processo de osmose, o solvente atravessa uma membrana seletiva, de um meio menos concentrado para um meio mais concentrado visando equilibrar as concentrações. O fluxo de solvente leva à formação de uma diferença de pressão entre as soluções, denominada de pressão osmótica. No processo de osmose reversa, o fluxo de solvente é na direção contrária, ou seja, o solvente flui do meio mais concentrado para o meio menos concentrado,

através de uma pressão maior que a pressão osmótica e que é aplicada na solução mais concentrada (CARVALHO, 2010).

A maioria dos trabalhos científicos sobre tratamento da vinhaça relata experimentos ou estudos de caso envolvendo a fertirrigação e a biodigestão anaeróbia.

2.2.4 Fertirrigação da vinhaça

Segundo Ludovice (1997), as primeiras experiências da aplicação da vinhaça diretamente na lavoura de cana-de-açúcar datam de 1918 em Pernambuco com resultados não satisfatórios. Ludovice (1997) conduziu experimento com objetivo de verificar se o transporte de vinhaça por canal condutor principal para irrigação altera as características da água subterrânea. Concluiu-se que houve infiltração de vinhaça no canal, poluindo o lençol freático devido à diminuição do poder de remoção de nutrientes do solo ao longo do tempo. A Figura 5 apresenta foto de canal condutor de vinhaça.

Longo (1994) avaliou os efeitos da aplicação da vinhaça "in natura" e biodigerida nas propriedades físicas, químicas e bioquímicas de um latossolo vermelho amarelo, concluindo que ocorreram melhorias nos atributos físicos, químicos e bioquímicos do solo estudado, diminuindo sua densidade, aumentando sua porosidade total e a matéria orgânica, dentre outros efeitos. Porém, recomendou que outros estudos fossem realizados para se analisar o efeito prolongado da vinhaça no solo, no lençol freático e em aquíferos subterrâneos.



Figura 5– Foto de um canal condutor de vinhaça. Fonte: CARVALHO (2010).

Realizou-se experimento com o objetivo de avaliar a qualidade do lençol freático de uma área cultivada com cana-de-açúcar e fertirrigada com vinhaça ao longo do tempo a uma taxa de aplicação de 300 m³/ha.ano. Chegou-se à conclusão de que o solo apresentou-se como meio eficiente de tratamento, uma vez que removeu grande parte da DBO e DQO da vinhaça. Obteve-se grande variabilidade dos resultados obtidos para a qualidade do lençol freático em virtude das diferentes características dos postos monitorados e pela forma e disposição no solo, porém foi possível concluir que a qualidade da água do lençol freático foi afetada. A Figura 6 ilustra a fertirrigação com vinhaça de lavoura de cana-de-açúcar (CARVALHO, 2010).

Gariglio (2008) realizou experimentos visando avaliar os efeitos da aplicação da vinhaça nas características físicas e químicas do solo e concluiu que não houve alteração de matéria orgânica e da concentração de nitrogênio total com a aplicação da vinhaça nos solos estudados, ocorrendo aumento da condutividade elétrica e das concentrações de potássio, cálcio e magnésio. Gariglio (2008) recomendou a reavaliação da legislação ambiental vigente devido ao grande risco à qualidade do solo e das águas subterrâneas.



Figura 6– Foto da aplicação da vinhaça “in natura” na lavoura da cana-de-açúcar. Fonte: CARVALHO (2010).

2.2.5 Biodigestão anaeróbica da vinhaça

A biodigestão anaeróbia tem sido mencionada como tratamento da vinhaça em diversos trabalhos científicos. A decomposição anaeróbia é capaz de reduzir o potencial poluidor da vinhaça, normalizando a DBO e o pH e de converter a matéria orgânica (DBO e DQO) em pequena quantidade de lodo, utilizado como fertilizante e grande quantidade de biogás, cujos componentes principais são o metano e o dióxido de carbono. O gás pode ser queimado com o objetivo de gerar energia elétrica.

Um reator de digestão anaeróbia pode ser considerado como um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham conjuntamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas. O consórcio de microrganismos ativos no tratamento anaeróbio, para remoção de matéria orgânica, realiza um processo complexo envolvendo muitas espécies de bactérias, atuando de forma simbiótica, evidenciando algumas etapas intermediárias. As reações bioquímicas principais que ocorrem no processo de biodigestão anaeróbia caracterizam os grupos de microrganismos predominantes e podem ser divididas em

quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese, e metanogênese, conforme Figura 7 (CARVALHO, 2010).

3.2.5.1 Hidrólise

O processo de degradação da matéria orgânica inicia-se com a hidrólise do material presente no efluente, gerando compostos mais simples, que possam ser assimilados pelos microrganismos, esta etapa também é chamada de despolimerização. Normalmente os compostos orgânicos complexos (polímeros orgânicos) são transformados em monômeros ou dímeros, como açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, etc. Esta conversão é executada por enzimas extracelulares que são excretadas pelas bactérias fermentativas hidrofílicas, chamadas hidrolasas. Na degradação de muitos compostos poliméricos há possibilidade da etapa hidrolítica ser mais lenta que as demais etapas, sendo esta a que limita o processo global de digestão anaeróbia. Os principais fatores que influenciam na hidrólise, são: pH, temperatura, tempo de retenção, tamanho e distribuição das partículas (CARVALHO, 2010).

3.2.5.2 Acidogênese

Esta etapa acontece quando a matéria orgânica dissolvida é biodegradada até ácidos graxos voláteis (ácido acético, propiônico, butírico), hidrogênio, dióxido de carbono e álcoois por uma população de bactérias heterogêneas. Dentre os microrganismos presentes nesta etapa estão as bactérias acidogênicas que são as predominantes e ainda fungos e protozoários. Estas bactérias são consideradas de crescimento rápido, tempo de duplicação mínimo de 30 minutos. Nesta etapa, ocorre principalmente a reação que produz ácido acético, as demais reações são as respostas das bactérias ao acúmulo de hidrogênio durante as perturbações de carga do sistema (CARVALHO, 2010).

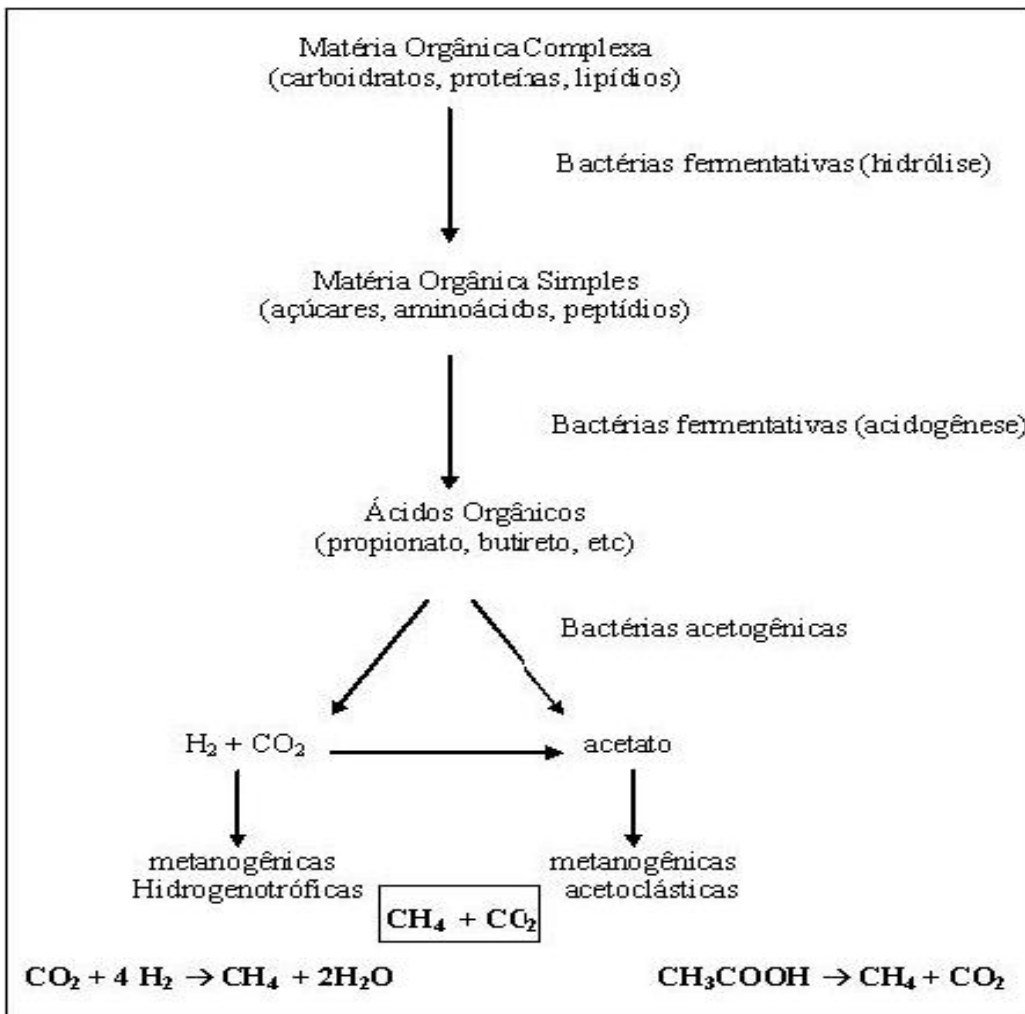


Figura 7- Esquema dos processos bioquímicos da digestão anaeróbia. Fonte: PERON (2007).

3.2.5.3 Acetogênese

Nesta etapa os produtos formados anteriormente são oxidados para acetato, hidrogênio e gás carbônico, com o objetivo de fornecer substrato apropriado aos microrganismos metanogênicos. Em geral isto acontece a partir de dois mecanismos: o primeiro a acetogênese de hidrogenação que produz ácido acético como um só produto final de fermentação de hexose ou de CO₂ e H₂ e o segundo chamado de acetogênese de desidrogenação que converte os ácidos graxos de cadeia curta e longa em ácido acético por um grupo de bactérias acetogênicas. O grupo bacteriano desta etapa tem um crescimento relativamente lento, tempo de duplicação mínimo de 1,5 a 4 dias. As reações que produzem são

muito mais complexas energeticamente e são interrompidas facilmente por acúmulo de gás hidrogênio dissolvido no meio. De todos os produtos produzidos por estes microrganismos somente o acetato e o hidrogênio podem ser assimilados pelas bactérias metanogênicas (CARVALHO, 2010).

3.2.5.4 Metanogênese

O processo de degradação do substrato é finalizado por esta etapa, que consiste na transformação dos produtos formados (com um ou dois átomos) anteriormente em metano e dióxido de carbono. A formação do metano é executada por dois mecanismos distintos. O primeiro consiste na formação do metano a partir de CO_2 e H_2 pelos microrganismos do grupo de arqueas hidrogenotróficas. Estes desenvolvem rapidamente com um tempo de duplicação mínimo de 6 horas e controla o potencial redox do processo, os traços de hidrogênio que ficam no meio regulam a velocidade total de produção de ácidos pelas bactérias acidogênicas, e a composição da mistura formada. O hidrogênio também controla a velocidade de reação em que os ácidos propiônico e butírico são convertidos a ácido acético, ou seja, regulam a formação de ácidos voláteis. O segundo mecanismo consiste na produção do metano a partir do acetato, realizada pelos microrganismos do grupo de arqueas acetoclásticas, que se desenvolvem muito lentamente com um tempo de duplicação mínimo de 2 a 3 dias e influenciam no pH do sistema pela eliminação do ácido acético e formação de dióxido de carbono, além do mais são responsáveis pela maioria do metano produzido (CARVALHO, 2010). A Figura 8 mostra um esquema básico da biodigestão da vinhaça.

Um reator de biodigestão que é bastante utilizado é o UASB (“Upflow Anaerobic Sludge Blanket”), reator anaeróbico de fluxo ascendente em camadas de lodos. A Figura 9 mostra um esquema do reator UASB, uma boa opção tecnológica para a biodigestão da vinhaça. O reator UASB consiste basicamente de um tanque, constituído de um compartimento digestor localizado na base, contendo o leito de lodo biológico e no topo está localizado um decantador precedido por um sistema de separação de gás.

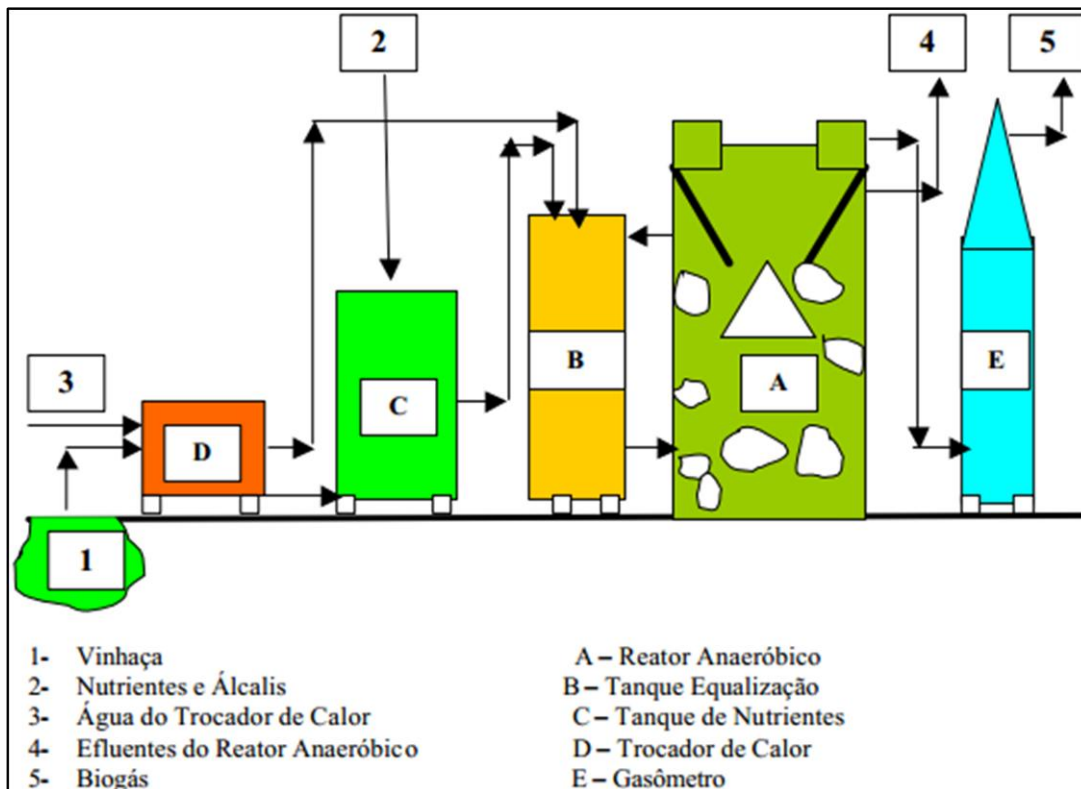


Figura 8 - Esquema Básico da Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça Fonte: GRANATO(2003).

O efluente a ser tratado distribui-se uniformemente na base do reator, passando pela camada de lodo, na qual a matéria orgânica é transformada em biogás. O gás produzido é impedido pelos defletores de se dirigir ao sedimentador, entrando apenas em algumas regiões do reator. A porção de lodo que atinge o decantador é separada, retornando à base do reator e o efluente é uniformemente retirado da superfície do mesmo. No caso de resíduos concentrados como a vinhaça, a produção livre de biogás é alta em relação às sobras dissolvidas. A proporção de CH_4 no biogás produzido é de 55 a 65%, sendo o restante constituído principalmente por CO_2 . A taxa de carga orgânica poluente por metro cúbico de etanol processado é de aproximadamente 500 kg de DQO. Com isso, determina-se que a produção de metano por metro cúbico de etanol é de 185 m^3 .

A biodigestão da vinhaça pode produzir 971 MWh de energia por safra em uma usina que produza $600 \text{ m}^3/\text{dia}$ de etanol, o que significa 5,75% do total de energia consumida pela usina ou uma redução de 62,7% na aquisição de energia pela usina junto à concessionária (GRANATO, 2003).

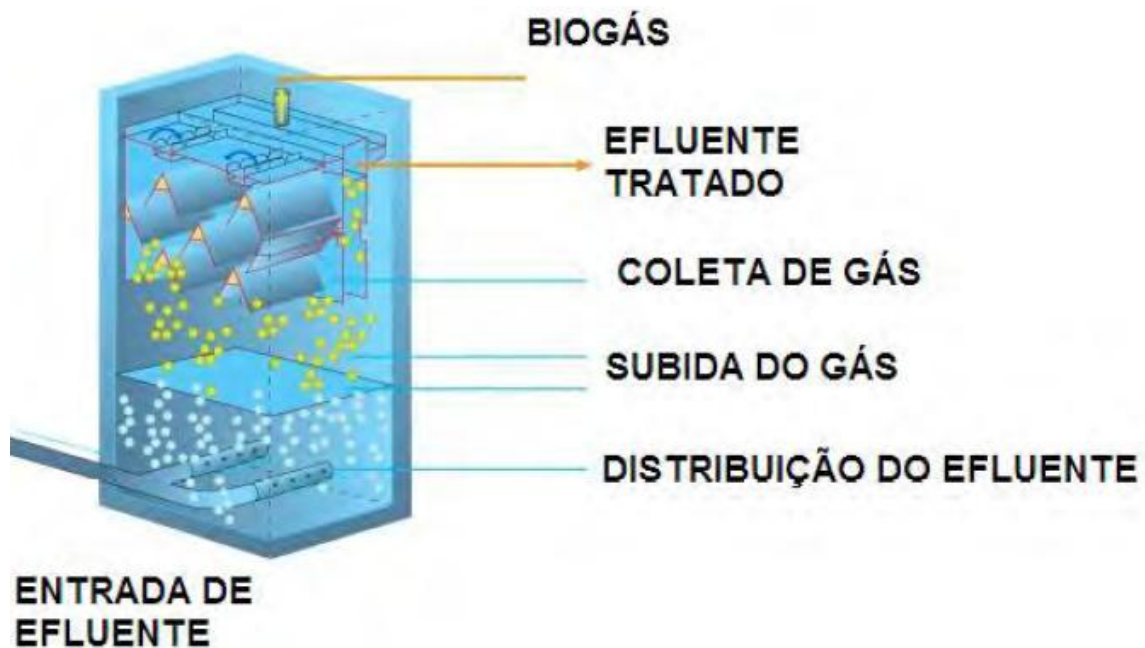


Figura 9 - Esquema de um reator UASB. Fonte: CARVALHO (2010).

Siqueira (2008) realizou experimento, conduzindo a degradação anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar em reator de leito fluidizado, obtendo eficiências de 51% a 70% na remoção de DQO da vinhaça e um rendimento médio de produção de metano de $0,386 \text{ m}^3/\text{kg}$ DQO removida. Ribas (2006) obteve até 79% de remoção de DQO da vinhaça em experimento realizado em reator UASB, enquanto que Viana (2006) obteve até 92%.

2.2.6 Transporte da vinhaça até os canaviais

Silva (2009) elaborou trabalho visando analisar os custos do transporte de vinhaça em uma usina do interior de São Paulo, em que tratou dos principais sistemas de distribuição da vinhaça. A Figura 10 apresenta um esquema desses sistemas.

As áreas de segurança são locais de depósito de vinhaça para fins de armazenamento provisório e que não tem a finalidade agrícola e sim de evitar o descarte da vinhaça ao meio ambiente. Tais locais devem ser impermeabilizados com geomembrana impermeabilizante ou similar, como mantas

de PEAD (polietileno de alta densidade) ou asfáltica para evitar a infiltração através do solo conformemostrado na Figura 11.

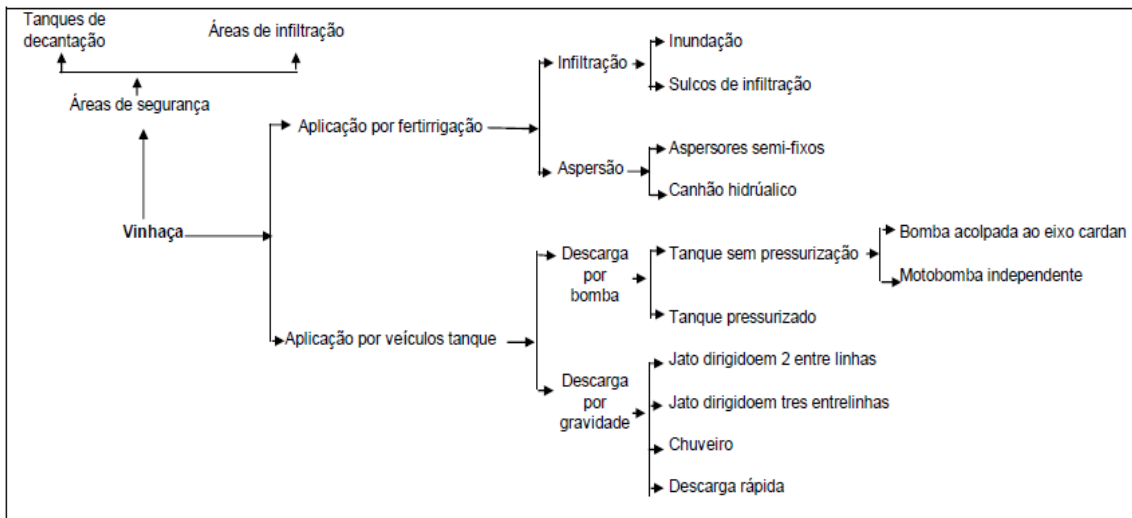


Figura 10- Representação esquemática dos diversos sistemas de aplicação da vinhaça “in natura” na cultura da cana de açúcar. Fonte: SILVA (2009).



Figura 11 - Depósito de vinhaça impermeabilizado. Fonte: CARVALHO (2010).

De acordo com Silva (2009), a fertirrigação pode ser realizada por inundação ou infiltração, que são técnicas de distribuição por gravidade, ou por técnicas que recalam a vinhaça como a aspersão com equipamento semi-fixo ou a

aspersão com canhão hidráulico. A vinhaça também pode ser distribuída aos canais através de caminhões tanque, nesse caso, sendo descarregada por gravidade ou por bombas.

Na fertirrigação por inundação a vinhaça é alimentada na parte mais alta do terreno através de um canal. O terreno é inundado de forma bastante heterogênea e irregular por gravidade, sem controle da quantidade de vinhaça aplicada. Tal método pode favorecer o aparecimento de poças, prejudicando a cana e causando problemas de salinização do solo.

Na fertirrigação por infiltração, a distribuição da vinhaça é realizada por diversos canais principais trapezoidais ou triangulares distanciados entre si de 200 m a 500 m e com declividades máximas de 0,5 % a 1,0 %. O controle da dosagem aplicada é difícil e, além disso, o tipo de solo e sua topografia limitam o uso dessa técnica. A Figura 12 mostra a distribuição da vinhaça por gravidade.

A fertirrigação por aspersão com equipamento semi-fixo utiliza moto bombas, geralmente movidas a óleo diesel, para recalcar a vinhaça a um sistema de canais principais e tubulações de alumínio com acoplamento tipo rápido. Às tubulações finais, são acoplados aspersores que operam à pressão de até 6 kgf/cm² e com vazão de até 80 m³/h. Essa técnica possibilita o controle da dosagem de aplicação, homogeneidade de distribuição e não exige o preparo do solo em desnível. A Figura 13 mostra a distribuição por aspersores semi-fixos.



Figura 12 - Distribuição da vinhaça por gravidade. Fonte: CARVALHO (2010).



Figura 13 - Distribuição da vinhaça por aspersores semi-fixos. Fonte: CARVALHO (2010).

A fertirrigação por aspersão com canhão hidráulico consiste de uma motobomba acoplada a um aspersor tipo canhão, montado sobre chassis com rodas, conforme mostrado na Figura 14. O sistema é estacionário e succiona a vinhaça decanais espaçados entre si aproximadamente de 100 m. Não há necessidade de preparo do solo, pode ser utilizado em terrenos com declive acentuado e qualquer tipo de solo, em todos os ciclos e fases da cultura, além de apresentar baixo custo operacional e controle perfeito da quantidade de vinhaça aplicada. Porém, requer alta pressão de serviço, um sistema de distribuição de canais de sucção adequados, mão-de-obra operacional adequada, além de não apresentar uniformidade de chuva devido às variações instantâneas da direção do vento.

A aplicação da vinhaça também pode ser feita através de caminhões tanque em conjunto com outras técnicas como a utilização de bombas ou distribuição por gravidade. Os caminhões permitem a aplicação da vinhaça com considerável uniformidade, mas exigem a manutenção de uma frota veicular e estradas em bom estado. Os caminhões apresentam geralmente tanques em fibra de vidro reforçado (PRFV) e com volumes que variam de 7 a 18 m³. As principais desvantagens desse sistema são a compactação do solo causada pelos caminhões, inviabilidade de diluição da vinhaça e dificuldades de aplicação em dias de chuva.



Figura 14 - Distribuição da vinhaça por canhão hidráulico. Fonte: CARVALHO (2010).

Segundo Silva (2009), o uso de caminhões tanques associados à distribuição por gravidade utiliza sistema de barras aplicadoras, o qual apresenta variação da uniformidade de aplicação devido às variações da carga hidráulica. Como no início da aplicação, o tanque está cheio, a pressão estática e a vazão são maiores que durante a aplicação e ao seu final, o que não garante a uniformidade da aplicação.

A associação de caminhões tanque com sistemas de bombeamento permite uma maior uniformidade da aplicação devido à pressão de recalque da bomba, porém, o fato de se ter que adquirir mais equipamentos além do caminhão tanque aumenta os custos de manutenção do sistema. A Figura 15 apresenta um esquema da associação de caminhões com bombas e a aplicação de caminhões através de barra aplicadora.

Silva (2009) conclui que quando as unidades industriais estão em um nível acima das áreas de aplicação de vinhaça, a distribuição da mesma através de adutoras por gravidade apresenta menor custo de mão de obra e eliminação do custo do combustível, resultando em um custo total de 95% inferior ao do transporte por caminhões.

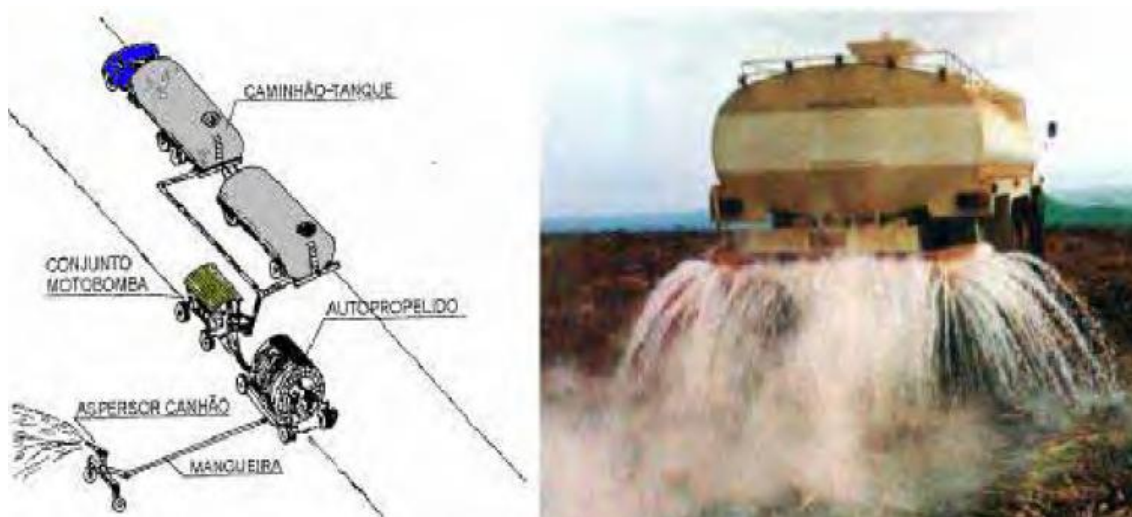


Figura 15 - Distribuição da vinhaça por caminhão em conjunto com moto bomba e por gravidade através de barra aplicadora. Fonte: CARVALHO (2010).

2.3 Evaporação da vinhaça

Os primeiros registros sobre evaporadores de vinhaça datam de 1954, quando a empresa austríaca Vogelbusch instalou um sistema concentrador que se utilizava de evaporadores inclinados tipo termo-sifão. Pouco tempo depois, a mesma empresa desenvolveu o evaporador fallingfilm, ou película fina que se utiliza do princípio de evaporação de filme descendente. No Brasil, as duas primeiras instalações para concentração da vinhaça foram instaladas em 1978. Uma delas foi instalada na Usina Tiúma em Pernambuco e foi projetada por uma empresa nacional chamada Borag, sendo integrada à destilaria de álcool da usina. A instalação teve muitos problemas de incrustações e as paradas para limpeza dificultavam a operação da destilaria. Atualmente, tanto o sistema de concentração quanto à usina estão desativados (FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA, 2010).

A outra unidade foi instalada na Usina Santa Elisa em São Paulo e foi fabricada pela empresa brasileira Conger sob licença da Vogelbusch. A unidade ficou parada em função do alto consumo de energia, mas em 1999 com a implantação do sistema de cogeração de energia elétrica na usina, a unidade passou a funcionar continuamente, produzindo cerca de 3 m³/h de vinhaça concentrada. O sistema permitiu que a usina reduzisse o custo de transporte da vinhaça para as regiões mais afastadas e pudesse ter a flexibilidade de dosar a

concentração de cada aplicação de vinhaça conforme as características do solo. Para a aplicação da vinhaça concentrada ao solo, foi desenvolvido um caminhão tanque com bomba de pressurização e barra aplicadora de sete metros de largura que possibilitou a dosagem em cerca de 5.000 ha. (BARBOSA, 2006).

Em 1984, a Destilaria Santa Izabel, em Novo Horizonte, São Paulo, instalou um conjunto de evaporação de vinhaça que permitia uma redução de até cinquenta por cento do volume total de vinhaça produzido, que era distribuído por caminhões como fertiirrigação na lavoura. Atualmente, a empresa brasileira Dedini é detentora da licença da Vogelbusch para fabricação dos evaporadores de vinhaça e em consórcio com as empresas Siemens e Chemtech comercializou uma planta completa de destilação de álcool integrada com evaporadores de vinhaça para a empresa petrolífera da Venezuela PDVSA. A unidade tem capacidade de produção de 8,5 milhões de litros de álcool por ano (FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA, 2010).

2.4 Processo da evaporação

A evaporação é uma operação unitária que é largamente utilizada nos diversos ramos da indústria química e de processos que tem o objetivo de obter produtos mais concentrados, ou seja, com menor percentual de um soluto volátil, na maioria das vezes a água. Os evaporadores são utilizados na indústria alimentícia, de papel e celulose, sucroalcooleira, de polímeros, de fertilizantes, de compostos orgânicos e inorgânicos, dentre outras.

A energia para evaporação, na maioria das vezes, é obtida do vapor saturado proveniente das caldeiras, o qual não entra em contato direto com o produto que se deseja evaporar. Nas usinas sucroalcooleiras, a evaporação para produção de açúcar utiliza vapor proveniente das turbinas de geração elétrica, sendo saturado e com pressão de 1,5 kgf/cm² manométrica. Utiliza-se o termo vapor vivo para designar o vapor de aquecimento de um evaporador e vapor vegetal para designar o vapor de água proveniente da evaporação. A Figura 16 apresenta um esquema típico de um evaporador.

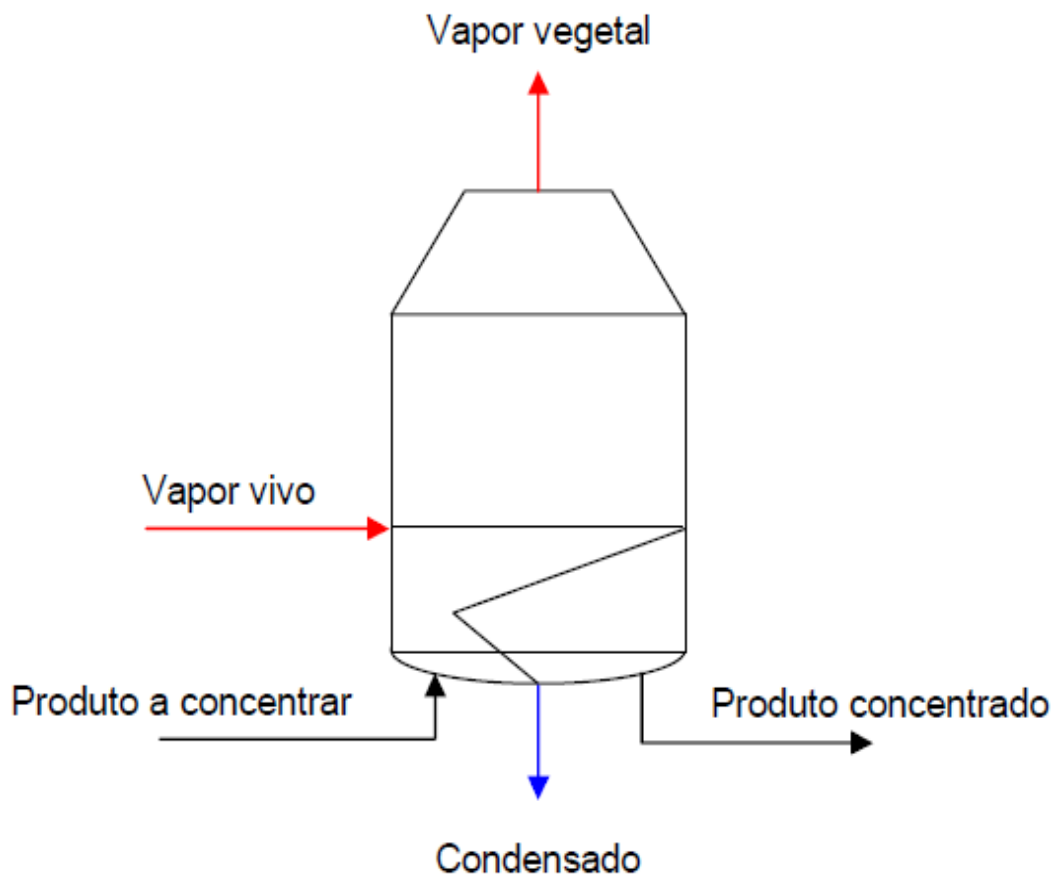


Figura 16. Esquema típico de um evaporador. Fonte: CARVALHO (2010).

Todo evaporador consiste em uma superfície de aquecimento onde ocorre a transferência de calor do fluido de aquecimento para o fluido de processo e de um meio onde ocorre a separação do vapor evaporado do fluido concentrado. O que difere os vários tipos de evaporadores é como a separação entre o vapor vegetal e o fluido concentrado é feita (FRANCO, 2001).

2.5 Principais tipos de evaporadores

2.5.1 Evaporador de múltiplo efeito específico para a vinhaça

O evaporador de concentração da vinhaça, também chamado de ECOVIN, mostrado na Figura 17, é definido pela sua capacidade de evaporação, número de efeitos e números de estágios. Este evaporador é projetado para

concentrar vinhaça na relação 10:1, removendo água que é condensada internamente e retirada pela bomba de condensado (GUARANI, 2011).



Figura 17. ECOVIN – Evaporador de concentração vinhaça de múltiplos efeitos. Fonte: GUARANI (2011).

Seus princípios básicos são: Efeito do vácuo na evaporação, efeito flash, princípio de névoa turbulenta, efeitos e estágios.

a) Efeito do vácuo na evaporação

A pressão exercida sobre os fluidos é responsável pela temperatura necessária para a evaporação. Na atmosfera, essa pressão é o peso da coluna de ar que está sobre os corpos, assim se removido o ar diminui-se a pressão e, conseqüentemente, a temperatura de evaporação, se pressurizado (injetando ar)

aumenta-se a temperatura de evaporação. Como em um evaporador desejam-se baixos níveis de temperatura e ainda assim promover a evaporação retira-se ar de seu interior realizando vácuo (GUARANI, 2011).

Na escala manométrica demonstrada na Figura 18, todos os valores evidenciados abaixo da pressão atmosférica chamam-se vácuo, ainda nessa escala o vácuo absoluto tem o valor de 29,92 inHg, 760 mmHg, 1 atm, ou ainda 1,01 bar (GUARANI, 2011).

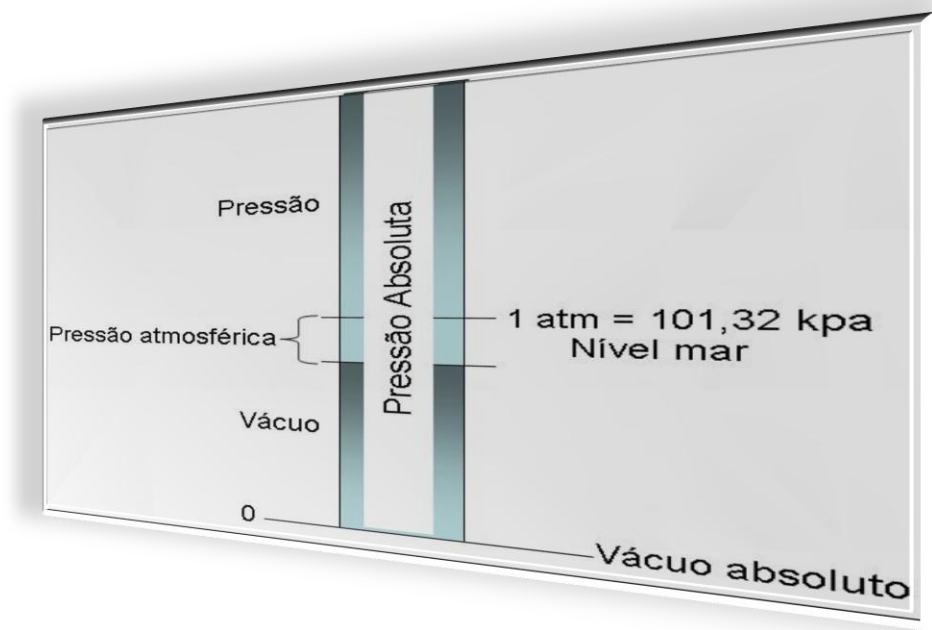


Figura 18. Escala manométrica. Fonte: GUARANI (2011).

b) Efeito flash

Na física, o flash é um fenômeno que ocorre quando há uma expansão súbita de um fluido. Neste caso, a passagem do produto através do Venturi de top cone a uma alta pressão para o vácuo no interior dos tubulões. Essa expansão além da perda de pressão causa perda de temperatura e aumento de volume, ocasionando um spray que é responsável pela distribuição do fluido nos tubos. Graças a este efeito é possível evaporar cerca de 2%, ainda, nos top cones. A Figura 19 mostra um esquema do efeito flash (GUARANI, 2011).



Figura 19. Representação esquemática do efeito flash. Fonte: GUARANI (2011).

c) Princípio de névoa turbulenta

Este efeito foi colocado em prática na década de 1960. A névoa turbulenta é formada nos top cones que, em contato com a parede dos tubos aquecidos é acelerada até velocidades altíssimas, devido à expansão térmica (próximas a velocidade do som). Causando assim pouco tempo de exposição ao calor, e devido à turbulência, pouca incrustação nas paredes (GUARANI, 2011).

d) Efeitos

O fluxo dos vapores nos corpos de evaporação recebe o nome de efeito. Sendo que o 1º efeito é sempre o tubulão onde se inicia a evaporação, é alimentado com vapor de baixa pressão (VE ou V1). Os demais efeitos são alimentados com o vapor do produto evaporado no efeito anterior, conhecido como vapor vegetal. Quanto maior o número de efeitos mais econômico será o ECOVIN (GUARANI, 2011).

e) Estágios

O fluxo de produto nos corpos de evaporação recebe o nome de estágio. Sendo que o 1º estágio é o 1º tubulão de passagem do fluxo de produto, e assim por diante, nos próximos estágios. O ECOVIN pode ter de 3 a 7 estágios (GUARANI, 2011).

Franco (2001) e Westphalen (1999) descrevem os principais tipos de evaporadores e os arranjos utilizados, dentre os quais, pode-se citar:

2.5.2 Evaporadores de múltiplos efeitos convencionais

Os evaporadores são grandes consumidores de energia, em vista disso, são utilizadas várias estratégias para se diminuir o consumo de energia, como o sistema de evaporação em múltiplos efeitos mostrado na Figura 20. Neste arranjo, um evaporador é montado sequencialmente ao outro, de modo que o vapor vegetal de um evaporador (primeiro efeito) é utilizado para aquecer outro evaporador (segundo efeito) e assim sucessivamente. O vapor evaporado no último efeito passa por um condensador, encerrando o processo.

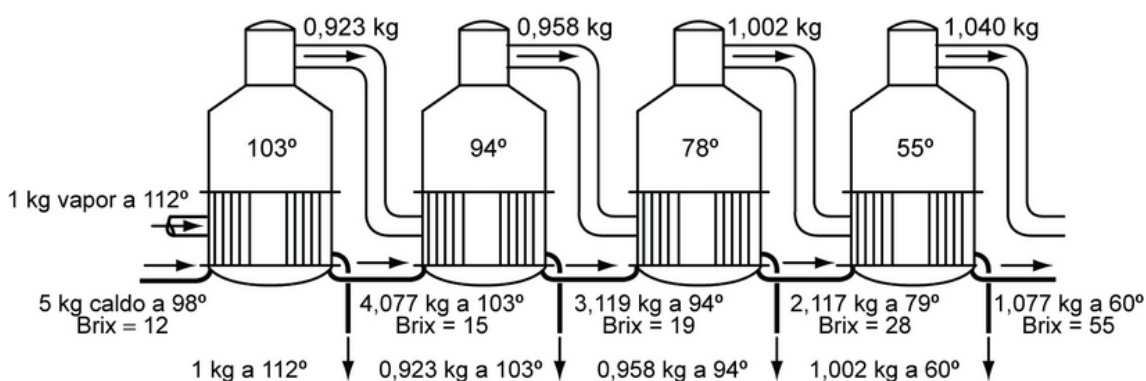


Figura 20. Esquema de evaporadores de múltiplos efeitos com dados de temperatura, brix e vazão mássica. Fonte: LIVRESABER (2015).

2.5.3 Evaporadores solares

Trata-se de umas das maneiras mais antigas de se evaporar, utilizados atualmente para a produção de sal. A água do mar é depositada em uma série de lagoas e evaporada pela ação da energia solar. Depende das condições meteorológicas e raramente são utilizados na indústria.

2.5.4 Tachos em bateladas

Utilizado na fabricação de geleias e doces. O aquecimento é feito através da injeção de vapor em uma camisa de aquecimento. A Figura 21 mostra esse tipo de evaporador.



Figura 21. Tacho em batelada. Fonte: SOLOSTOCKS (2015).

2.5.5 Evaporadores com circulação natural

Na evaporação por circulação natural, destacam-se os evaporadores do tipo calandra ou Robert e os evaporadores de tubos verticais. Os primeiros são muito utilizados nas usinas de açúcar e constituem-se de um vaso onde se encontra instalado um feixe de tubos aquecidos com o vapor de alimentação. A circulação natural do líquido é promovida pela diferença de densidades entre o fluido que circula pela abertura central da calandra e a mistura bifásica fluido-vapor que circula dentro dos tubos. A separação do vapor vegetal se dá dentro do próprio vaso. Normalmente, nas usinas de açúcar, são instalados separadores de arraste após o bocal de saída de vapor com o objetivo de se evitar o arraste de caldo. Esses separadores também podem ser instalados no interior dos vasos. São equipamentos relativamente baratos, de simples limpeza, porém que não devem ser utilizados para fluidos termosensíveis, isto é, fluidos que tem suas propriedades alteradas quando em contato com temperaturas relativamente altas.

Os evaporadores de tubos verticais também se utilizam do princípio da circulação natural do fluido e são encontrados em diversos tipos de indústrias. A separação do vapor vegetal se dá em um vaso separador acoplado ao vaso onde se encontram os tubos de aquecimento. A Figura 22 apresenta o corte esquemático para evaporadores com circulação natural.

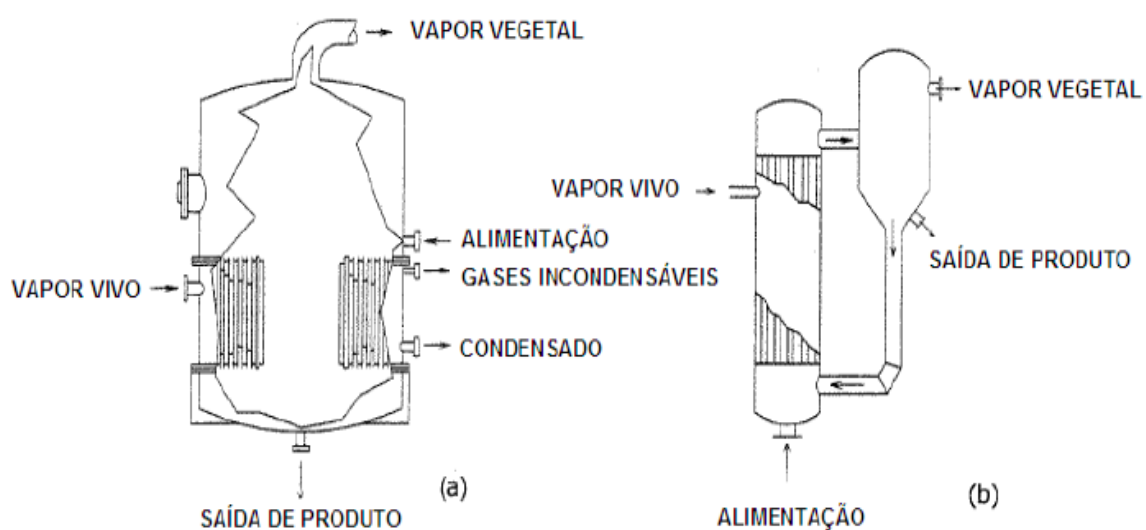


Figura 22. Corte esquemático de evaporadores com circulação natural com (a) calandra e (b) tubos verticais. Fonte: FRANCO (2001).

2.5.6 Evaporadores com circulação forçada

Nestes evaporadores, a circulação do fluido é promovida através da utilização de bombas, sendo indicadas para aplicações onde altas viscosidades de líquidos não permitem a circulação natural. A circulação forçada permite altas velocidades de escoamento, aumentando os coeficientes de transferência de calor e diminuindo as áreas de troca térmica. A Figura 23 ilustra um esquema para este tipo de evaporador.

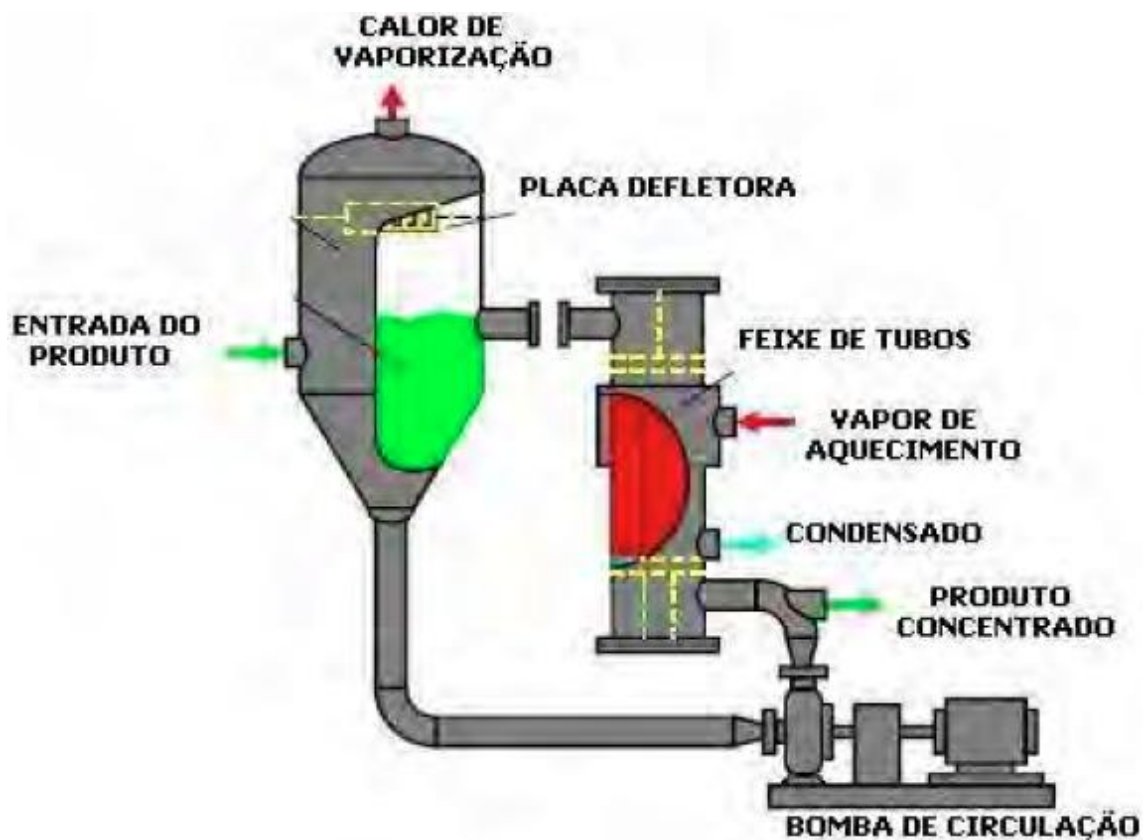


Figura 23. Esquema de um evaporador com circulação forçada. Fonte: CARVALHO (2010).

3.5.7 Evaporadores de filme descendente

Bastante empregados nas indústrias de alimentos, principalmente de suco de laranja, os evaporadores de filme descendente permitem altos coeficientes de transferência de calor e baixos valores de perda de carga. O vapor de aquecimento sofre condensação na parede externa dos tubos verticais e o líquido a

concentrarsofre ebulição no interior destes tubos. O vapor de água formado no interior dostubos vai ocupando o centro dos mesmos, comprimindo o líquido contra as paredesinternas dos tubos. O líquido comprimido forma um filme fino que escoo em altasvelocidades.

Nesse tipo de evaporador, o líquido flui do topo do equipamento ao fundo, o produto concentrado sai no fundo e é separado do vapor vegetal em uma câmara ouseparador. O líquido é direcionado para o tanque de produto concentrado ou para opróximo evaporador no caso de uma evaporação de múltiplos efeitos. O vaporvegetal é encaminhado para um condensador ou para o próximo evaporador paraservir de fonte de energia em um sistema a múltiplos efeitos. A Figura 24 mostra um esquema para esse tipo de evaporador.

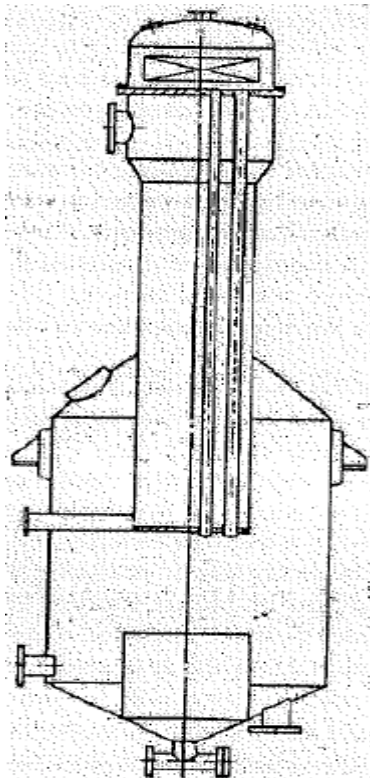


Figura 24 - Desenho esquemático de um evaporador de filme descendente: CARVALHO (2010).

3.5.8 Evaporadores de filme agitado

São indicados para produtos de alta viscosidade ou com presença de sólidos em suspensão. Devido à alta viscosidade, não é possível a formação do filme descendente descrito anteriormente, assim, utiliza-se de um sistema de

párotativas que distribuem o líquido pelas paredes internas dos tubos. A Figura 25 mostra um esquema para esse tipo de evaporador.

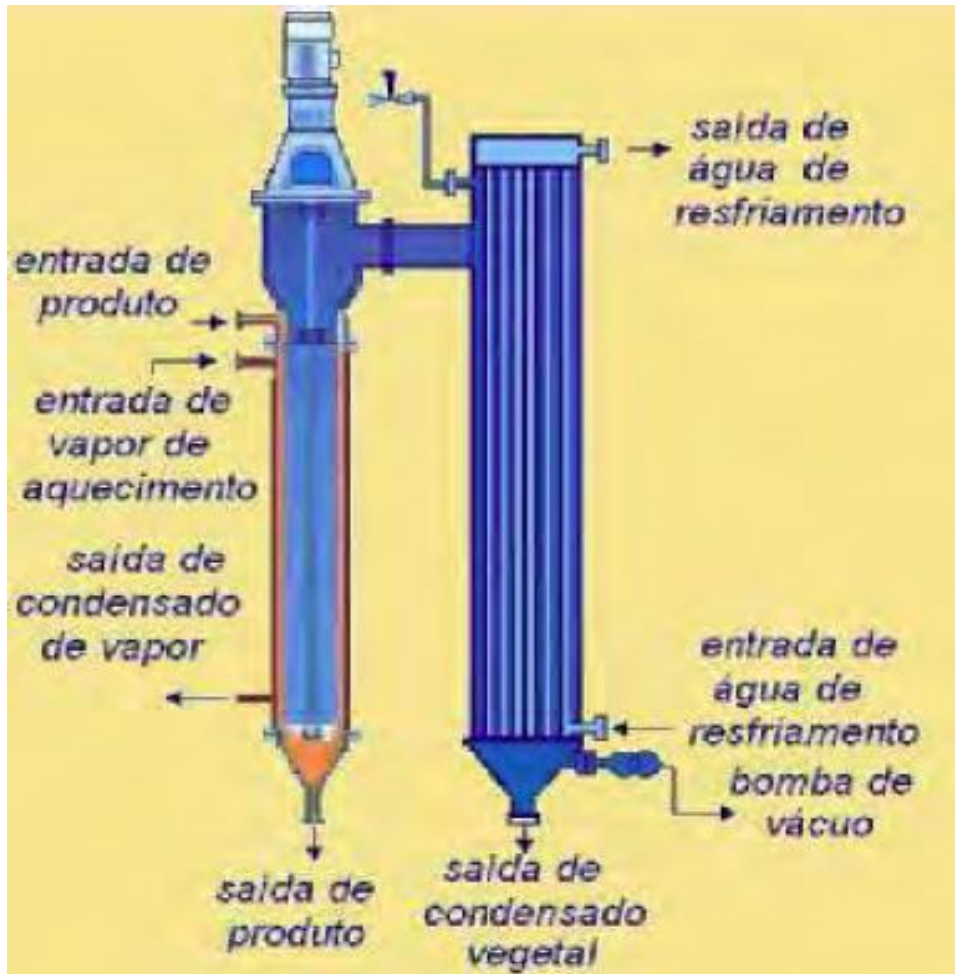


Figura 25 - Esquema de um evaporador de filme agitado. Fonte: CARVALHO (2010).

3.5.9 Evaporadores de placas

Foram propostos como alternativa aos evaporadores tubulares do mesmo modo que são utilizados trocadores a placas em alternativa aos trocadores do tipo casco e tubo. Apresentam altas velocidades de escoamento que geram altos coeficientes de transferência de calor, pequenas áreas de instalação, facilidade de limpeza, ausência de pontos mortos. A Figura 26 mostra um esquema para esse tipo de evaporador.



Figura 26 - Evaporador a placas. Fonte: DIRECTINDUSTRY (2015).

3. PROPOSTA DO TRATAMENTO DA VINHAÇA COM EVAPORAÇÃO VISANDO REDUÇÃO DO VOLUME

A proposta de tratamento com evaporadores de múltiplos estágios visa recuperar aproximadamente 75% da água presente na vinhaça, reduzindo o volume da mesma através do processo de evaporação conforme esquemada figura 27. O que representa economia direta na captação de água para o processo e diminuição dos custos de estocagem e de transporte para áreas de cana distantes da usina. Assim, a tecnologia da evaporação da vinhaça deve ser avaliada com o objetivo de se atender à resolução N° 88 da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, já que tem potencial de recuperar grande quantidade de água para o processo da usina. Porém, a utilização da água recuperada deve ser cuidadosamente estudada, já que o condensado da vinhaça pode conter componente como: sais e ácidos, o que pode requerer tratamento dependendo da utilização que se deseja.

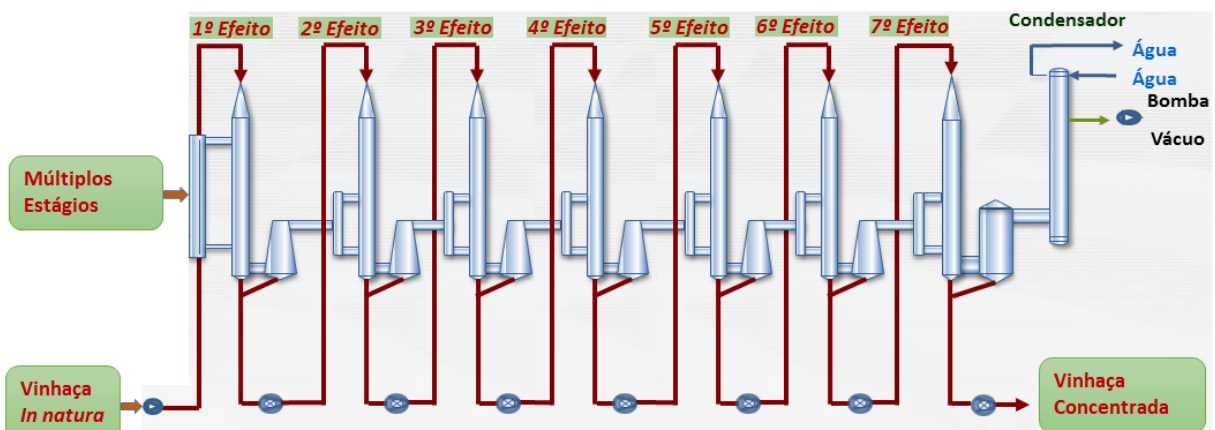


Figura 27–Diagrama esquemático do concentrador de vinhaça em múltiplos estágios de evaporação proposto.

Espera-se ainda com este processo proposto operando em condições normais de projeto, uma redução de aproximadamente 75% no transporte de caminhões tanques, bem como nos custos de estocagem da VC.

Outro fato de suma importância que se espera reduzir de forma significativa no que diz respeito à sustentabilidade é a emissão de gases do efeito estufa proveniente dos caminhões de transportes.

O valor estimado da composição química da vinhaça concentrada poderá variar de 4 a 5 para 17 a 20 em relação ao grau Brix, pois de acordo com

(FARIA et al., 2011) a aplicação da vinhaça até 30 grau Brix poderão ser usados os mesmos equipamentos e técnicas da vinhaça “*in natura*”. A tabela 4 da página 16 mostra outros valores obtidos da composição química vinhaça concentrada.

A cada m³ de vinhaça *in natura*, recupera-se aproximadamente 0,75m³ de água na forma de condensado que posteriormente poderá ser reutilizado nas diferentes etapas do processo, bem como na lavagem de cana, na embebição das moendas e difusores, no preparo do mosto, na diluição do fermento (pH=3,0 a 4,5) e lavagens de pisos. Caso haja a necessidade de utilização em outras etapas do processo é necessário proceder com os devidos cuidados conforme descrito anteriormente.

A figura 28 mostra um diagrama esquemático de um evaporador utilizado no processo de concentração da vinhaça, bem como seus respectivos sistemas operacionais.

Os concentradores de vinhaça oferecem bastante segurança, pois trabalha com válvulas automáticas que abrem e fecham de acordo com a necessidade do processo pela qual foi programada, onde existem sistemas de alarme sonoro e visual para melhor controle de segurança da operação em situações rotineiras e emergenciais. A limpeza do equipamento chamada “CIP” é bastante simples, porém muito eficiente e feita em duas etapas que consiste basicamente no enxágue com água e soda a 3%. O sistema de formação de vácuo promove a remoção de ar do equipamento que é iniciado com duas bombas de vácuo ligadas, após atingir o vácuo de partida somente uma bomba segue operando, onde o operador escolhe qual bomba deve seguir em funcionamento. (CITROTEC, 2011).

Fermentec (2012) apresenta outras vantagens relacionadas ao concentrador de vinhaça, tais como:

- Balanço energético positivo possibilitando maior excedente para cogeração;
- Redução de até 50% do número de centrífugas no processo da fermentação;
- Economia de Insumos;
- Economia de água;
- Grande apelo ambiental facilitando o manejo e retorno da vinhaça à lavoura;

- Obtenção de uma vinhaça concentrada de até 65° Brix com o mesmo consumo de vapor;
- Sistema de limpeza independente sem parar a destilação;
- Baixo consumo de energia;
- Facilidade de utilização da unidade acoplada à destilaria.

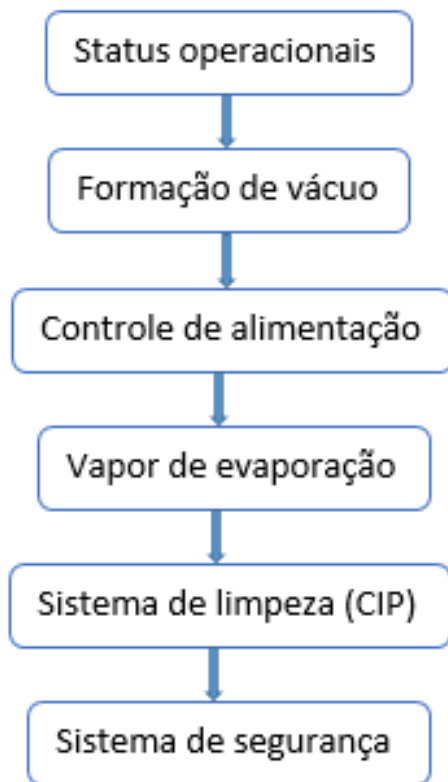


Figura 28–Diagrama esquemático do sistema operacional de um concentrador de vinhaça.

Além disso, podemos destacar que a vinhaça concentrada poderá ser usada como: Fertirrigação, alimentação animal, solidificação, queima e biodigestão.

Citrotec (2011), destaca o aquecimento e evaporação rápida e uniforme (maior tempo de campanha e fácil limpeza), layout compacto com equipamentos leves, construído de aço inoxidável e de fácil instalação, operação em cascata permite configurações em até 7 estágios, além de automatização de todo sistema.

Com um histórico de mais de 6 anos no Estado de São Paulo, a tecnologia de concentração da vinhaça se tornou uma realidade dentro do Setor Sucroenergético, seja pela redução dos custos de aplicação da vinhaça no campo com a redução de seu volume ou pelos ganhos ambientais relacionados à economia

de água e à redução do potencial de poluição das águas subterrâneas. Através de constatações feitas por profissionais influentes e formadores de opiniões, observa-se que há uma grande aceitação desta tecnologia apresentada quando o assunto a ser debatido é o melhor gerenciamento do subproduto vinhaça.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas informações apresentadas anteriormente, evidencia-se a busca de alternativas para o uso e disposição da vinhaça devido ao grande volume gerado e seu potencial poluidor. Além disso, há preocupação do setor com o gerenciamento dos recursos hídricos, focado no reuso da água e redução da captação.

A vinhaça concentrada é obtida com temperatura de 60°C, o que elimina a necessidade de resfriamento antes de encaminhá-la aos canais.

A vinhaça, mesmo concentrada, é transportada pela usina através de caminhões para ser utilizada como fertilizante das lavouras de cana, o que indica que a evaporação não prejudicou a fertirrigação.

O processo de concentração da vinhaça promove grande variação no teor de alguns elementos, especialmente o Na⁺ e K⁺ e as formas de nitrogênio amoniacal e nítrico (SILVA, 2012).

O valor pago aos produtores pela cana-de-açúcar no Brasil ocorre em função de seus índices de qualidade, de modo que, quanto melhor a qualidade da matéria prima maior é o preço pago pela tonelada de colmo. Pelos resultados desta pesquisa nenhuma dose de VC e de VNC interferiram nessas características, nem mesmo a VC possuindo altos índices de K⁺ na linha de plantio da cana prejudicou as características tecnológicas da planta (SILVA, 2012).

De maneira geral, a VC contribui para uma maior disponibilidade de nutrientes, aumento da fertilidade do solo e conseqüentemente na produtividade, pois os tratamentos com vinhaça concentrada promoveram ganhos de 8 mg há⁻¹ em relação ao tratamento controle (SILVA, 2012).

Portanto, em se tratando de VC em soqueira de cana com aplicações de até 15 m³ há⁻¹ na linha em solos com elevado teor de argila, a produtividade é elevada, sem que haja prejuízos às características tecnológicas dos colmos e sem riscos de lixiviação de íons, podendo ser uma grande alternativa para diminuir os custos de transporte do resíduo a longas distâncias (SILVA, 2012).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, T. C. **Redução do Volume de Vinhaça Através do Processo de Evaporação**. Bauru, 2010.

NETO, J. A. L. **Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo**. Piracicaba, 2008.

GRANATO, E. F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça**. Bauru, 2003.

CORAZZA, R. I. **Políticas públicas para tecnologias mais limpas: uma análise das contribuições da economia do meio ambiente**. Campinas, 2001.

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

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. **Estatísticas**. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2>. Acesso em 03 dez. 2014.

BARBOSA, Valmir et al. **Novas tecnologias no uso da vinhaça e aspectos legais**. Ed. Tópicos em tecnologia sucroalcooleira, UNESP. Jaboticabal, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. **Portaria nº 2**. Rio de Janeiro, 16 de Janeiro de 2002.

GUARANI. **Projeto de implantação do ECOVIN – Evaporador de Concentração de Vinhaça**. Olímpia – SP, 2011.

FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA. **Redução da quantidade de vinhaça através da evaporação**. Volume VI – SP, 2010.

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

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

PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira.** Bauru, São Paulo, 2006.

LUDOVICE, M. T. F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático.** Campinas, São Paulo, 1997.

LONGO, R. M. **Efeito da vinhaça in natura e biodigerida em propriedades de um solo cultivado com cana de açúcar.** Campinas, São Paulo, 1994.

GARIGLIO, H. A. A. **Alterações físicas e químicas e mobilidade de solutos em solos submetidos à aplicação de vinhaça proveniente da fabricação de álcool carburante.** Viçosa, Minas Gerais, 2008.

PERON, A. P. **Tratamento de efluente de abatedouro em reatores anaeróbios com diferentes meios.** Ponta Grossa, Paraná, 2007.

RIBAS, M. M. F. **Tratamento da vinhaça em reator anaeróbio operado em batelada sequencial contendo biomassa imobilizada sob condições termofílicas e mesofílicas.** São Carlos, São Paulo, 2006.

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

SILVA, V. L. **Estudo Econômico das diferenças formas de transporte de vinhaça em fertirrigação na cana-de-açúcar.** Jaboticabal, São Paulo, 2009.

FRANCO, M. **Integração energética de sistemas de evaporação localizados abaixo do ponto pinch.** Campinas, São Paulo, 2001.

SIQUEIRA, L. M. **Influência da taxa de carregamento orgânico na degradação anaeróbia da vinhaça em reator de leito fluidizado.** São Carlos, São Paulo, 2008.

DIRECTINDUSTRY. **Fotografia de um evaporador a placas.** Disponível em: <<http://www.directindustry.com/prod/api-schmidt-bretten-gmbh-co-kg/rising-film-evaporators-plate-16083-41162.html>>. Acesso em 09 Mar. 2015.

LIVRESABER. **Figura de um evaporador de múltiplos efeitos com dados de temperatura, brix e vazão mássica.** Disponível em: <<http://livresaber.sead.ufscar.br:8080/jspui/handle/123456789/530>>. Acesso em 10 Mar. 2015.

WESTPHALEN, D. L. **Modelagem, simulação e otimização de sistemas de evaporação.** Campinas, São Paulo, 1999.

SILVA, A. **Vinhaça concentrada da cana-de-açúcar: monitoramento das propriedades químicas do solo e mineralização líquida de nitrogênio.** Piracicaba, São Paulo, 2012.

SINE. **Fluxograma simplificado do processo de fabricação de etanol.** Disponível em: <<http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-13582>>. Acesso em 02 Jun. 2015.

FARIA A. A. A., *et al.*, **Concentração da vinhaça e reaproveitamento da água.IV Semana de Tecnologia do Curso de Biocombustíveis da Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal.** Jaboticabal, São Paulo, 2011.

CITROTEC. **Evaporador de Concentração de Vinhaça do tipo ECOVIN.** Araraquara – SP, 2011.

FERMENTEC. **Redução do Volume de Vinhaça e Otimização Energética.** Piracicaba – SP, 2012.

SOLOSTOCKS. **Desenho esquemático de um tacho em bateladas.** Disponível em: <<http://www.solostocks.com.br/venda-produtos/outra-maquinarria/tacho-para-doces-geleias-e-cocadas-174161>>. Acesso em 18 Jun. 2015.