

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LEONARDO CHAVES GOMES

**DIMENSIONAMENTO DE UM CONCENTRADOR DE
VINHAÇA DO TIPO NÉVOA TURBULENTA**

SÃO CARLOS -SP
2024

LEONARDO CHAVES GOMES

**DIMENSIONAMENTO DE UM EVAPORADOR DE VINHAÇA DO TIPO NÉVOA
TURBULENTA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Químicas da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Orientador: João Paulo da Silva Queiroz

São Carlos-SP
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Graduação do candidato Leonardo Chaves Gomes, realizada em 22/01/2024:

Professor da Disciplina - Prof. Dr. Ernesto Antonio Urquieta-Gonzalez
Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos

Professor Orientador - Prof. Dr. João Paulo Silva Queiroz
Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos

Professor Convidado - Prof. Dr. Thiago Faggion de Pádua
Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos

In memoriam Vitor Takashi Ikeda

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha família, Silvia, Benedito, Ana Paula e Roseli. O mérito dessa conquista é nosso, se foi possível que eu voasse tão longe foi porque sempre tive pessoas me suportando.

Agradeço aos meus amigos do Apartamento 74, em especial aos meus parceiros de apartamento Ricardo, Henrique e Pedro. Nossa parceria sempre foi um refúgio nos momentos mais difíceis, nossa convivência foi um dos maiores presentes que eu recebi na minha vida.

Agradeço à UFSCar pela formação profissional e pessoal que me foi oferecida nesses anos de graduação. O ensino público e de qualidade muda a vida de uma pessoa e não deveria ser privilégio.

Agradeço aos meus amigos de turma e vizinhos de condomínio, desde o dia 0 a gente passou por muitos altos e baixos e mesmo depois de todos os trabalhos de faculdade que fizemos juntos a gente continuou a amizade, isso não significa pouca coisa. Vocês me deram o privilégio de dividir muitos momentos bons.

Agradeço ao PET EQ UFSCar por todos os momentos que transformaram o meu jeito de pensar, entender e trabalhar; foi transformador estar no grupo durante minha trajetória acadêmica.

Agradeço à AEQ UFSCar pela alegria que me trouxe, pelas amizades que eu fiz e por ser um lugar onde eu sempre pude ser livre para pensar e trabalhar do jeito que eu me sentia mais confortável. Vocês são gigantes.

Agradeço ao meu orientador, Prof. João Paulo, pelo suporte na execução desse trabalho e no meu projeto de iniciação científica.

Agradeço à Izabela Fontana e ao time Raízen pela ajuda na elaboração desse trabalho.

RESUMO

O estudo analisa a evaporação como uma estratégia sustentável para o manejo da vinhaça, um subproduto da produção de etanol de cana-de-açúcar. A pesquisa visa estabelecer o dimensionamento de um evaporador de vinhaça do tipo névoa turbulenta com capacidade de evaporação de 180 ton/h de água evaporada utilizando vapor alcoólico como fonte térmica, com 4 ou 5 efeitos de evaporação. Realizou-se o dimensionamento a partir da resolução de equações de balanços de massa e energia contemplando o efeito de “*flasheamento*” característicos desse tipo de evaporador e destacando-se as vantagens e desvantagens de um projeto de evaporador de 4 ou 5 efeitos, nos méritos operacionais, de área instalada e consumo energético. Ao final obteve-se que para uma evaporação de 180 ton/h de água por hora um evaporador névoa turbulenta de 5 efeitos deve possuir 4581 m² por efeito e consumir 77,3 ton/h de vapor alcoólico, e um evaporador de vinhaça de 4 efeitos deve possuir 4632 m² por efeito e consumir 97,6 ton/h de vapor alcoólico.

Palavras-chave: vinhaça; evaporador de vinhaça; balanços de massa e energia; indústria sucroalcooleira; fertirrigação.

ABSTRACT

The study analyses evaporation as a sustainable strategy for vinasse disposal, a subproduct of sugarcane ethanol production. The research aims to establish the sizing of a turbulent mist evaporator with a water evaporation capacity of 180 ton/h. The sizing was carried by the resolution of mass and energy balance equations capable of include the vinasse flash effect, a characteristic phenomenon that occurs in this evaporation design; also, the advantages and disadvantages of a 5 or 4 effects evaporator were analyzed in operational, installed area and energy consumption terms. As a result, for a 180 ton/h water evaporation, the evaporation effect area is 4581 m² and the alcoholic vapor consumption is 77,3 ton/h for a 5-effect design; and an effect area of 4632 m² and alcoholic vapor consumption of 97,6 ton/h are needed for a 4-effect design.

Keywords: vinasse; vinasse evaporator; mass and energy balances; sugarcane and ethanol industry; fertirrigation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema típico de um concentrador de vinhaça	19
Figura 2 – Definição de volume de controle para balanço de massa	25
Figura 3 – Análise da água evaporada por efeito	30
Figura 4 – Perfil de concentrações no evaporador de vinhaça	31
Figura 5 – Perfil de diferença de temperatura no evaporador de vinhaça	32
Figura 6 – Perfil de pressão e diferenças de pressão no evaporador de vinhaça	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização da vinhaça em valores típicos	15
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens de diferentes utilizações da vinhaça	18
Tabela 3 – Condições de contorno para o dimensionamento	22
Tabela 4 – Valores de coef. global de troca térmica para cada um dos efeitos	23
Tabela 5 – Terminologia aplicada para balanço de massa e energia	24
Tabela 6 – Principais diferenças entre um evaporador de vinhaça de 4 e 5 efeitos com uma capacidade de evaporação de 180 ton/h	32
Tabela 7 – Capacidade de evaporação e utilização do vapor alcoólico para os evaporadores projetados	34

LISTA DE SIGLAS

EDV	Evaporador de vinhaça
ENET	Evaporador de névoa turbulenta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1	ETANOL.....	13
	2.1.1 Etanol a Partir da Cana de Açúcar.....	14
2.2	VINHAÇA.....	15
	2.2.1 Biodigestão.....	15
	2.2.2 Fertirrigação.....	16
2.2	CONCENTRAÇÃO DE VINHAÇA.....	18
	2.3.1 Concentradores de Vinhaça.....	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1	CONDIÇÕES DE CONTORNO E HIPÓTESES INICIAIS.....	22
3.2	BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA EM UM EFEITO DE EVAPORADOR DO TIPO NÉVOA TURBULENTA.....	23
	3.2.1 Balanços de Massa.....	24
	3.2.2 Balanços de Energia.....	25
	3.2.3 Determinação da Temperatura de Cada Efeito.....	26
	3.2.4 Determinação da Vazão de Água Requisitada.....	27
	3.2.5 Determinação da Utilização de Vapor Alcoólico e Capacidade de Concentração de Vinhaça.....	28
3.3	METODOLOGIA DE CÁLCULOS.....	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1	BALANÇOS DE MASSA.....	30
4.2	BALANÇOS DE ENERGIA.....	31
	4.2.1 Análise do Consumo de Vapor e Capacidade de Evaporação..	33
5	CONCLUSÕES.....	35
	REFERÊNCIAS.....	36
	APÊNDICE A – Balanços de Massa e Energia – Evaporador de vinhaça de 5 efeitos.....	39
	APÊNDICE B – Balanços de Massa e Energia – Evaporador de vinhaça de 4 efeitos.....	40

1 INTRODUÇÃO

Em um cenário global de busca por fontes de energia limpa, o setor de bioenergia e biocombustíveis, em especial o setor de produção de etanol a partir de cana de açúcar, representa uma peça fundamental de mudança na matriz energética global. Contudo, o processo de obtenção de etanol não é isento de desafios no mérito de equilíbrio ambiental, principalmente no que tange à gestão adequada dos subprodutos gerados, como a vinhaça.

A vinhaça é gerada na destilação do etanol, apresenta características ácidas, elevada carga orgânica e possui diversos minerais diluídos (CHRISTOFOLETTI et al., 2011). A disposição inadequada desse resíduo é danosa para corpos d'água e para o solo, destacando-se a necessidade de estratégias eficazes para seu manejo. Nesse sentido, a fertirrigação, ou seja, a aplicação da vinhaça nas lavouras de cana-de-açúcar é capaz de fornecer à cultura não apenas irrigação como também nutrientes, sendo essa uma forma de mitigar riscos associados à disposição inadequada do subproduto em questão.

Todavia, a aplicação indiscriminada de vinhaça resulta em problemas como salinização excessiva, lixiviação e redução da produtividade agrícola (AGRAWAL & PANDEY, 1994); além de ser uma atividade associada a grandes custos logísticos devido ao grande volume de vinhaça gerada na destilação do etanol. Nesse contexto, a concentração de vinhaça destaca-se como uma opção para otimizar seu manejo, ao reduzir seu volume e aumentar sua eficácia como biofertilizante. Entretanto, a evaporação é um processo energeticamente intensivo e assim, a concentração de vinhaça requer a análise de possibilidades de integração energética que tornem essa estratégia viável.

Esse estudo se propõe a analisar o dimensionamento de evaporadores de vinhaça do tipo névoa turbulenta a partir da aplicação de balanços de massa e energia, análise dos perfis de concentração e temperatura e impacto do número de efeitos na eficiência do processo. Foram testados evaporadores de 4 e 5 efeitos de forma a explorar suas vantagens e desvantagens em termos de consumo de vapor, área instalada e eficiência operacional. A análise desses parâmetros visa contribuir para uma gestão mais eficiente e sustentável do manejo de vinhaça, alinhada a princípios de economia circular, responsabilidade ambiental e eficiência energética.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O segmento de bioenergia e biocombustíveis, em especial a obtenção de etanol a partir da cana-de-açúcar, tem se mostrado uma peça-chave no cenário energético mundial. Todavia, a produção de etanol gera importantes subprodutos e resíduos, destacando-se dentre eles a vinhaça em virtude de seu elevado volume de produção e seu potencial poluidor. Sendo um efluente líquido obtido a partir da destilação do vinho rico em etanol, a vinhaça possui um alto teor de nutrientes e matéria orgânica, entretanto a gestão inadequada desse material está associada com problemas ambientais, como a poluição do solo e dos recursos hídricos. Diversas técnicas são empregadas com o objetivo de manejar de maneira mais eficiente a vinhaça, viabilizando seu reuso de maneira sustentável, eficaz e econômica. A presente revisão busca dissertar sobre tais estratégias, enfatizando tecnologias utilizadas para a concentração da vinhaça e suas implicações no setor de bioenergia e no meio ambiente.

2. 1. ETANOL

O etanol, ou álcool etílico, é um líquido incolor, volátil e inflamável, obtido predominantemente a partir da fermentação de açúcares por leveduras. Ele é um biocombustível que pode ser classificado em primeira geração, quando obtido a partir do caldo de cana-de-açúcar, milho ou outros cultivos ricos em carboidratos; ou em segunda geração, quando é obtido a partir de biomassa lignocelulósica, como o bagaço de cana-de-açúcar (ROBAK & BALCEREK, 2018). Seu poder calorífico é inferior ao de combustíveis de origem fóssil, todavia, sua combustão é mais limpa, produzindo menos poluentes atmosféricos, incluindo gases de efeito estufa, contribuindo significativamente para a mitigação de mudanças climáticas. Essa característica torna o etanol uma opção viável para a substituição total e/ou parcial de combustíveis fósseis em várias aplicações, especialmente no setor de transporte (GNANSOUNOU & DAURIAT, 2005).

No contexto brasileiro, a indústria de etanol no Brasil possui um histórico que data à década de 1970, quando, durante a crise do petróleo foi lançado o programa de incentivo Proálcool. Desde então, a produção desse biocombustível tornou-se um contribuinte essencial da matriz energética brasileira. Atualmente, o país é o segundo

maior produtor mundial de etanol, produzindo aproximadamente 30 bilhões de litros no ano de 2021. Esse mercado tem apresentado tendência de crescimento de 2,4% no período de 2012-2021 (ANP, 2021). Vale pontuar que o álcool etílico, além de ser empregado como combustível líquido para veículos, também é empregado em outras indústrias, como alimentícia, farmacêutica e de cosméticos.

2. 1. 1. Etanol a Partir da Cana-de-Açúcar

No Brasil, a principal matéria-prima para a produção de etanol é a cana-de-açúcar. De forma geral, a obtenção do etanol é feita em usinas que integram a obtenção de açúcar com a produção do biocombustível. O processo se inicia na colheita da cana, que é limpa e triturada em moendas ou difusores para a extração do caldo que contém os açúcares fermentescíveis. O caldo, então, é tratado e clarificado para a remoção de impurezas, resultando em líquido rico em açúcares pronto para a fermentação (DIAS et al., 2015).

Na etapa de fermentação, o caldo é destinado para tanques onde estão presentes as leveduras. Estes microrganismos são responsáveis por consumir a sacarose e convertê-la em etanol e dióxido de carbono, em um processo que leva de 6 a 8 horas. O resultado é uma mistura denominada vinho, que contém de 7 a 10% (v/v) de etanol. O vinho é então destilado para a separação do etanol da mistura. A destilação gera o etanol hidratado, que contém aproximadamente 95% (m/m) de etanol, já podendo ser utilizado como combustível. O etanol hidratado pode passar por uma etapa de desidratação, atingindo uma concentração de 99,3% (m/m), o que possibilita a sua mistura com a gasolina para venda em postos de combustível (DIAS et al., 2015).

O processo de destilação gera como efluente a vinhaça em uma proporção estimada de 10 a 15 litros do efluente para cada litro de etanol hidratado gerado (CORTEZ et al., 1992). Devido ao seu grande volume de produção, a vinhaça, que é rica em nutrientes e matéria orgânica, representa um desafio significativo em termos de gerenciamento de resíduos, mas também pode ser vista como uma oportunidade para a valorização de utilização de subprodutos.

2. 2. VINHAÇA

A vinhaça é um subproduto gerado na destilação do etanol produzido a partir da fermentação de açúcares por leveduras. É um composto ácido, com pH de 3.5-5.0 com elevado teor orgânico e odor desagradável (SINDHU et al., 2017). A disposição inadequada e indiscriminada desse material em solos e corpos d'água leva a diversos transtornos ambientais. A composição química da vinhaça varia de acordo com a usina que a gera, tal como o momento da safra e o método de destilação empregado no processo. Em geral, este efluente apresenta uma cor escura e é composto de água (~93%) e material orgânico e inorgânico (~7%), mas possui baixas concentrações de nitrogênio e fósforo (LAIME et al., 2011). Valores típicos para a caracterização da vinhaça estão apresentados na Tabela 1.

Vários estudos foram realizados com a finalidade de encontrar destinações e tratamentos adequados para a vinhaça, ela pode ser empregada para a fertirrigação, geração de energia a partir de biodigestão e como matéria-prima para a fabricação de ração para gado e aves (CHRISTOFOLETTI et al., 2013).

Tabela 1: Caracterização da vinhaça em valores típicos

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
pH	3,9	Ba, mg/L	0,41
DBO, mg/L	5046	Cr, mg/L	0,04
DQO, mg/L	13380	Cu, mg/L	0,35
K, mg/L	2056	Hg, mg/L	0,0019
Na, mg/L	50,2	Mo, mg/L	0,008
Sulfato, mg/L	710	Ni, mg/L	0,03
Ca, mg/L	719	Zn, mg/L	1,66
Mg, mg/L	237		

Fonte: Adaptado de CHRISTOFOLETTI et al., 2011

2. 2. 1. Biodigestão

Uma rota que tem sido observada com cada vez maior frequência na indústria alcooleira é a biodigestão anaeróbica da vinhaça. Tal processo consiste na biodegradação e remoção da carga orgânica da vinhaça, gerando no processo biogás e digestato de vinhaça (CORTEZ et al., 2007).

A biodigestão anaeróbica da vinhaça ocorre em duas etapas subsequentes: a

fase acidogênica e a fase metanogênica. Na primeira etapa, os compostos orgânicos complexos, como lipídios, carboidratos e proteínas, são inicialmente hidrolisados gerando compostos com cadeias carbônicas simplificadas que são oxidadas formando ácidos orgânicos como ácido acético e ácido propiônico – esta etapa é realizada por meio da ação de bactérias anaeróbias facultativas e obrigatórias. Na fase metanogênica, por sua vez, os ácidos carboxílicos são convertidos em metano e dióxido de carbono, mistura essa que é denominada biogás. (CORTEZ et al., 2007).

O biogás pode ser destinado para a geração de energia por conta de sua alta concentração de metano. Em uma usina sucroalcooleira este potencial pode ser aplicado em diversas áreas, tais como a operação de turbogeradores a gás, substituição parcial do bagaço de cana em caldeiras geradoras de vapor ou até mesmo ser utilizada como combustível veicular para o maquinário agrícola. (SZYMANSKY et al., 2010).

Ademais, a vinhaça biodigerida, formada no processo de biodigestão, possui uma carga orgânica menor e pode ser utilizada como biofertilizante, pois mantém as propriedades fertilizantes originais da vinhaça. Dessa forma, a geração de energia a partir da biodigestão não exclui a possibilidade de utilizar a vinhaça e/ou o biodigestato de vinhaça como biofertilizante, ou mesmo a utilização de estratégias para otimizar seu manejo, como a evaporação.

Atualmente, a implantação de plantas produtoras de biogás a partir da biodigestão anaeróbia enfrenta desafios no sentido econômico, considerando os altos custos de instalação e operação de indústrias de biogás; como também riscos associados a flutuações dos produtos gerados da biodigestão: seja a energia elétrica, cujo preço é regulado por políticas governamentais; seja o biometano, que ainda não possui um preço competitivo quando comparado com o metano de origem fóssil, devido aos custos de purificação (GAO et al., 2019). Dessa forma, a fertirrigação direta da vinhaça demonstra-se como uma estratégia robusta para o manejo desse subproduto.

2. 2. 2. Fertirrigação

A utilização da vinhaça na fertirrigação consiste na aplicação do subproduto *in natura* em lavouras de cana-de-açúcar. Quando aplicada no solo, a vinhaça, além de irrigar, fertiliza a cultura, o que reduz investimentos em fertilizantes (LAIME et al.,

2011). Esse emprego da vinhaça é uma alternativa que reforça o uso racional de recursos naturais e o conceito de economia circular, pois evita o despejo de vinhaça em rios ao mesmo tempo que realiza um emprego consciente de suas propriedades. Dentre as destinações pensadas para este material, a fertirrigação é o destino mais comum, pois envolve baixos investimentos iniciais e possui um custo de manutenção reduzido, além de poder ser implementado com facilidade, sem necessidade de tecnologias complexas e reduzir custos com químicos na lavoura (CHRISTOFOLETTI et al., 2013).

Entretanto, vale ressaltar que a aplicação indiscriminada da vinhaça no solo causa uma salinização excessiva, lixiviação de íons presentes no solo para lençóis freáticos, alteração das características originais do solo por desequilíbrio de nutrientes (AGRAWAL & PANDEY, 1994), redução da alcalinidade do solo, diminuição da produtividade agrícola (KUMAR & VISWANATHAN, 1991), aumento da fitotoxicidade do solo e odores desagradáveis (NAVARRO et al., 2000). Dessa forma, é necessário que parâmetros ambientais tais como o tipo de solo, proximidade com corpos d'água superficiais ou subterrâneos, capacidade de retenção de água no solo e concentração de íons sejam considerados antes da aplicação de vinhaça na fertirrigação (LAIME et al., 2011).

Ademais, outra problemática que surge da utilização do subproduto na fertirrigação são os gastos em transporte logístico da vinhaça para as lavouras. Isso ocorre pois os volumes de vinhaça gerados em uma usina sucroalcooleira são muito elevados, estando em torno de 12 a 15 vezes maiores do que o volume de etanol gerado (SOUSA, 2018). O transporte de um volume tão alto é custoso e pode causar a aplicação não apropriada desse subproduto na fertirrigação. O resumo dos cenários apresentados na utilização da vinhaça está resumido na Tabela 2.

Nesse sentido, a concentração da vinhaça surge como alternativa para remediar esse cenário, uma vez que ela possibilita a retirada de água deste material, diminuindo seu volume e aumentando sua performance como biofertilizante (CORTES-RODRÍGUEZ et al., 2017).

Tabela 2: Vantagens e desvantagens de diferentes utilizações da vinhaça

Utilização	Vantagens	Desvantagens
Biofertilização	Fácil implementação Baixo custos	Dificuldades logísticas Efeitos a longo prazo desconhecidos
Biodigestão	Geração de energia Redução da carga orgânica Não exclui a possibilidade de fertilização	Custo elevado de implementação

Fonte: Adaptado de CHRISTOFOLETTI et al., 2011

2. 3. CONCENTRAÇÃO DE VINHAÇA

A concentração da vinhaça por meio da evaporação é uma alternativa para tornar o manejo deste subproduto mais eficiente, uma vez que a fertilização nem sempre consegue assimilar todo o montante de vinhaça gerado em uma usina. A vinhaça concentrada pode ser utilizada na fertilização de áreas mais distantes, pode ser utilizada em caldeiras para geração de energia e pode ser destinada para suplementação de rações animais (CHRISTOFOLETTI, 2013).

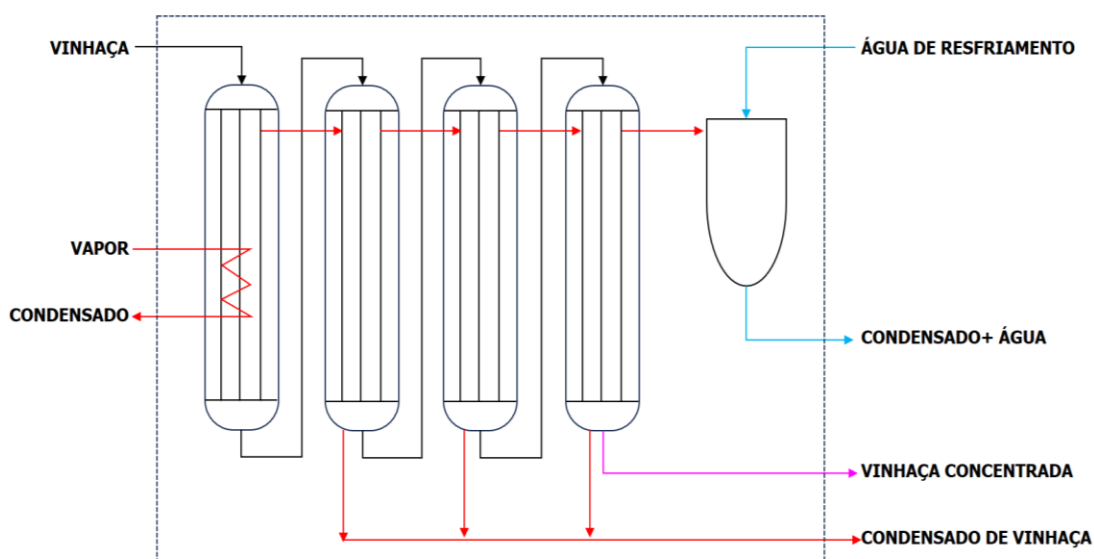
Um dos maiores desafios para a implementação de tecnologias de evaporação de vinhaça é a alta demanda energética para a sua operação. De maneira geral são empregados evaporadores de 4 a 7 efeitos múltiplos para reduzir a quantidade de vapor requisitada para a concentração (Figura 1). A adição de efeitos reduz o consumo energético ao passo que aumenta o investimento inicial para a instalação de um evaporador de vinhaça (NAKASHIMA, 2018). Um processo convencional de concentração consome cerca de 0,2 kg de vapor por litro de vinhaça para um aumento de concentração de sólidos da vinhaça em 10 vezes (ELIA NETO, 2016).

De forma a tornar a evaporação de vinhaça um processo viável, são propostas estratégias de integração energética para o fornecimento de energia térmica para esse processo. Uma delas é a utilização de vapor purgado do primeiro efeito de evaporação de caldo (denominado comumente de “V1”) como fonte térmica para o primeiro efeito de concentração de vinhaça. Outra estratégia é a condensação do vapor alcoólico gerado no topo da coluna de retificação (denominada comumente de “Coluna B”) no primeiro efeito de concentração de vinhaça - a condensação, dessa

forma, supre a energia para a evaporação da vinhaça (CORTES- RODRÍGUEZ et al. 2018). A partir de uma avaliação inicial, observa-se que a segunda alternativa é mais viável, uma vez que a vinhaça na usina é gerada em um local mais próximo da coluna B do que da evaporação de caldo, o que reduz custos de manutenção e instalação de tubulações de vapor.

Além disso, no processo de concentração, a vinhaça diminui seu volume ao passo que a quantidade de sólidos permanece constante, ou seja, aumenta-se a concentração de sólidos na vinhaça concentrada. Esse fenômeno torna a vinhaça um líquido mais viscoso e aumenta a ocorrência de incrustações nos equipamentos utilizados, o que demanda a limpeza frequente utilizando agentes químicos e dificulta a rotina de operação. Outro fator adverso é a operação em elevadas temperaturas e pH baixo, tornando necessária a construção do evaporador utilizando materiais resistentes à corrosão (NAKASHIMA, 2018).

FIGURA 1: Esquema típico de um concentrador de vinhaça.



Fonte: Autoria própria

Ressalta-se que todos os desafios associados à disposição e concentração de vinhaça também são apresentados no manejo do digestato gerado na produção de biogás, exceto as dificuldades relacionadas ao manejo de fluidos com alta concentração de sólidos e pH baixo, uma vez que o digestato possui originalmente menor quantidade de sólidos e pH balanceado (CRISTOFOLETTI, 2013).

2. 3. 1. Concentradores de vinhaça

Evaporadores ou concentradores são equipamentos utilizados para a concentração de soluções, sua principal finalidade é a remoção de água ou solventes de uma solução promovendo a redução de volume. O funcionamento destes equipamentos dá-se através da transferência de calor de uma fonte quente (em geral, vapor) para uma fonte fria (solução) através de uma superfície.

Em geral, evaporadores possuem uma disposição de múltiplos efeitos, onde o vapor gerado em um estágio é utilizado como fonte quente para promover a evaporação no efeito subsequente. Este design permite uma redução significativa de consumo de energia, e é possibilitada a partir da aplicação de gradientes de pressão negativo entre efeitos: a pressão do efeito $n+1$ é sempre inferior à pressão do efeito n , logo, a ebulição no efeito $n+1$ ocorre numa temperatura menor do que a do vapor gerado no efeito n , tornando possível a troca térmica entre esses fluidos. (ARAUJO, 2012).

O projeto de evaporadores deve considerar diversos parâmetros, tais como a capacidade de evaporação requerida, o volume de solvente a ser evaporado e a carga térmica disponível, além do design das superfícies de troca térmica. Além disso, devem ser consideradas as propriedades dos fluidos envolvidos, em especial da solução a ser concentrada, uma vez que a viscosidade pode ser um impeditivo para a troca térmica eficiente no equipamento (SOUSA, 2018).

No caso de um evaporador de vinhaça (EDV) são reportados diversos designs de evaporadores, em especial evaporadores do tipo *falling film* (CARVALHO & SILVA, 2010) e névoa turbulenta (DEDINI, 2011; CITROTEC, 2023).

Em termos gerais, evaporadores do tipo *falling film* ou película descendente são aplicados para a concentração de fluidos de baixa viscosidade e com alta taxa de evaporação (~150 m³/h de evaporação). O princípio de funcionamento destes equipamentos consiste na descida gravitacional de uma película de fluido sobre uma superfície responsável pela troca de calor. Durante o contato com a superfície o líquido ebule aumentando a sua concentração (SOUSA, 2018).

No caso de evaporadores de névoa turbulenta (ENET), a solução a ser concentrada é explodida pela aplicação de gradientes de pressão negativos em cada efeito, gerando um “*flash*” parcial formado por uma mistura de vapor e partículas de

líquido, denominada névoa. A névoa é produzida em cones de distribuição que alimentam os tubos de cada efeito, tal distribuição evita a dependência de dispositivos mecânicos para a divisão do fluido nos tubos (ALEIXO, 2012). Atualmente, esse tipo de evaporador é aplicado para a concentração de sucos de fruta, uma vez que a explosão que ocorre em cada efeito do evaporador causa fluxos em alta velocidade, diminuindo o tempo de retenção em cada efeito, o que possibilita uma menor perda das características iniciais do produto (ALEIXO, 2012).

Ao contrário do design “*falling film*”, que possui como dificuldade a distribuição desigual de líquido que ocasiona a formação de picos de temperatura localizados, os ENETs asseguram distribuição igualitária de fluido. Assim, o produto, na forma de névoa desce pelos tubos atingindo velocidades supersônicas, absorvendo calor e evaporando. Dessa forma, a eficiência de um ENET é superior à de um evaporador “*falling film*” o que torna este design apropriado para a concentração de vinhaça, pois rompe os desafios relacionados à viscosidade da vinhaça concentrada, além de possuir uma limpeza facilitada e menos frequente (ALEIXO, 2012).

Ademais, tecnologias que se aproveitam do escoamento de névoas para aumentar a eficiência de transferência de calor já são exploradas no âmbito de refrigeração de fluidos em trocadores de calor e sistemas de refrigeração doméstica (JUN-FENG & XIN-CHENG, 2009). A aplicação desses métodos para o aquecimento e evaporação de correntes começaram a ser explorados no sentido de permitir uma transferência de energia eficiente em situações em que há limitações de viscosidade e tempo de retenção hidráulica, como no caso da evaporação de vinhaça e de sucos naturais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O dimensionamento de um evaporador tem como objetivo primordial a definição de sua área de troca térmica, o número de efeitos a serem utilizados e as condições de operação. De forma a determinar tais parâmetros, é necessário passar por etapas de balanço de massa e energia, que serão detalhadas em sequência.

3. 1. CONDIÇÕES DE CONTORNO E HIPÓTESES INICIAIS

As equações de balanço de massa e energia foram aplicadas considerando as condições de contorno apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3: Condições de contorno para o dimensionamento.

CORRENTE	Vinhaça in natura	Vapor Alcoólico	Água de resfriamento
Vazão	200.000 kg/h	A definir	A definir
Temperatura	75 °C	80 °C	30 °C
Pressão	1 bar	1,3 bar	1 bar
Concentração	2,5 g K ₂ O/L	-	-

Fonte: Autoria própria

A determinação da vazão de vinhaça a admitida no evaporador foi feita tendo como base uma destilaria com capacidade de produção de etanol de 600 m³/dia a partir de um vinho com graduação alcoólica de 10%v – cuja produção de vinhaça é de 235 ton/h. Os cálculos não foram efetuados para a concentração total da vinhaça, uma vez que uma parcela do subproduto deve permanecer na sua forma *in natura*, para possibilitar uma maior flexibilidade no manejo da fertirrigação.

A concentração de potássio foi determinada a partir de valores de referência na literatura, que relata valores de 1200 a 7830 mg/L de óxido de potássio diluídos (SOUSA, 2018).

Para essas condições, o dimensionamento foi realizado para que a quantidade de potássio na vinhaça fosse aumentada em dez vezes, ou seja, para a capacidade de evaporação de 180.000 kg/h.

Para cada um dos efeitos adotou-se os valores de coeficiente global de troca térmica como segue apresentado na Tabela 4, com valores típicos utilizados para dimensionamento de evaporadores. Para o primeiro efeito é considerado um valor inferior devido às diferenças de escoamento e de calor latente que o vapor alcoólico possui em relação a água. Considerou-se um valor inicial de 1000 kcal/(h.m².°C) no segundo efeito, que diminuiu conforme os efeitos; adotou-se essa medida para simular o efeito de incrustação que a vinhaça ocasiona ao ser concentrada.

TABELA 4: Valores de coeficiente global de troca térmica para cada um dos efeitos

EFEITO	1	2	3	4	5
U (kcal/(h·m ² ·°C))	600	1000	975	950	900

Fonte: Autoria própria

Também foi tomada como premissa que a temperatura mínima da vinhaça no último efeito deveria ser igual ou superior a 55 °C (equivalente a uma pressão de 0,158 bar), visto que operacionalmente é necessária a utilização de equipamentos muito específicos para a manutenção de um vácuo maior do que 0,15 bar.

3. 2. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA EM UM EFEITO DE EVAPORADOR DO TIPO NÉVOA TURBULENTA

Como apresentado anteriormente, evaporadores possuem um design múltiplo efeito, onde o vapor gerado em um efeito anterior é utilizado como fonte quente no efeito subsequente. Como uma estimativa inicial de dimensionamento optou-se pelo design em cinco efeitos, dessa forma, a terminologia adotada para balanço de massa e energia adotada será como apresentada na Tabela 5.

TABELA 5: Terminologia aplicada para balanço de massa e energia.

n	Descrição	Observação
0	Fonte quente inicial	Vap ₀ possui calor latente distinto das demais correntes
1	1º efeito	-
2	2º efeito	-
3	3º efeito	Início da contabilização de “flasheamento de condensado”
4	4º efeito	-
5	5º efeito	Vap ₅ requisita de água de resfriamento para ser condensado

Fonte: Autoria própria

3. 2. 1. Balanço de massa

Evaporadores são equipamentos onde ocorre a transferência de calor entre um fluido quente, geralmente um vapor, e um fluido que se deseja evaporar. Quando os dois fluidos têm a mesma composição, o gradiente de temperatura que permite a troca térmica é estabelecido pela diferença de pressão entre os dois fluidos, que conseqüentemente, ebulem e condensam em temperaturas distintas.

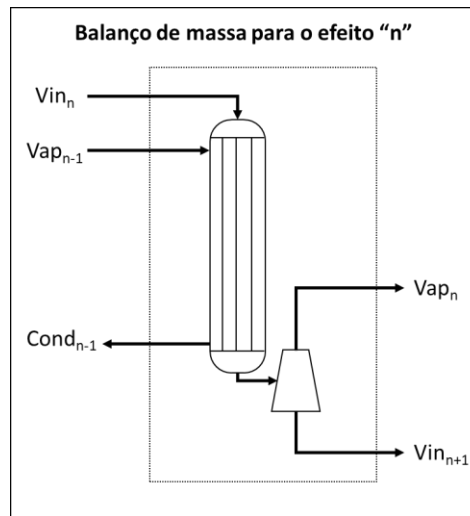
A transferência de energia é indireta, ou seja, o contato entre os fluidos ocorre através de uma superfície. Assim, para o caso em questão, o balanço de massa para um evaporador é determinado pelas equações de balanço do lado vapor e do lado vinhaça (Equações 1 e 2). A Figura 2 mostra o volume de controle que exemplifica um efeito de evaporação.

$$Vap_{n-1} - Cond_{n-1} = 0 \quad (1)$$

Onde Vap_{n-1} é o vapor utilizado como fonte quente no efeito n e provém do efeito n-1 e Cond_{n-1} é o líquido gerado pela condensação do vapor.

$$Vin_n - (Vap_n + Vin_{n+1}) = 0 \quad (2)$$

Onde Vin_n é a vinhaça alimentada no efeito n; Vap_n é o vapor gerado no efeito n; e Vin_{n+1} é a vinhaça que será alimentada no efeito n+1.

FIGURA 2: Definição de volume de controle para balanço de massa.

Fonte: Autoria própria

3. 2. 2. Balanço de energia

Para a determinação dos balanços de energia, adotou-se como hipótese que o calor transferido em cada efeito é exclusivamente latente, ou seja, o vapor é admitido em saturação e deixa o volume de controle como líquido saturado e que os efeitos são adiabáticos.

Assim, o balanço de energia para o lado vapor é dado pela Equação 3:

$$Q_n = Vap_{n-1} \cdot (H_{VS}(T_{n-1}) - H_{LS}(T_{n-1})) \quad (3)$$

Onde Q_n é o calor transferido no efeito n ; e H_{LS} e H_{VS} são as entalpias do líquido e do vapor saturado na temperatura discriminada na equação, respectivamente.

Já para o lado vinhaça, o vapor gerado é dado pela equação 4, que exemplifica que a determinação do vapor gerado no efeito n é determinado a partir da resolução concomitante das equações 3 e 4:

$$Q_n = Vap'_n \cdot (H_{VS}(T_n) - H_{LS}(T_n)) \quad (4)$$

Onde Vap'_n é o vapor gerado no efeito n a partir da condensação da fonte quente.

Como exposto anteriormente, em um evaporador névoa turbulenta deve ser contabilizado o efeito de “*flasheamento*” da vinhaça, causado pela diminuição abrupta de pressão quando o fluido é admitido no efeito, que gera um excedente de vapor. Essa geração é demonstrada na equação 5.

$$Vap_{n,F} = Vin_n \cdot \frac{H_{LS}(T_{n-1}) - H_{LS}(T_n)}{H_{VS}(T_n) - H_{LS}(T_n)} \quad (5)$$

Onde $Vap_{n,F}$ é o vapor gerado no efeito n a partir do “*flasheamento*” de vinhaça.

Além disso, esse design de evaporador também ocasiona o “*flasheamento*” parcial de condensado, que tem a sua pressão aliviada antes de entrar em contato com o condensado gerado no efeito seguinte. Essa geração de vapor é contabilizada a partir da Equação 6. Essa geração de vapor é contabilizada em balanço a partir do efeito 3, visto que o condensado capaz de ser “*flasheado*” é gerado apenas no efeito 2, uma vez que o condensado do efeito 1 é um condensado de etanol hidratado.

$$Vap_{n,C} = Cond_{n-1} \cdot \frac{H_{LS}(T_{n-2}) - H_{LS}(T_{n-1})}{H_{VS}(T_{n-1}) - H_{LS}(T_{n-1})} \quad (6)$$

Onde $Vap_{n,C}$ é o vapor gerado no efeito n a partir do “*flasheamento*” de condensado.

Dessa forma, a evaporação total do efeito (Vap_n) é dada pela equação 7:

$$Vap_n = Vap'_n + Vap_{n,F} + Vap_{n,C} \quad (7)$$

3. 2. 3. Determinação da temperatura de cada efeito

A determinação da temperatura de operação de cada efeito é um parâmetro necessário para estabelecer a área de troca térmica necessária para o evaporador, além de ser necessária para determinar-se as propriedades termodinâmicas (entalpia e pressão) em cada efeito. A temperatura e a área do efeito se relacionam como mostrado na equação 8:

$$Q_n = U \cdot A \cdot (T_{n-1} - T_n) \quad (8)$$

Onde U é o coeficiente global de troca térmica; A é a área de troca térmica e T a temperatura.

Substituindo a equação 3 na equação 8 e isolando o termo T_n , tem-se a equação 9, que permite estabelecer a temperatura em cada efeito:

$$T_n = \frac{U \cdot A \cdot T_{n-1} - V_{n-1} \cdot (H_{VS}(T_{n-1}) - H_{LS}(T_{n-1}))}{U \cdot A} \quad (9)$$

A estratégia de dimensionamento adotou como premissa a resolução simultânea das equações 3, 4 e 9; estabelecendo a quantidade de vapor gerado em cada efeito e sua temperatura.

Na abordagem tomada não foram consideradas elevações no ponto de ebulição ocasionadas pelo aumento de concentração, uma vez que os valores seriam insignificantes na faixa de operação do concentrador de vinhaça dimensionado. A efeito de comparação, soluções açucaradas passam a ter efeitos de elevação no ponto de ebulição maiores do que 1°C para concentrações de sólidos superiores a 30°BRIX (ARAUJO, 2012) e o evaporador de vinhaça em análise não é projetado para valores maiores do que 20°BRIX . Da mesma forma, relata-se um efeito mínimo de elevação de ponto de ebulição para valores inferiores a 20°BRIX na concentração de líquidos ricos em solutos iônicos, como o licor negro proveniente da produção de celulose (RODRIGUES & SCHIAVON, 2014).

3. 2. 4. Determinação da vazão de água requisitada

Ao contrário dos demais efeitos, no último efeito de evaporação é necessária a realização da condensação do vapor gerado nas calandras. Usualmente, essa etapa é realizada em um condensador barométrico ou evaporativo. Em um condensador barométrico, a condensação é realizada a a partir do contato do vapor do último efeito com água de resfriamento. Considerou-se para o cálculo uma temperatura máxima de 45°C na corrente de saída do condensador, dessa forma, a quantidade de água requisita é dada pela equação 10.

$$A_R = Vap_5 \cdot \frac{H_{VS}(T_5) - H_{LS}(45^\circ\text{C})}{H_{LS}(30^\circ\text{C}) - H_{LS}(45^\circ\text{C})} \quad (10)$$

Onde A_R é a vazão de água requerida.

3. 2. 5. Determinação da utilização de vapor alcoólico e capacidade de concentração de vinhaça

Uma vez que a fonte quente para o evaporador dimensionado no presente trabalho é o vapor alcoólico gerado no topo da coluna retificadora de uma destilaria de etanol, é necessário estabelecer se o equipamento é capaz de fornecer essa quantidade de vapor. Primeiramente, é necessário estabelecer qual a vazão de vapor gerado no topo da coluna, que é dado pela razão de refluxo da destilação, como mostrado na equação 11.

$$Vap_B = \frac{C_{DEST}}{24} \cdot \rho_{AH} \cdot (R + 1) \quad (11)$$

Onde C_{DEST} é a capacidade de produção de etanol da coluna, em m^3/dia ; ρ_{AH} é a densidade do etanol hidratado; Vap_B é a vazão de vapor alcoólico gerado e R é a razão de refluxo. Neste trabalho considerou-se uma razão de refluxo igual a 3.85, valor utilizado para a destilação de um vinho de 10%v (ZARPELON, 2020)

Em seguida, é necessário determinar-se a vazão de vinhaça gerada neste aparelho de destilação. Para tanto, utiliza-se a equação 12:

$$Vin = \frac{C_{DEST}}{24} \cdot G_{VIN} \cdot \rho_{VIN} \quad (12)$$

Onde ρ_{VIN} é a densidade da vinhaça e G_{VIN} é a geração específica de vinhaça em um aparelho de destilação, em L vinhaça/L etanol. Neste trabalho tomou-se como referência o valor de 9,4 L vinhaça/L etanol, valor tido como referência para a destilação de um vinho de 10%v (ZARPELON, 2020).

Definido as gerações de vapor e vinhaça na destilaria, calculou-se a utilização de vapor alcoólico (UT) e capacidade de concentração de vinhaça no concentrador (C), a partir das equações 13 e 14, respectivamente.

$$UT (\%) = \frac{Vap_0}{Vap_B} \cdot 100\% \quad (13)$$

$$C (\%) = \frac{Vin_1 - Vin_5}{Vin} \cdot 100\% \quad (14)$$

3. 3. METODOLOGIA DE CÁLCULOS

As equações foram implementadas em uma planilha do *Microsoft Excel* onde funções de estado do pacote *XSteam* (MATHWORKS, 2023) estavam implementadas, e que permitia o cálculo das propriedades termodinâmicas das correntes (entalpia e pressão) automaticamente.

O cálculo foi estruturado da seguinte forma:

- Estimativa inicial da área de troca térmica;
- Estimativa inicial da temperatura do efeito;
- Cálculo do calor fornecido pela fonte quente (Equação 3);
- Cálculo da evaporação do lado vinhaça (Equação 4);
- Determinação do vapor total gerado (Equação 7);
- Resolução do balanço de massa (Equações 1 e 2);
- Cálculo da temperatura do efeito (Equação 9);
- Determinação da água de resfriamento necessária no condensador (Equação 10);
- Utilização do *Solver* para determinação da área necessária em cada efeito e a vazão de vapor alcoólico requisitada para uma evaporação total de 180.000 kg/h;
- Determinação da utilização de vapor alcoólico e capacidade de evaporação de vinhaça (Equações 13 e 14).

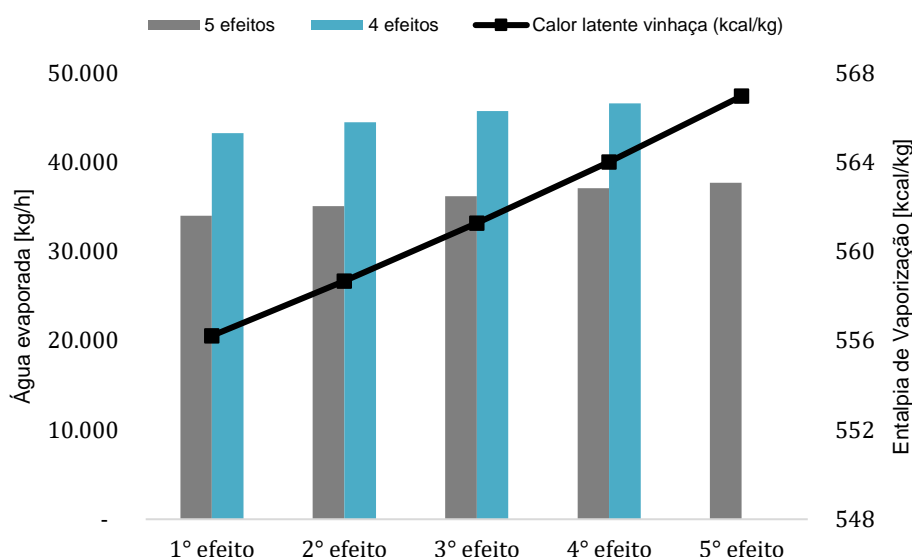
Com efeito de avaliar outro layout possível, a metodologia de cálculos foi repetida com as devidas modificações para o cálculo de um evaporador de 4 efeitos para a mesma capacidade de evaporação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4. 1. BALANÇOS DE MASSA

O balanço de massa no evaporador é utilizado para demonstrar a quantidade de água evaporada globalmente e em cada efeito de evaporação. Após a aplicação da metodologia de cálculo apresentada anteriormente, obteve-se que a quantidade de água evaporada aumenta levemente em cada um dos efeitos (em torno de 3% de vazão de vapor adicional por efeito), ao contrário do que se espera normalmente (Figura 3), uma vez que ocorre aumento do valor da entalpia de vaporização com a diminuição da pressão – assim, a condensação do vapor do lado casco transfere menos energia por unidade de massa do que a vaporização do lado tubo exige. Esse fenômeno é explicado pelo “*flasheamento*” vinhaça e condensado em cada um dos efeitos, que compensam o efeito do aumento de entalpia de vaporização. Nesse sentido, a utilização de um evaporador névoa turbulenta apresenta a vantagem de otimização da geração de vapor em cada efeito.

FIGURA 3: Análise da água evaporada por efeito.

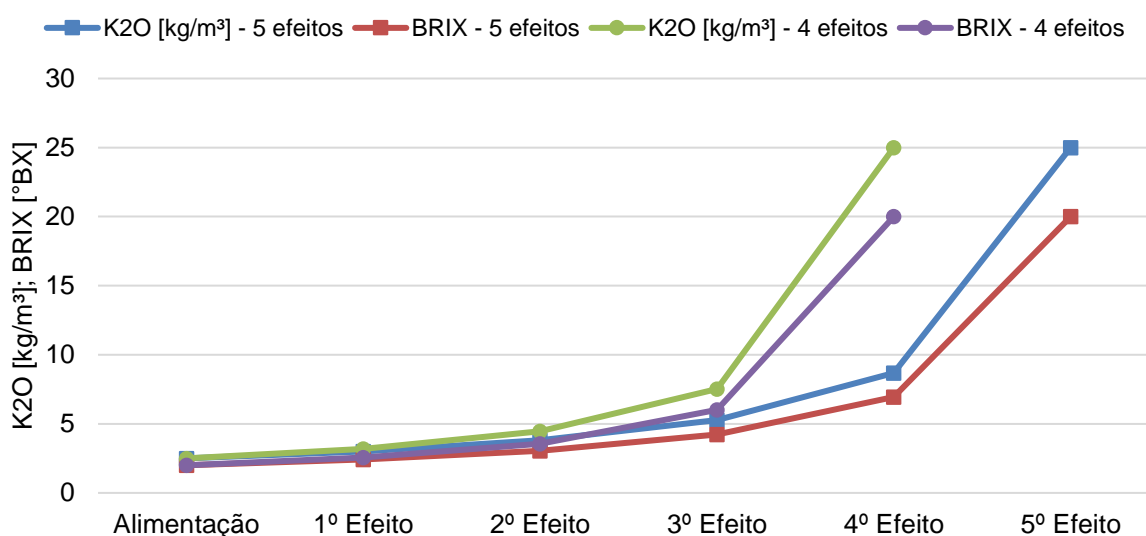


Fonte: Autoria própria

Ademais, é possível estabelecer um perfil de concentração nos efeitos evaporador, observando que ocorre um aumento de concentração abrupto nos últimos efeitos do concentrador, como visto na Figura 4. Assim, é esperado que ocorra

uma maior ocorrência de incrustações nesses últimos efeitos, que estão suscetíveis a uma condição de operação mais adversa que os primeiros corpos. Dessa forma, de maneira a estabelecer estabilidade operacional do evaporador de vinhaça, é recomendado que sejam instalados dois últimos efeitos em paralelo, possibilitando que ocorra a limpeza de um corpo sem parar o funcionamento do equipamento.

FIGURA 4: Perfil de concentrações no evaporador de vinhaça.



Fonte: Autoria própria

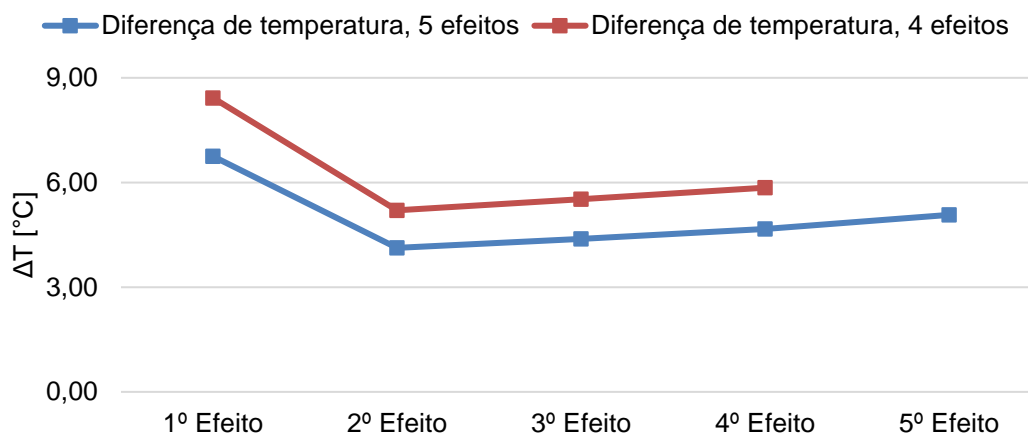
4. 2. BALANÇOS DE ENERGIA

Os balanços de energia no evaporador são uma ferramenta essencial para estabelecer as principais variáveis de dimensionamento do equipamento: a área e as diferenças de temperatura entre o fluido quente e o fluido frio.

Inicialmente, deve-se ter em mente que a diferença de temperatura total disponível em um sistema de evaporação de vinhaça que usa como fonte térmica o vapor alcoólico é pequena. No caso abordado, a diferença de temperatura total é de 25°C (diferença entre a temperatura do vapor alcoólico, 80 °C, e a temperatura do último efeito, 55 °C) – dessa forma, a diferença de temperatura em cada efeito, para um *design* de 5 efeitos é de aproximadamente 5°C; da mesma forma, para 4 efeitos a diferença de temperatura é aproximadamente igual a 6,25°C. Assim, é necessário que haja uma grande área de troca térmica disponível para compensar o efeito da temperatura.

Nesse sentido, os perfis de diferença de temperatura nos efeitos dão-se como mostrado na Figura 5.

FIGURA 5: Perfil de diferença de temperatura no evaporador de vinhaça.

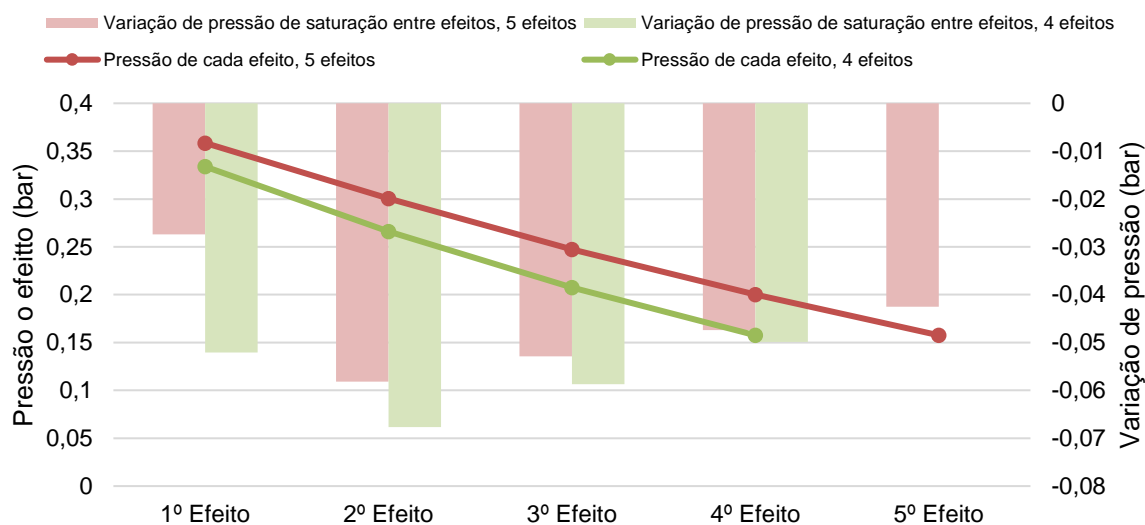


Fonte: Autoria própria

Outrossim, ressalta-se que outra diferença relevante no balanço de massa nos diferentes designs de evaporação é a influência da variação de pressão entre cada um dos efeitos. Como visto na Figura 6, no primeiro efeito de evaporação em um evaporador de 4 efeitos ocorre uma variação de pressão de saturação entre alimentação e o 1º efeito 190% maior do que em um evaporador de 5 efeitos. Tal fenômeno beneficia o “flasheamento” da vinhaça na entrada do corpo, gerando uma maior quantidade de vapor (195% maior do que no evaporador de 5 efeitos).

Além disso, o evaporador de 4 efeitos também possui uma maior variação de pressão de saturação entre os demais efeitos evaporativos, fato associado com a maior diferença de temperaturas entre efeitos, discutida anteriormente. Nesse sentido, um concentrador com menor quantidade de efeitos beneficia-se mais do efeito de geração de vapor por “flasheamento”.

FIGURA 6: Perfil de pressão e diferenças de pressão no evaporador de vinhaça.



Fonte: Autoria própria

Como visto, para um evaporador de 4 efeitos, é observado uma maior diferença de temperatura e pressão entre efeitos e, conseqüentemente, ocorre uma maior facilidade para se estabelecer um potencial de transferência de calor e gerar vapor por “flasheamento”. Entretanto, como mostra a Tabela 6, esses fatos não possibilitam uma área menor em cada um dos efeitos. Isso ocorre pois, para uma mesma capacidade de evaporação, é necessário que ocorra uma maior geração de vapor individualmente por efeito, necessitando dessa forma, uma maior transferência de energia que exige maior área de troca térmica.

TABELA 6: Principais diferenças entre um evaporador de vinhaça de 4 e 5 efeitos com uma capacidade de evaporação de 180 ton/h.

	Área individual [m ²]	Área total [m ²]	Diferença de temperatura média [°C]	Vapor alcoólico exigido [ton/h]	Água de resfriamento exigida [ton/h]
5 efeitos	4.581	22.907	5,00	77,3	1450,0
4 efeitos	4.632	18.527	6,25	97,6	1791,5

Fonte: Autoria própria

Por conseguinte, a análise dos dados permite concluir que um evaporador de quatro efeitos exige uma maior quantidade de vapor alcoólico para uma mesma capacidade de evaporação que um evaporador de 5 efeitos, além de possuírem maior área individual e menor área total instalada. Nesse sentido, evaporadores com mais efeitos podem ser projetados com menor área individual e requisitam menor quantidade de vapor, ao passo que possuem maior custo de instalação pois possuem maior área de evaporação total instalada e maior dificuldade operacional por possuírem uma menor diferença de temperatura em cada efeito.

Analogamente, observa-se que o *design* com 4 efeitos consome maior quantidade água de resfriamento do que o com 5 efeitos. Todavia, ambos projetos possuem um elevado consumo de água (superior a 1400 ton/h em ambos os casos), o que torna recomendado a utilização de um circuito fechado de água resfriada, com o reciclo da água aquecida em uma torre de resfriamento que retroalimenta água refrigerada no condensador. Esse *layout* permite um menor consumo total de água no processo.

Um maior detalhamento das correntes de processo calculadas está apresentado no apêndice A e B.

4. 2. 1. Análise do consumo de vapor e capacidade de evaporação

A aplicação das equações 11 e 12 em uma destilaria com capacidade de produção de 600 m³/dia de etanol hidratado a partir de um vinho com 10%v de etanol permite obter que a geração de vinhaça nesse sistema é de 235 ton/h e a geração de vapor alcoólico é de 98,2 ton/h. Dessa forma, a instalação de um evaporador de vinhaça de capacidade de evaporação de 180 ton/h permite a redução do volume total de vinhaça em 77% com um consumo de 79% do vapor alcoólico em um evaporador de 5 efeitos e de 99% do vapor alcoólico em um evaporador de 4 efeitos, como apresentado na Tabela 7.

Em conclusão, a instalação de um evaporador de vinhaça utilizando vapor alcoólico como fonte térmica é uma alternativa possível para a redução do volume total de vinhaça gerada numa destilaria de etanol, sem aumentar o consumo de vapor total em uma usina e otimizando a distribuição desse subproduto na lavoura de cana. São factíveis *designs* utilizando 4 ou 5 efeitos e a definição de qual o mais adequado deve tomar em conta diferenças no consumo e vapor alcoólico e na área instalada.

TABELA 7: Capacidade de evaporação e utilização do vapor alcoólico para os evaporadores projetados.

	Capacidade de evaporação	Utilização de vapor alcoólico
5 efeitos	77%	79%
4 efeitos		99%

Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos por meio da análise do balanço de massa e energia no evaporador de vinhaça, destaca-se que a quantidade de água evaporada em cada efeito apresentou um aumento discreto, contrariando as expectativas convencionais associadas à diminuição da pressão. Esse fenômeno peculiar é atribuído ao "*flasheamento*" da vinhaça e condensado em cada efeito que compensa o aumento da entalpia de vaporização. A introdução de um evaporador névoa turbulenta emerge, nesse sentido, como uma estratégia promissora para otimizar a geração de vapor em cada estágio do processo, evidenciando a importância de considerações específicas na escolha do design do evaporador.

Além disso, a análise dos perfis de concentração nos efeitos revelou um aumento acentuado nos últimos estágios do concentrador, indicando a potencial formação de incrustações nessas regiões. Como resposta a esse desafio operacional, sugere-se a instalação de dois últimos efeitos em paralelo, permitindo a limpeza de um corpo sem interromper o funcionamento do equipamento. Essa abordagem contribui para a estabilidade operacional do evaporador de vinhaça, destacando a importância de estratégias de projeto para mitigar problemas operacionais.

Quanto à análise dos balanços de energia, a diferenciação entre evaporadores de 4 e 5 efeitos revelou que, embora um evaporador de quatro estágios proporcione uma maior diferença de temperatura, ele demanda uma maior quantidade de vapor alcoólico e área de troca térmica individual. Além disso, evaporadores de 4 efeitos beneficiam-se mais do efeito de "*flasheamento*" de vinhaça, gerando mais vapor através desse fenômeno pois possuem uma maior diferença de pressão entre efeitos do que evaporadores de 5 efeitos. Em contrapartida, evaporadores de cinco efeitos demonstram maior eficiência, requerendo menos vapor e área individual, ressaltando a importância de considerações econômicas e operacionais na escolha do número de estágios. Essa análise contribui para uma compreensão mais abrangente das variáveis críticas no dimensionamento de evaporadores de vinhaça e oferece direcionamentos valiosos para projetos futuros na área, visto que a concentração de vinhaça subproduto é uma estratégia relevante e energeticamente viável para otimizar a disposição desse subproduto nas lavouras de cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, C. S. PANDEY, G. S. Soil pollution by spent wash discharge – depletion of manganese (II) and impairment of its oxidation. **Journal of Environmental Biology**. v.15, i. 1, p. 49-53, 1994.
- ALEIXO, E. H. A nova geração de evaporadores e o uso dos condensadores evaporativos como alternativa para a redução do consumo de água no processo de evaporação. Monografia (Pós-graduação em Gestão Industrial Sucoenergética) – Pós-graduação MTA, Piracicaba, 2012.
- ANP. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo e do Gás Natural, 2021. Rio de Janeiro, 2022. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP.
- ARAUJO, E. C. DA C.; Evaporadores. São Carlos: EdUFSCar, 2012. 92 p.
- CARVALHO, T. C.; SILVA, C. L. Redução da quantidade de vinhaça através da evaporação. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**. v.6, 17 p., 2010.
- CHRISTOFOLETTI, C. A. et al. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2752–2761, 1 dez. 2013.
- CITROTEC. Evaporador de Névoa Turbulenta (ENET). Disponível em: <https://citrotec.com.br/produtos_citrico_EvaporadorEnetTropicais.html>. Acesso em: 2 dez. 2023.
- CORTES-RODRÍGUEZ, E. F. et al. Vinasse concentration and juice evaporation system integrated to the conventional ethanol production process from sugarcane – Heat integration and impacts in cogeneration system. **Renewable Energy**, v. 115, p. 474–488, 1 jan. 2018.
- CORTEZ, L. A. B.; SILVA, A. DE LUCAS JR, J.; JORDAN, R. A.; de CASTRO, L. R.. Biodigestão de efluentes. Biomassa para energia. Campinas: Editora da UNICAMP. cap, v. 15, p. 493-529, 2007.
- CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J. Principais sub-produtos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v. 2, n 2, p. 1-17, 1992.
- DIAS, M. O. S.; FILHO, R. M.; MANTELATTO, P. E.; CAVALETT, O.; ROSSELL, C. E. V.; BONOMI, A.; LEAL, M. L. R. V. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**. v. 15, p. 35-51, 2015.
- ELIA NETO, A. Estado da Arte da Vinhaça. *In*: 2º Workshop “Resíduos urbanos e agrícolas: energia, reciclagem de nutrientes e produção de fertilizantes”. 2016, Campinas.
- GAO, M. et al. Opportunities and Challenges for Biogas Development: a Review in 2013–2018. *Current Pollution Reports*, v. 5, n. 2, p. 25–35, 1 jun. 2019.

GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A. Ethanol fuel from biomass: A review. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 64, p. 809–821, nov. 2005.

JUN-FENG, W.; XIN-CHENG, T. Experimental Study and Numerical Simulation on Evaporative Cooling of Fine Water Mist in Outdoor Environment. 2009 International Conference on Energy and Environment Technology. Anais...out. 2009.

KUMAR, S.; VISWANATHAN, L. Production of biomass, carbon dioxide, volatile acids, and their interrelationship with decrease in chemical oxygen demand, during distillery waste treatment by bacterial strains. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 13, n. 2, p. 179–187, 1 fev. 1991.

LAIME, E. M. et al. Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 3, 3 dez. 2011.

MARENGO, G. Concentração de Vinhaça: Consumo de Vapor “Zero”. *In*: Seminário Brasileiro Agroindustrial, v. 12, 2011.

MATHWORKS. X Steam, Thermodynamic properties of water and steam. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam-thermodynamic-properties-of-water-and-steam>>. Acesso em: 28 dez. 2023.

NAKASHIMA, R. N.; OLIVEIRA JR, S. DE. Comparative exergy assessment of vinasse disposal alternatives: Concentration, anaerobic digestion and fertirrigation. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1969–1978, 1 mar. 2020.

NAVARRO, A. R.; SEPÚLVEDA, M. DEL C., M.; RUBIO, M. C. Bio-concentration of vinasse from the alcoholic fermentation of sugar cane molasses. **Waste Management**, v. 20, n. 7, p. 581–585, 1 nov. 2000.

ROBAK, K.; BALCEREK, M. Review of Second Generation Bioethanol Production from Residual Biomass. **Food Technology and Biotechnology**, v. 56, n. 2, p. 174–187, jun. 2018.

RODRIGUES, C.; SCHIAVON, L. H. Elaboração de projeto piloto de evaporador e monitoramento da formação e modos de limpeza das incrustações decorrentes do processo. **Unisanta Science and Technology**, v. 3, n. 2, 2014.

SINDHU, R. et al. Bioconversion of sugarcane crop residue for value added products – An overview. **Renewable Energy**, Special Issue: New Horizons in Biofuels Production and Technologies. v. 98, p. 203–215, 1 dez. 2016.

SOUSA, V. G. Alternativas para Valorização da Vinhaça. 2018. 36 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SZYMANSKY, M. S. E.; BALIBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão anaerobia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, p. 901-912, 2010.

ZARPELON, F. Destilação do etanol. Piracicaba: Stab - Sociedade dos Técnicos Açucareiros, 2020. 496 p.

APÊNDICE A – Balanços de massa e energia – Evaporador de vinhaça de 5 efeitos

	Alimentação	1º Efeito	2º Efeito	3º Efeito	4º Efeito	5º Efeito
Evaporador						
Área (m ²)		4581	4581	4581	4581	4581
Coef. U (kcal/h.m ² .°C)		600,00	1000,00	975,00	950,00	900,00
Delta de temperatura (°C)		6,75	4,13	4,39	4,67	5,07
Vinhaça						
Vazão de alimentação Vinhaça (kg/h)	200.000	200.000	166.011	130.942	94.758	57.691
Calor latente vinhaça (kcal/kg)		556	559	561	564	567
Temperatura (°C)	75,00	73,25	69,12	64,74	60,07	55,00
Flash de vinhaça (kg/h)		631	1229	1025	785	516
Flash de condensado (kg/h)		0	0	251,67	274,54	299,72
Evaporação (kg/h)		33.358	33.840	34.907	36.008	36.875
Vazão de saída de vinhaça (kg/h)		166.011	130.942	94.758	57.691	20.000
Vapor						
Vazão de alimentação Vapor (kg/h)	77.310	77.310	33.989	35.069	36.184	37.068
Calor latente vapor (kcal/kg)		240,0	556	559	561	564
Temperatura (°C)		80,00	73,25	69,12	64,74	60,07
Vazão de saída de condensado (kg/h)		77.310	33.989	35.069	36.184	37.068
Concentração						
K2O (kg/m ³)	2,5	3,0	3,8	5,3	8,7	25,0
BRIX	2	2,4	3,1	4,2	6,9	20,0

APÊNDICE B – Balanços de massa e energia – Evaporador de vinhaça de 4 efeitos

	Alimentação	1º Efeito	2º Efeito	3º Efeito	4º Efeito
Evaporador					
Área (m ²)		4632	4632	4632	4632
Coef. U (kcal/h.m ² .°C)		600,00	1000,00	975,00	950,00
Delta de temperatura (°C)		8,42	5,20	5,52	5,86
Vinhaça					
Vazão de alimentação Vinhaça (kg/h)	200.000	200.000	156.751	112.282	66.565
Calor latente vinhaça (kcal/kg)		557	560	564	567
Temperatura (°C)	75,00	71,58	66,37	60,86	55,00
Flash de vinhaça (kg/h)		1233	1459	1101	688
Flash de condensado (kg/h)		0	0	402,45	435,96
Evaporação (kg/h)		42.016	43.011	44.214	45.441
Vazão de saída de vinhaça (kg/h)		156.751	112.282	66.565	20.000
Vapor					
Vazão de alimentação Vapor (kg/h)	97.550	97.550	43.249	44.469	45.717
Calor latente vapor (kcal/kg)		240,0	557	560	564
Temperatura (°C)		80,00	71,58	66,37	60,86
Vazão de saída de condensado (kg/h)		97.550	43.249	44.469	45.717
Concentração					
K2O (kg/m ³)	2,5	3,2	4,5	7,5	25,0
BRIX	2	2,6	3,6	6,0	20,0