

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA QUÍMICA

DANILO PEDRO FREIRES DA SILVA

**FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA OPERAÇÃO UNITÁRIA DE
EVAPORADORES USADOS NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

JOÃO PESSOA – PB 2024

DANILO PEDRO FREIRES DA SILVA

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA OPERAÇÃO UNITÁRIA DE EVAPORADORES
USADOS NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

Trabalho Final de Curso ou Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva

JOÃO PESSOA – PB 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586f Silva, Danilo Pedro Freires da.
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA OPERAÇÃO UNITÁRIA DE
EVAPORADORES USADOS NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA /
Danilo Pedro Freires da Silva. - João Pessoa, 2024.
36 f. : il.

Orientação: Flávio Luiz Honorato da Silva.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. operações unitárias. 2. evaporação. 3.
evaporadores. 4. evaporadores de múltiplo efeito. 5.
evaporadores tipo roberts. I. Silva, Flávio Luiz
Honorato da. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)

DANILO PEDRO FREIRES DA SILVA

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA OPERAÇÃO UNITÁRIA DE
EVAPORADORES USADOS NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

Trabalho Final de Curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Química do
Centro de Tecnologia da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento aos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 15 de abril de 2024.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva
Orientador



Prof. Dr. Sharline Florentino de Melo Santos
Examinadora



Prof. Dr. Josilene de Assis Cavalcante
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus pelas graças alcançadas durante o período na universidade e a nossa senhora por ter me guiado todos os dias. À minha família, expresso minha sincera gratidão pelo apoio incondicional, encorajamento e compreensão durante o período de curso e da elaboração deste trabalho. Suas palavras de estímulo foram uma fonte constante de motivação, em especial aos meus pais: Jacilene Ferreira e Wagner Freires, que tiveram imenso esforço e dedicação e também me apoiaram financeiramente durante o processo educativo, também agradeço ao meu irmão, David Pedro, pelo apoio sempre que precisei.

Gostaria de agradecer ao meu amor, Luana Beatriz, por ter me apoiado nessa longa caminhada e nunca ter soltado a minha mão, sempre encorajando-me e motivando-me nos momentos mais difíceis da minha vida, tanto pessoal como acadêmico, suas palavras me fizeram acreditar que era capaz a seguir firmemente no meu objetivo.

Aos meus amigos: Eduarda, Bia, Isis, Joice, Layane, Bione, Humberto, Paulo e demais colegas, agradeço pela paciência, apoio moral e incentivo ao longo desta jornada acadêmica. Suas conversas inspiradoras e apoio mútuo foram essenciais para superar os desafios e alcançar os objetivos estabelecidos. Em especial agradeço a Paloma, José Carlos e Jhonatas que se tornaram mais que amigos na qual compartilharam não só da universidade comigo, mas também da vida, sempre sendo uma rede de apoio.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Dr. Flávio Luiz, por seu apoio, orientação e incentivo ao longo deste processo. Suas sugestões, conhecimento e compreensão foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos membros da banca examinadora, Dra. Sharline Florentino e Dra. Josilene Cavalcante, por dedicarem seu tempo e expertise para avaliar este trabalho e fornecer valiosos comentários e sugestões.

Por fim, gostaria de expressar meu mais profundo agradecimento à instituição UFPB, por fornecer os recursos necessários para a realização do curso de Engenharia Química, e a empresa júnior PROJEQ pela oportunidade de desenvolvimento, e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para meu sucesso.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

A evaporação é um processo amplamente utilizado em diversas indústrias, desempenhando um papel crucial na concentração de soluções líquidas. Esse processo envolve a remoção controlada do solvente de uma solução líquida, resultando na concentração do soluto. Existem vários tipos de evaporadores, cada um com seu princípio de funcionamento específico e aplicação particular. Os evaporadores de múltiplo efeito são comumente utilizados devido à sua alta eficiência energética. Nesses evaporadores, o vapor gerado em um estágio é utilizado como fonte de calor em estágios subsequentes, resultando em uma economia significativa de energia. No contexto deste Trabalho de Conclusão de Curso, objetivou-se apresentar no estudo, por meio de um levantamento bibliográfico, sobre a operação unitária de evaporação e os tipos de evaporadores de caldo no Brasil, buscando a compreensão dos princípios básicos da evaporação e dos diferentes tipos de evaporadores. Além disso, é importante discutir as aplicações industriais desses equipamentos, os desafios operacionais e as estratégias de otimização. O estudo aprofundado desses tópicos contribui não apenas para o avanço do conhecimento acadêmico, mas também para a aplicação prática na indústria, visando aprimorar os processos de produção e a eficiência energética.

Palavras-chave: operações unitárias; evaporação; evaporadores; evaporadores de múltiplo efeito; evaporadores tipo roberts.

ABSTRACT

Evaporation is a widely used process in various industries, playing a crucial role in the concentration of liquid solutions. This process involves the controlled removal of solvent from a liquid solution, resulting in the concentration of the solute. There are several types of evaporators, each with its specific operating principle and particular application. Multiple-effect evaporators are commonly used due to their high energy efficiency. In these evaporators, the vapor generated in one stage is used as a heat source in subsequent stages, resulting in significant energy savings. In the context of this Thesis, the objective was to present, through a literature review, the unit operation of evaporation and the types of juice evaporators in Brazil, aiming to understand the basic principles of evaporation and the different types of evaporators. Additionally, it is important to discuss the industrial applications of these equipment, operational challenges, and optimization strategies. The in-depth study of these topics contributes not only to the advancement of academic knowledge but also to practical application in the industry, aiming to improve production processes and energy efficiency.

Keywords: unit operations; evaporation; evaporators; multi-effect evaporators; roberts type evaporators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Componentes básicos de um evaporador	13
Figura 2	Evaporadores de simples efeito com um passo	14
Figura 3	Evaporador de simples efeito e circulação forçada	14
Figura 4	Evaporador de múltiplo efeito	15
Figura 5	Evaporador de tubos verticais curtos e circulação natural	16
Figura 6	Evaporador de tubos verticais longos	17
Figura 7	Evaporador de tubos longos e película ascendente	18
Figura 8	Evaporador de tubos longos e película descendente	19
Figura 9	Evaporador tipo satélite a placas	20
Figura 10	Evaporador <i>Centri-therm</i>	21
Figura 11	Evaporador múltiplo efeito com alimentação direta	23
Figura 12	Evaporador múltiplo efeito com alimentação inversa	24
Figura 13	Evaporador múltiplo efeito com alimentação mista	24
Figura 14	Evaporador múltiplo efeito com alimentação paralela	25
Figura 15	Evaporador múltiplo efeito do tipo roberts	26
Figura 16	Junta do corpo do vaso e da calandra	28
Figura 17	Disposição dos tubos	28
Figura 18	Esquema de volume de controle	29

SUMÁRIO

SUMÁRIO	8
1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. OBJETIVOS GERAIS	10
3. METODOLOGIA	10
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
4.1. EVAPORAÇÃO	11
4.2. CLASSIFICAÇÃO DOS EVAPORADORES	13
4.3. OPERAÇÃO DE SIMPLES E MÚLTIPLO EFEITO.....	13
4.3.1. Evaporação de simples efeito	13
4.3.2. Evaporação de múltiplo efeito	15
4.4. TIPOS DE EVAPORADORES	15
4.5. EVAPORADOR DE MÚLTIPLO EFEITO.....	21
4.5.1. Alimentação direta ou frontal	22
4.5.2. Alimentação reversa.....	23
4.5.3. Alimentação Mista.....	24
4.5.4. Alimentação Paralela	25
4.6. EVAPORADOR DO TIPO ROBERTS.....	25
4.6.1. Características de um evaporador múltiplo efeito do tipo Roberts	26
4.7. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA EM UM EVAPORADOR DO TIPO ROBERTS	29
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

A indústria sucroalcooleira desempenha um papel crucial na economia global, fornecendo não apenas açúcar e etanol, mas também uma ampla gama de subprodutos que alimentam várias cadeias produtivas. Dentro desse contexto, as operações unitárias desempenham um papel fundamental na otimização dos processos industriais, garantindo eficiência, produtividade e qualidade dos produtos finais. Entre as diversas operações unitárias presentes na indústria sucroalcooleira, os evaporadores se destacam como componentes essenciais nos processos de concentração de soluções, desidratação de produtos e recuperação de subprodutos valiosos. Questões como eficiência energética, controle de temperatura e pressão, escolha do tipo de evaporador mais adequado e gerenciamento de subprodutos são apenas algumas das preocupações enfrentadas pelos engenheiros e gestores desta indústria.

Evaporação é a remoção do solvente, em forma de vapor, de uma solução. Esta operação ocorre em um equipamento adequado, denominado evaporador, e é utilizada para concentrar uma solução composta por um soluto não volátil e um solvente volátil. A concentração ocorre por meio da ebulição da solução com a retirada do vapor gerado. Na maioria das aplicações o solvente é a água, o soluto é um sólido com pressão de vapor muito baixa e o produto que se pretende obter é a solução concentrada. Porém, em algumas situações, o produto principal é o vapor gerado, e não a solução concentrada (ARAÚJO, 2011 apud LIMA, 2020).

O processo de evaporação em evaporadores geralmente segue uma sequência de etapas: o líquido de alimentação é introduzido no evaporador, onde é aquecido para induzir a evaporação do solvente; o vapor gerado é então condensado, resultando na separação do solvente evaporado do produto concentrado. Esse produto concentrado pode ser utilizado diretamente ou submetido a etapas adicionais de processamento.

Na sua forma básica, portanto, um evaporador é constituído por um trocador de calor, capaz de levar a solução à fervura, e de um dispositivo para separar a fase vapor do líquido em ebulição (FOUST et al., 1982).

A evaporação, não resume apenas na concentração de uma solução propriamente dita, mas abrange um leque maior nas indústrias, sendo responsável pelo balanço energético de uma indústria obtendo economia de energia através dos vapores, condensados gerados e transferência de calor envolvido neste processo (POLOVNIKOV, 2014).

A etapa de evaporação tem grande influência no balanço energético da usina e a qualidade do xarope obtido nesse processo tem impacto no desempenho e no consumo de energia de etapas posteriores. A etapa de evaporação tem grande peso no balanço energético das usinas produtoras de açúcar, pois ao mesmo tempo em que necessita de grande quantidade de vapor das caldeiras também gera muito vapor vegetal de baixa pressão, utilizados por outros equipamentos da usina (ALBUQUERQUE, 2014 apud LIMA, 2020).

Um sistema de evaporadores de múltiplos efeitos consiste em vários evaporadores conectados em série, em que o vapor produzido no primeiro efeito é utilizado como vapor de aquecimento no efeito seguinte. O vapor gerado no último efeito vai para um condensador (ARAÚJO, 2011 apud LIMA, 2020). Com o intuito de economia e eficiência energética em uma usina é necessário ter evaporadores múltiplos efeitos.

O evaporador tipo Robert é o mais utilizado nas indústrias açucareiras devido a sua área de aquecimento, diante desse aspecto, as indústrias não visam somente o produto, e sim um subproduto, o bagaço (LEHNBERGER, 2014 apud CRIVELLARO, 2016).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Realizar um levantamento bibliográfico sobre a operação unitária de evaporação e os tipos de evaporadores de caldo no Brasil.

3. METODOLOGIA

Foi utilizado a “revisão narrativa” que apresenta um levantamento da literatura de um tema que não emprega critérios explícitos e sistemáticos para a investigação e análise crítica da literatura. A busca pelo tema não necessita exaurir as fontes de informações. Não é utilizada estratégias de busca sofisticadas e exaustivas. “A seleção dos estudos e a interpretação das informações podem estar sujeitas à subjetividade dos autores. É adequada para a fundamentação teórica de artigos, dissertações, teses, trabalhos de conclusão de cursos” (IP apud UNESP, 2015).

As fontes utilizadas para realização do levantamento bibliográfico deste estudo foram:

- Google Acadêmico: Plataforma escolhida por sua base de dados indexar uma grande variedade de fontes acadêmicas nacionais e internacionais, incluindo revistas científicas, repositórios institucionais, sites de universidades, eventos acadêmicos, etc.

- Repositórios digitais: Além do Google Acadêmico, também foi utilizado diretamente o repositório digital de instituições de ensino nacionais, em busca de teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso relacionados ao tema em questão.

Os filtros utilizados para selecionar os trabalhos partiram das palavras-chave, buscando os seguintes termos: operações unitárias; evaporação; evaporadores; evaporadores de múltiplo efeito; evaporadores tipo roberts

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. EVAPORAÇÃO

O princípio da operação de evaporação consiste na concentração de sólidos de uma solução realizada pela ebulição e liberação do vapor d'água através do emprego de calor, a fonte de calor é sempre indireta (WESTPHLEN, 1999).

Segundo Ely et al. (2001) a evaporação é utilizada para eliminar água de alimentos líquidos diluídos, ou seja, alimentos com baixa concentração, transformando-os em produtos mais concentrados. A evaporação ela se difere da desidratação pois o produto desse processo permanece no estado líquido assim como também se difere da destilação pois os vapores produzidos permanecem sempre em concentrações iguais.

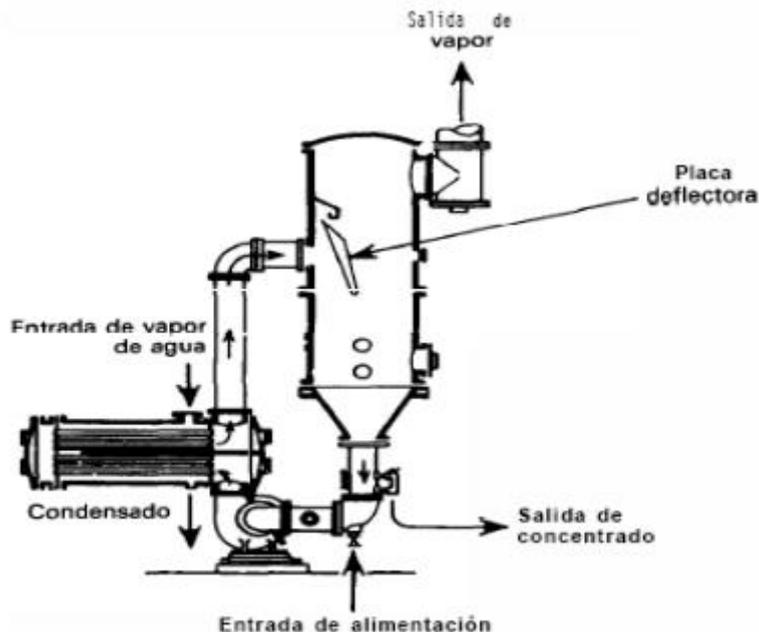
Os equipamentos utilizados para realizar operações de evaporação são chamados de evaporadores, eles são formados por duas partes: um trocador de calor e um separador, o trocador aquece a solução a ser concentrada até que esta entre em ebulição, enquanto o vapor produzido é separado da fase líquida, é possível observar na Figura 1 as características e componentes de um evaporador. O produto do evaporador é o líquido concentrado e o meio de aquecimento é normalmente utilizado vapor de água, que por consequência passa novamente para o estado líquido após ceder seu calor de condensação para a solução a ser concentrada.

No decorrer do processo de evaporação, ocorre a transferência de calor sensível do vapor para o líquido a ser evaporado. Este processo tem a finalidade de elevar a temperatura da solução até atingir o seu ponto de ebulição. Para atingir este ponto, o calor latente de vaporização é fornecido pelo vapor para formar bolhas de vapor na superfície do líquido a ser evaporado deixando-o em estado de ebulição (FELLOWS, 2006).

Para que a evaporação ocorra é necessário o fornecimento de calor latente, oriundo das turbinas na forma de vapor escape para efetuar a vaporização do solvente. O fluido a ser concentrado ocupa a parte interna dos tubos, trocando calor com o vapor. Na realização da

troca de calor ocorre a condensação do vapor, sendo o mesmo utilizado posteriormente nas caldeiras (ARAÚJO, 2012 apud CRIVELLARO, 2016).

Figura 1 – Componentes básicos de um evaporador



Fonte: PEREIRA (s.d.)

Na indústria de alimentos os sistemas de evaporação necessitam ser cuidadosamente projetados para evitar alterações indesejáveis aos alimentos, tais como: perda de aromas, escurecimento devido a reações de *Maillard*, gelatinização de amidos, desnaturação de proteínas, e degradação de nutrientes como vitaminas, que normalmente ocorrem quando um alimento é aquecido até a temperatura de ebulição normal da água (BARBOSA, 2014).

Para se evitar a ocorrência destes efeitos normalmente são utilizadas duas estratégias: o uso de vácuo (para que a ebulição da água ocorra em temperaturas menores, sendo assim menos prejudiciais ao alimento) e o uso de equipamentos que permitam um pequeno tempo de residência (para minimizar o tempo no qual o alimento se encontra em temperaturas danosas) (WESTPHLEN, 1999).

Os sistemas de evaporação são a base para a economia de energia do processo, isso levando em consideração as condições de evaporador para evaporador. Na concentração do fluido ocorre a formação de espumas, devido à movimentação da solução em meio aos tubos do fluido. O volume do fluido não deve ultrapassar 1/3 do corpo do evaporador, para que essa espuma não seja arrastada para a calandra do próximo evaporador (RONKIN, 2013, p. 40-45).

Com a solução em concentração ocorre o aumento de algumas propriedades como densidade, viscosidade e o ponto de ebulição aumentam com isso o coeficiente global tendem a reduzir, onde a tendência a incrustações na tubulação ocorre, são casos onde ocorrem à cristalização da solução, a concentração em evaporação de múltiplos efeitos é uma curva crescente desde a entrada da solução até a saída da solução concentrada (ARAÚJO, 2012 apud CRIVELLARO, 2016, p. 61-70).

4.2. CLASSIFICAÇÃO DOS EVAPORADORES

Os evaporadores são divididos em três tipos, de acordo com sua operação, eles podem ser:

- Sistemas contínuos: são evaporadores cujo fluxo de entrada é de mesma vazão que o de saída, sem interrupção.
- Sistemas Semicontínuos: são evaporadores cujo um dos fluxos, seja ele o de entrada ou de saída, operam de maneira contínua e o outro no sistema de bateladas;
- Sistemas ‘Batch’: são evaporadores que operam no sistema de batelada.

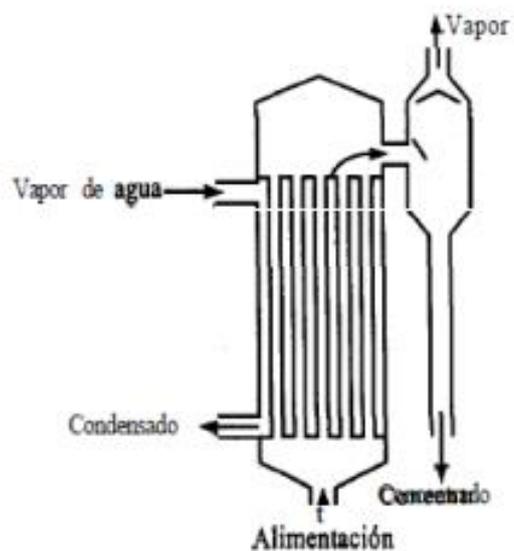
Na indústria de Alimentos, os sistemas mais utilizados são os sistemas contínuos por diversos motivos, tais como maior rendimento energético, maior controle, menor espaço requerido para uma determinada vazão e menor mão-de-obra envolvida no processo (BRANDÃO; TEIXEIRA, 1985 apud BARBOSA, 2014).

4.3. OPERAÇÃO DE SIMPLES E MÚLTIPLO EFEITO

4.3.1. Evaporação de simples efeito

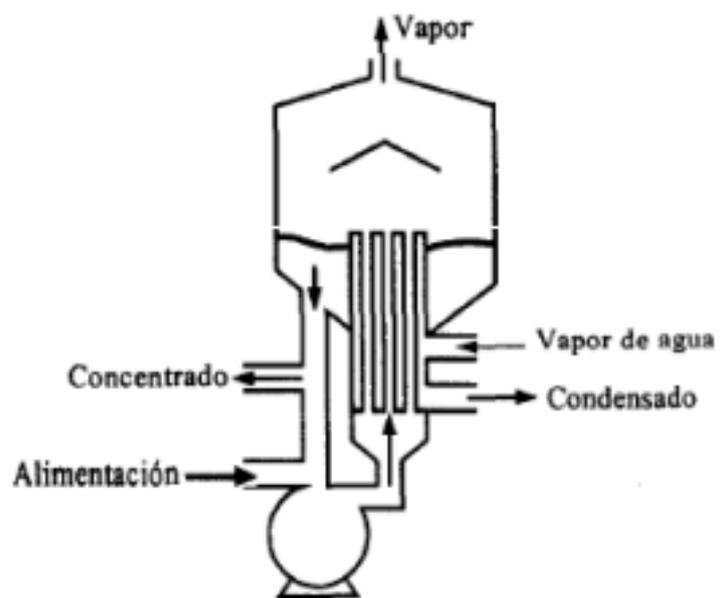
A evaporação de simples efeito consiste em uma operação onde utiliza-se apenas 1 evaporador, todo o vapor utilizado no processo é gerado por um líquido em ebulição, após a troca térmica este vapor sofre um fenômeno chamado condensação e é descartado, na Figura 2 e 3 temos exemplos de evaporadores de simples efeito.

Figura 2 - Evaporador de simples efeito com um passo



Fonte: PEREIRA (s.d.)

Figura 3 - Evaporador de simples efeito de circulação forçada

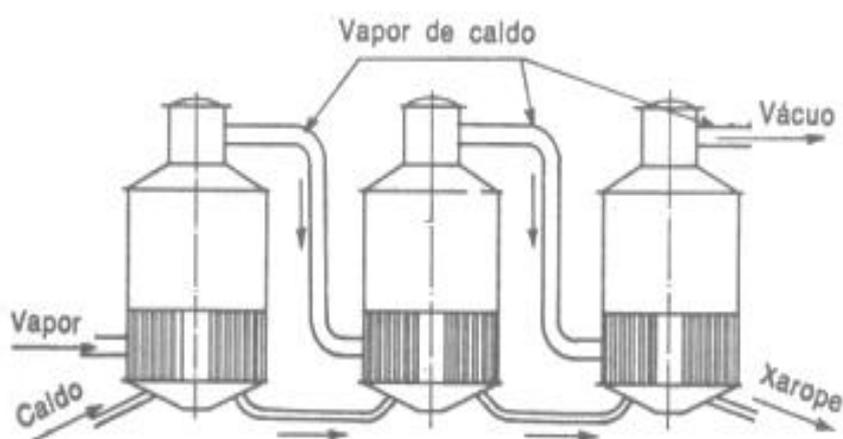


Fonte: PEREIRA (s.d.)

4.3.2. Evaporação de múltiplo efeito

A evaporação de múltiplo efeito consiste em mais de um evaporador ligados entre si, como representado na Figura 4. O vapor gerado no primeiro evaporador, vapor vegetal 1, é utilizado como alimentação da unidade aquecedora do segundo evaporador, enquanto o vapor condensado é descartado. O líquido concentrado passa de um evaporador para o outro concentrando cada vez mais. Esse processo se repete independente da quantidade de evaporadores no processo de múltiplo efeito.

Figura 4 - Evaporadores múltiplo efeito



Fonte: Hugot (1969).

4.4. TIPOS DE EVAPORADORES

No que diz respeito aos tipos de evaporadores, há várias fontes bibliográficas que apresentam e descrevem os principais tipos de evaporadores como: (FELLOWS, 2006; BRANDÃO e TEIXEIRA, 1985 apud BARBOSA, 2014; FOUST et al., 1982). Os principais tipos de evaporadores são mostrados a seguir:

- Evaporadores de tacho aberto ou fechado

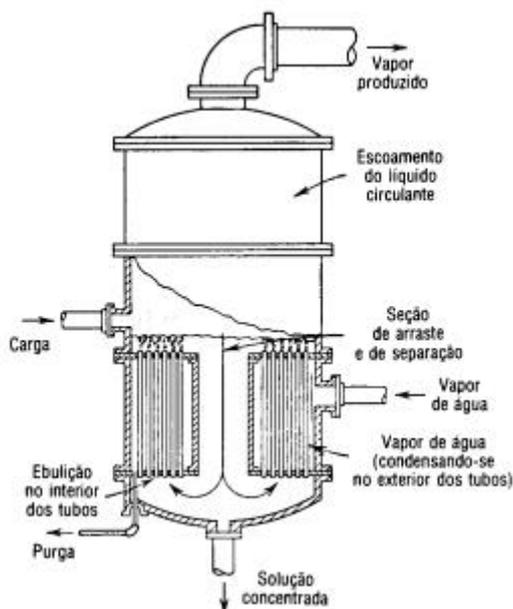
Trata-se de um dos métodos mais antigos de concentração, ainda utilizado hoje em dia na produção de doces e geleias. Consiste em um tacho hemisférico aquecido diretamente por gás, eletricidade ou indiretamente por vapor que passa por tubos internos ou camisas. Geralmente, um agitador central ou um tipo de raspador é adicionado ao tacho para aumentar a taxa de transferência de calor por convecção forçada e evitar que o produto se deposite nas paredes do recipiente, o que poderia causar superaquecimento e desenvolver sabores e odores indesejáveis. Embora tenham uma eficiência relativamente baixa em termos de transferência

de calor, esses evaporadores são de fácil construção e manutenção, com um baixo custo de investimento.

– Evaporadores de tubo curto

Este tipo de evaporador é composto por uma estrutura que abriga um conjunto de tubos, geralmente dispostos verticalmente, para facilitar as correntes de convecção natural e, por conseguinte, aumentar as taxas de transferência de calor (Figura 5). Apresentam custos de construção e manutenção reduzidos, porém, são geralmente inadequados para o processamento de produtos com alta viscosidade, devido à circulação deficiente e ao risco de superaquecimento dos alimentos. O líquido a ser evaporado é introduzido no evaporador e aquecido pela condensação do vapor d'água que circula pelos tubos. Quando atinge o ponto de ebulição, o líquido sobe pelos tubos e, em seguida, recircula por um tubo central em um fluxo descendente. Alguns evaporadores deste tipo podem incluir um tubo externo para a recirculação do produto, conhecido como calandra, que intensifica as correntes de convecção e as taxas de transferência de calor, além de facilitar o processo de limpeza.

Figura 5 - Evaporador de tubos verticais curtos e circulação natural

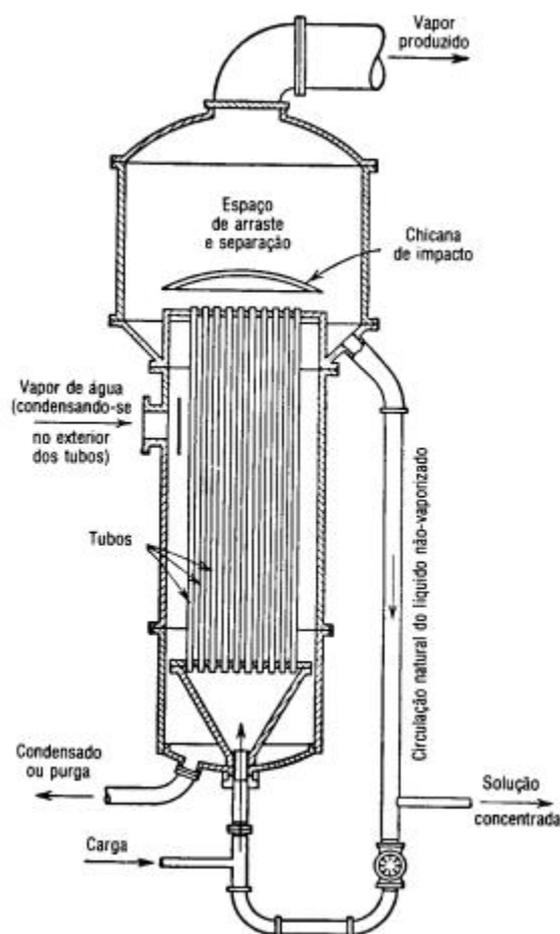


Fonte: FOUST et al. (1982).

– Evaporadores de tubo longo

Os evaporadores de tubo longo se destacam por suas elevadas taxas de transferência de calor e eficiência energética. Consistem em um conjunto de tubos dispostos dentro de uma carcaça de vapor, que pode chegar até 15 metros de altura. Antes de entrar no evaporador, o líquido a ser evaporado é aquecido até quase atingir o ponto de ebulição. Em seguida, é introduzido nos tubos do evaporador, onde é aquecido até atingir o ponto de ebulição. A expansão do vapor induz a subida de uma fina película do produto altamente concentrado ao longo das paredes de cada tubo. Posteriormente, o produto é separado do vapor e retirado do evaporador. O vapor resultante desse processo pode ser reaproveitado em sistemas de múltiplos efeitos ou de recuperação de vapor. A Figura 6 traz uma representação desse evaporador.

Figura 6 - Evaporador de tubos verticais longos

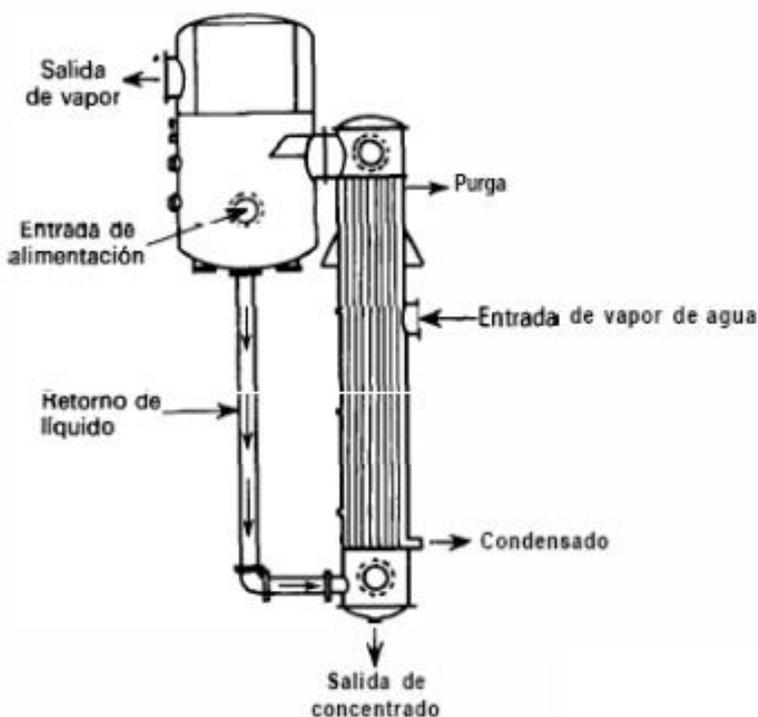


Fonte: FOUST et al. (1982).

Os evaporadores de tubo longo podem ser classificados em duas categorias: filme ascendente e filme descendente, representados respectivamente nas Figuras 7 e 8.

- Película ascendente: Estes evaporadores são capazes de processar alimentos líquidos de baixa viscosidade, os quais entram em ebulição dentro de tubos verticais. O aquecimento desses tubos é gerado pelo vapor que circula ao redor deles, resultando no ascenso do líquido pelo interior dos tubos, impulsionado pelos vapores formados na parte inferior. O movimento ascendente dos vapores forma uma película que se desloca rapidamente para cima. Essa configuração de evaporador alcança coeficientes de transferência de calor elevados e permite a recirculação do alimento líquido até que a concentração desejada seja alcançada. O tempo de residência do líquido no evaporador é de aproximadamente 3 a 4 segundos.

Figura 7 - Evaporador de tubos longos e película ascendente

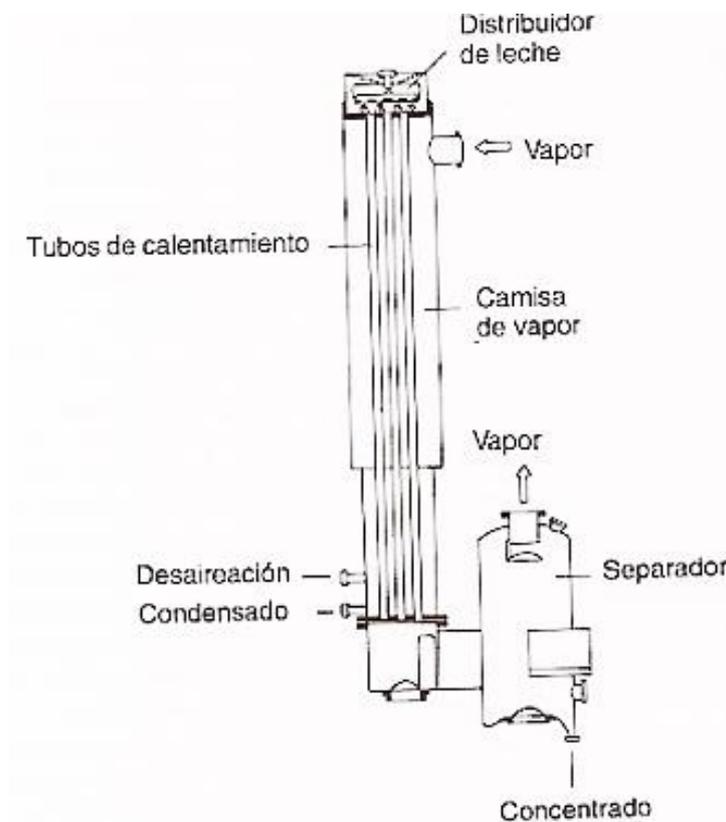


Fonte: PEREIRA (s.d.).

- Película descendente: Estes evaporadores, são amplamente utilizados na indústria de alimentos devido ao curto tempo de residência, que geralmente varia de 5 a 30 segundos, reduzindo assim os danos ao produto alimentício. A alimentação deste tipo de evaporador é feita pela parte superior dos tubos. O vapor condensa na superfície externa dos tubos verticais. Em indústrias de sucos cítricos, são empregados equipamentos conhecidos como TASTE (*Thermally*

Accelerated Short Time Evaporator), notáveis pelo sistema de distribuição uniforme de líquido pelos tubos do equipamento, esta distribuição pode ser feita por meio de vertedores cuidadosamente nivelados ou também pela pulverização direta do líquido sobre as paredes dos tubos, o qual é alcançado pela geração de uma mistura de vapor e pequenas gotículas de líquido através de uma redução abrupta de pressão.

Figura 8 - Evaporador de tubos longos e película descendente



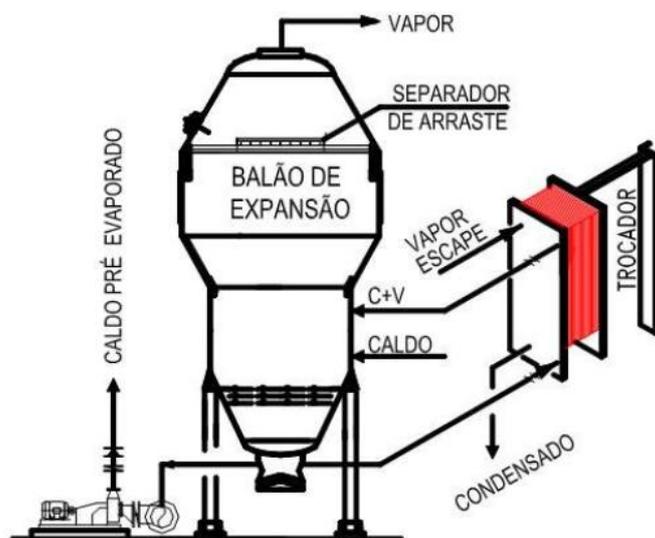
Fonte: INDUSTRIAL (2012)

– Evaporadores de placas

Assim como os trocadores de calor de placas, os evaporadores de placas apresentam uma série de vantagens em comparação com os evaporadores convencionais do tipo casco-tubo. Estas vantagens incluem altas velocidades de escoamento que resultam em coeficientes de transferência de calor elevados, pequenas áreas de instalação, facilidade de limpeza, ausência de pontos mortos onde pode ocorrer acúmulo de material e um curto tempo de permanência. No caso dos evaporadores de placas, o líquido é concentrado ao passar pelos

espaços entre as placas, sendo que o número de placas no equipamento é determinado pela taxa de produção e pelo grau de concentração desejado. A mistura de produto concentrado e vapor é separada fora do evaporador. Este tipo de evaporador, apresentado na Figura 9, é especialmente recomendado para processamento de produtos lácteos, sucos de frutas e bebidas com baixo teor alcoólico.

Figura 9 - Evaporador tipo satélite a placas



Fonte: PERES (2020).

– Evaporadores de fluxo expandido

Os evaporadores de fluxo expandido operam com base nos mesmos princípios dos evaporadores de placa, porém em vez de placas, utilizam uma série de cones invertidos. O líquido a ser evaporado é direcionado a partir de um eixo central para os espaços alternados entre os cones, onde evapora à medida que percorre canais de fluxo com áreas progressivamente maiores. Enquanto isso, o vapor d'água circula de cima para baixo nos canais intercalados. Após deixar o conjunto de cones, a mistura de concentrado e vapor é separada em uma carcaça com um design especial que induz um efeito de ciclone. As vantagens desse tipo de evaporador incluem um curto tempo de permanência, flexibilidade considerável devido à possibilidade de ajustar o número de cones, e sua natureza compacta em termos de equipamento.

– Evaporadores *Centri-therm*

Os evaporadores *Centri-therm* são um tipo de evaporador mecânico que, embora visualmente semelhante aos evaporadores de fluxo expandido, operam com princípios distintos. Enquanto nos evaporadores de fluxo expandido o líquido é impulsionado pela pressão do vapor, nos evaporadores *Centri-therm* a força motriz para o movimento do líquido é a força centrífuga. O líquido é direcionado através de um tubo central para os lados inferiores de cones ocios giratórios, onde imediatamente se espalha, formando uma película fina com cerca de 0,1 mm de espessura. O vapor d'água é condensado no lado oposto de cada cone e rapidamente evapora o líquido. O produto obtido por este equipamento, quando diluído novamente, mantém características nutricionais e sensoriais quase idênticas ao produto original. Este tipo de evaporador, representado pela Figura 10, é comumente utilizado na produção de chás, cafés e enzimas empregadas no processamento de alimentos.

Figura 10 – Evaporador *Centri-therm*



Fonte: AARON (s.d.)

4.5. EVAPORADOR DE MÚLTIPLO EFEITO

A evaporação em múltiplo efeito é utilizada geralmente quando deseja-se aumentar a eficiência térmica e energética da planta industrial. Segundo Foust et al. (1982), os evaporadores de múltiplo efeitos têm como característica a divisão da evaporação em diversos corpos de equipamentos, cada divisão é chamada de efeitos ou estágios, a quantidade de estágios depende da visão econômica e produtiva da planta industrial.

A evaporação do caldo de cana na maioria das usinas de açúcar do Brasil é realizada em evaporadores com quatro efeitos. Atualmente, de forma a aumentar a capacidade de evaporação, tem-se instalado um quinto vaso, conhecido como pré-evaporador e que na prática funciona como uma primeira etapa da evaporação, o que faz com que esta operação seja realizada em um quádruplo efeito (SANTOS, 2007).

Segundo Foust et al. (1982), o princípio subjacente ao processo de múltiplo efeito é a maximização da eficiência térmica através da reutilização da água evaporada de um estágio para aquecer o próximo. Isso implica que o vapor gerado é empregado apenas no primeiro estágio, enquanto vapor vegetal é utilizado nos subsequentes. Portanto, é crucial que a temperatura de ebulição do líquido de alimentação nos estágios subsequentes seja mais baixa, permitindo que o vapor vegetal produzido no estágio inicial se condense, liberando seu calor latente de condensação. Em termos de consumo de vapor, pode-se calcular que o consumo total de vapor em um sistema de evaporação de múltiplos efeitos é determinado pelo consumo de vapor de um sistema de evaporação de único efeito dividido pelo número de estágios.

Entende-se que ao passar do primeiro para o segundo estágio, a solução torna-se mais concentrada, um fenômeno que se repete a cada redirecionamento para um novo corpo. A pressão do estágio subsequente será menor do que a do anterior, o que resulta em uma temperatura de ebulição mais baixa para a solução mais concentrada em comparação com a menos concentrada.

Vácuo é usado após o primeiro efeito de modo a aumentar a diferença total de temperatura entre o vapor de um evaporador e a temperatura de ebulição do caldo no próximo evaporador (SILVA, 2013).

A escolha do número de efeitos é sempre baseada em critérios econômicos, quanto maior o número de efeitos menor será o consumo de vapor de aquecimento e, portanto, menor será o custo relativo ao consumo de energia. Por outro lado, quanto maior o número de efeitos menor serão as diferenças de temperatura empregadas como força motriz para transferência de calor em cada efeito e, portanto, maior será a área de troca térmica requerida para a construção do evaporador (WESTPHLEN, 1999).

Os evaporadores de Múltiplos efeitos podem ser acoplados de 4 maneiras diferentes em função dos fluxos de entrada e saída de vapor e líquido, são eles: Alimentação frontal ou direta, reversa, mista e paralela.

4.5.1. Alimentação direta ou frontal

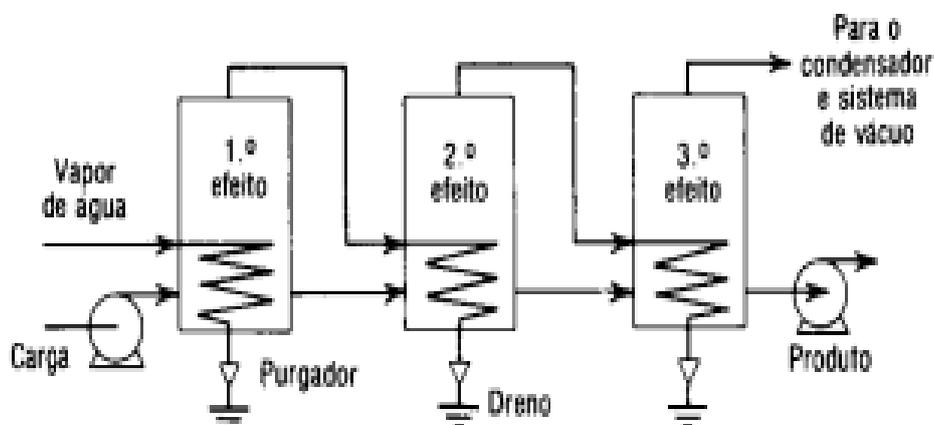
Segundo Foust et al. (1982), no sistema de alimentação direta os fluxos são paralelos, ou seja, tanto o fluido de processo quanto o vapor de água de alimentação estão dispostos na

mesma direção no processo, isso pode ser observado na Figura 11. O fluxo de líquido sempre se dá no sentido decrescente de pressões, o que para fluidos pouco viscosos dispensa o uso de bombas para o escoamento entre os efeitos (BARBOSA, 2014).

Segundo Foust et al. (1982), há uma desvantagem nesse sistema de alimentação pois o aquecimento da carga é feito todo no primeiro efeito, contribuindo para que a quantidade de vapor gerada pelo vapor de água de aquecimento seja menor provocando uma baixa economia.

O produto concentrado é sujeito a temperaturas mais baixas, pois estas encontram-se nos efeitos de menor pressão. As temperaturas baixas podem ser úteis para minimizar os efeitos indesejáveis como por exemplo, impedir a decomposição de compostos orgânicos, evitar sabor e odor característico de produto queimado (BARBOSA, 2014). A viscosidade elevada que pode existir reduz acentuadamente o coeficiente do último efeito (FOUST et al., 1982).

Figura 11 - Evaporador múltiplo efeito com alimentação direta



Fonte: FOUST et al. (1982).

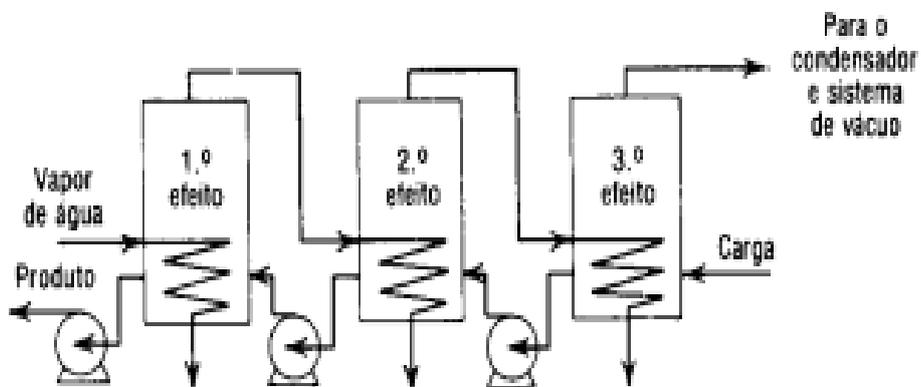
4.5.2. Alimentação reversa

De acordo com Foust et al. (1982) e Barbosa (2014), no sistema de alimentação inversa o fluido de processo percorre um caminho contracorrente ao vapor de água de aquecimento, sentido crescente de pressões, devido a isso é necessário ter bombas entre os efeitos para o escoamento do fluido, podemos observar esse fluxo na Figura 12.

No sistema de alimentação inversa a solução de carga está aquecida na entrada de cada efeito, o que usualmente provoca melhor economia do que com a alimentação em paralelo. Nesse processo a faixa de viscosidade diminui pois o produto concentrado deixa o evaporador no efeito de maior temperatura e por esta razão essa configuração não é recomendada para

produtos alimentícios, pois neste efeito podem ocorrer grandes danos ao alimento, como degradação dos compostos orgânicos (FOUST et al., 1982).

Figura 12 - Evaporador múltiplo efeito com alimentação inversa

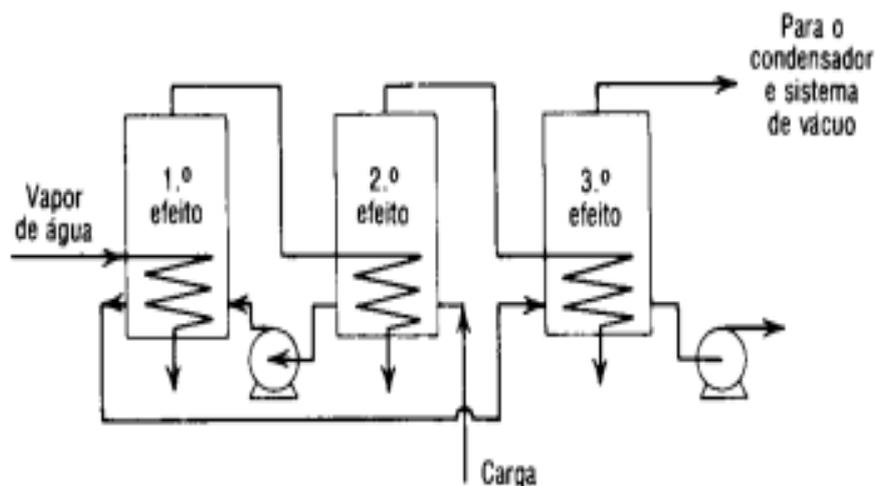


Fonte: FOUST et al. (1982).

4.5.3. Alimentação Mista

Segundo Barbosa (2014), a alimentação mista é um sistema que dispõe de um arranjo atípico em uma planta industrial, um evaporador com alimentação mista não há divisão do fluxo do líquido, além de que em parte do sistema o líquido a ser evaporado pode ser alimentado em contracorrente e concorrente ao fluxo de vapor. Arranjos com alimentação mista só são encontrados em equipamentos com três ou mais efeitos (WESTPHLEN, 1999). Na Figura 13 é possível visualizar um sistema de alimentação mista.

Figura 13 - Evaporador múltiplo efeito com alimentação mista

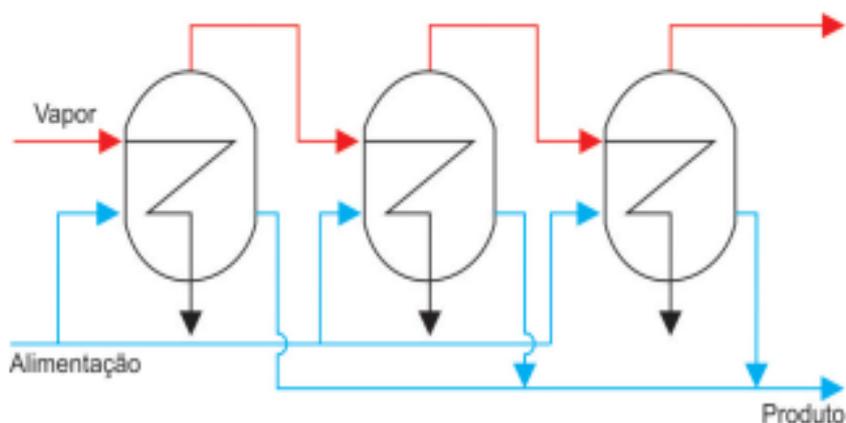


Fonte: FOUST et al. (1982).

4.5.4. Alimentação Paralela

De acordo com Foust et al. (2011) e Barbosa (2014), o sistema de evaporação com alimentação em paralelo a carga virgem evapora em cada efeito até a concentração desejada, ou seja, ocorre uma divisão em cada efeito do fluxo do líquido que se deseja evaporar, e após isso há uma mistura do produto concentrado. Na Figura 14 pode ser observado todo o fluxo de um sistema de alimentação paralela.

Figura 14 - Evaporador múltiplo efeito com alimentação paralela



Fonte: BARBOSA (2014).

4.6. EVAPORADOR DO TIPO ROBERTS

Segundo Peres (2020), o evaporador do tipo Roberts é um dos equipamentos mais encontrados em usinas de fabricação de açúcar e álcool, pois ele é um dos equipamentos de mais fácil instalação e também de operação.

O evaporador do tipo Roberts é constituído por uma calandra, feixe tubular, domo superior, separador de arraste, coleta de vapor e condensado e fundo para recirculação de caldo (PERES, 2020).

Esse tipo de evaporador é bastante utilizado em usinas devido ser de fácil operação, baixo custo de instalação e também uma fácil automação. Ele também apresenta uma taxa constante de evaporação, sua estrutura e arranjo possibilita uma recirculação natural, melhor separação de arraste além de ser mais suscetível às oscilações. Segundo Peres (2020), as desvantagens de um evaporador do tipo Roberts são poucas, ele tem maior tempo de retenção

de caldo comparado a outros, o que pode ser prejudicial para a produção; elevação de temperatura na ebulição o que pode provocar escurecimento do líquido ou até mesmo queima do produto, outro aspecto desvantajoso é a capacidade limitada na troca térmica.

Esse evaporador é vantajoso quando necessita-se de pouco investimento na planta, pois opera de forma manual sem nenhum tipo de automação como também tem maior capacidade em adaptação em relação ao processo, ele suporta e aceita variações no processo, deve-se apenas ficar atento ao tempo de retenção e ao aumento da temperatura para não prejudicar a qualidade do xarope desejado, temperaturas altas aumentam a cor do xarope e tempo de retenção elevado pode ocasionar perda na sacarose.

Deve-se levar em consideração que a circulação do caldo deve ser muito bem projetada, a sua geometria de instalação deve ser adequada de maneira que o caldo passe entre os efeitos sem que haja excesso nos tubos e sem interferência dos operadores. Normalmente se trabalha com 1/3 da altura dos tubos, não podendo ultrapassar este nível, pois certamente a taxa de evaporação diminuirá e a eficiência será baixa podendo ter arraste entre os efeitos e com isso a perda de açúcar será altíssima (PERES, 2020).

4.6.1. Características de um evaporador múltiplo efeito do tipo Roberts

O corpo clássico de múltiplo-efeito é formado por um cilindro vertical, que se eleva sobre a calandra tubular através da qual se efetua o intercâmbio de temperatura. Este cilindro termina na parte superior em um "separador de arrasto", cuja finalidade é separar as gotas líquidas que poderiam ser arrastadas com o vapor vegetal (HUGOT, 1969). Na Figura 15 é apresentado um evaporador do tipo Roberts e seus componentes.

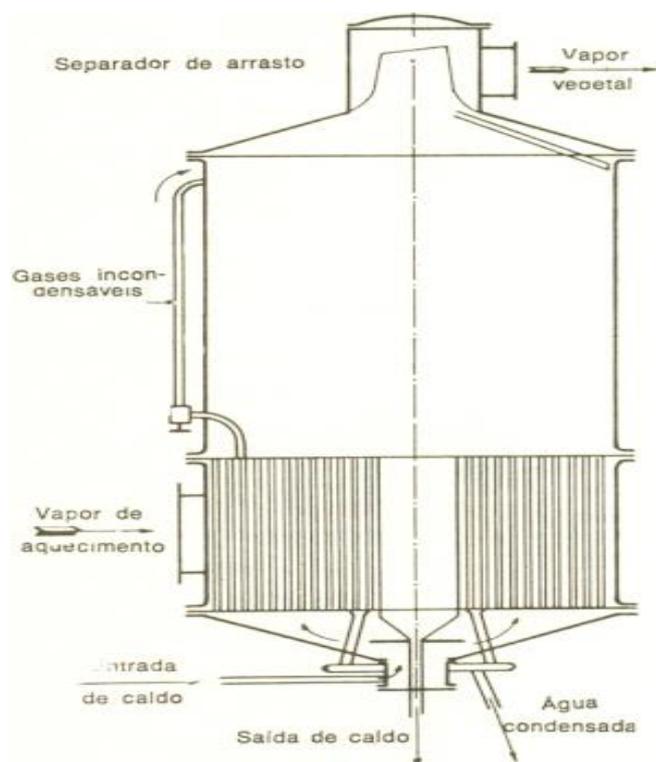
Esses equipamentos começaram a ser construídos em ferro fundido, no entanto a partir de estudos e testes de eficiência e durabilidade um novo material teve maior aceitação para ser utilizado nesses equipamentos, chapas de aço inoxidável, tornando esses equipamentos menos frágeis, mais leves e menos onerosos.

Segundo Hugot (1969), a altura do corpo do evaporador deve ser bastante elevada, para que não haja o arraste de algumas gotículas de caldo projetadas pela ebulição. De acordo com Hugot (1969), a altura do corpo do vaso cilíndrico acima da calandra é ideal que tenha 1,5 a 2 vezes a altura dos tubos, na Europa a altura mínima adotada é 3,5 a 4 metros.

O diâmetro do corpo é importante pois também influi nos arrastos, é necessário prever um corpo mais largo conforme aumenta o volume específico do vapor produzido, ou seja, quando sua pressão é reduzida. Entretanto, hoje os fabricantes não se detêm mais a essa regra, devido a produção de caldo ser em larga escala necessitaria de evaporadores absurdamente

altos e largos, uma alternativa adotada foi a instalação de separadores de arrasto na saída do vapor.

Figura 15 - Evaporador múltiplo efeito do tipo Roberts



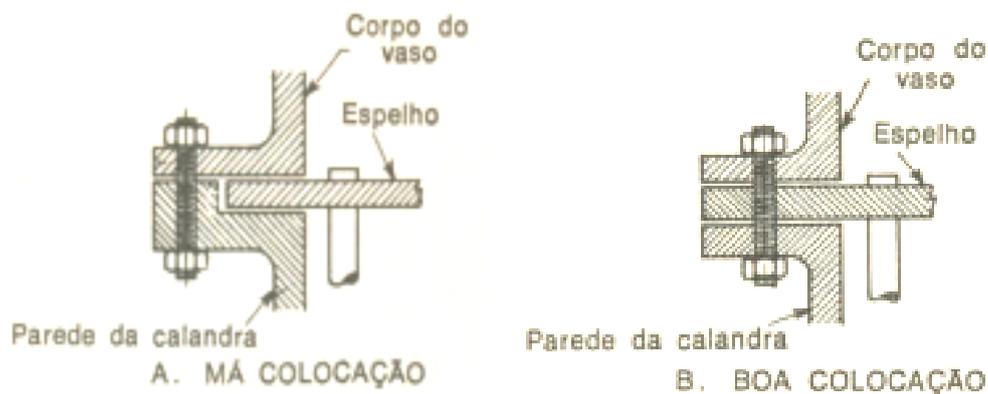
Fonte: HUGOT (1969).

Para que seja possível a observação do funcionamento do equipamento, instalam-se visores em sua lateral, visores circulares de vidros grossos e com uma armação de cobre rosqueada ou parafusadas com juntas flexíveis. Segundo HUGOT (1969), os visores devem ser posicionados em duas linhas opostas ao longo do vaso para permitir a visualização das projeções de caldo dentro do corpo do equipamento, em contraste com o visor e não em um fundo escuro. Recomenda-se instalar, além dos visores dianteiro e traseiro, um visor lateral, posicionado a 45° da linha dianteira, onde uma lâmpada potente com refletor pode ser colocada para iluminar o interior do equipamento sem causar ofuscamento ao observador.

A calandra é o prolongamento do corpo do vaso, onde o vapor de aquecimento é depositado, ela é composta pelos tubos onde ocorrem a troca térmica e fica situada na parte de baixo do vaso. Na Figura 16 é demonstrado os modos de fixação do espelho que divide a calandra e o corpo do evaporador, Hugot (1969) afirma o método B como o ideal devido a facilidade em constatar vazamentos tanto na parte superior como inferior do espelho, quando a calandra ou o corpo do vaso está sob pressão, observa-se o vazamento do caldo ou do vapor.

Às vezes, colocam-se nas calandras chicanas verticais, cuja finalidade é obrigar o vapor a seguir um certo percurso (HUGOT, 1969).

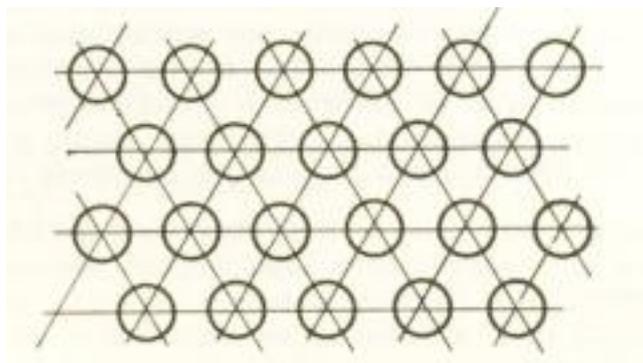
Figura 16 - Junta do corpo do vaso e da calandra



Fonte: HUGOT (1969).

A calandra é composta por diversos tubos na qual passam vapor e caldo, sua parte externa é composta por vapor de aquecimento, enquanto o interior dos tubos o caldo a ser concentrado. De acordo com Hugot (1969), para suportar uma maior quantidade de tubos nos espelhos eles são dispostos em quincôncio e com uma mesma distância entre si, isso pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Disposição dos tubos



Fonte: HUGOT (1969).

Devido haver muitos tubos em uma única calandra é necessário que haja mais de uma entrada de vapor, Hugot (1969) afirma que um corpo com mais de 3 metros de diâmetro é necessário ao menos 2 entradas, há essa preocupação para que haja uma distribuição uniforme de vapor em todos os tubos.

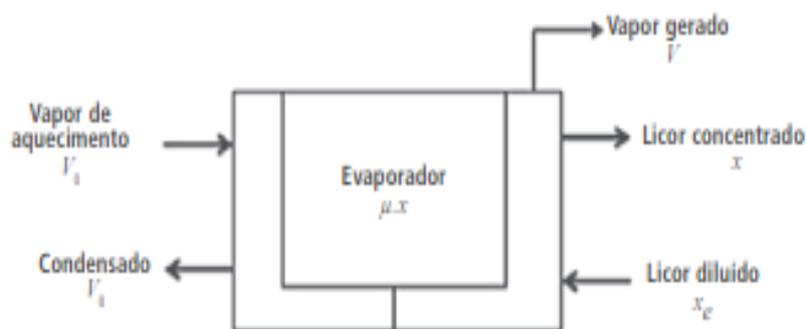
Para que o vapor chegue mais facilmente às partes mais afastadas da calandra, instalam-se entre os tubos, corredores de vapor, os quais são obtidos deixando uma fileira sem tubos

numa parte de seu comprimento. Nos pontos mais afastados da entrada, ou das entradas, colocam-se tubos de saída dos gases incondensáveis (HUGOT, 1969).

4.7. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA EM UM EVAPORADOR DO TIPO ROBERTS

No primeiro efeito as condições operacionais dificultam o processo de troca térmica. Isso porque acima de 50% de sólidos o licor tende a formar incrustações em placas e tubulações. Consta-se ser no primeiro efeito que o licor passa por sua maior variação de concentração, e que também é este o efeito que define a concentração final do licor. Assim, para definir melhores condições de operação é esta a fração do sistema que representa maior interesse de estudo (ARAUJO et al., 2016).

Figura 18 - Esquema do volume de controle



Fonte: ARAUJO et al. (2016)

Segundo Araujo et al. (2016), para a formulação de um modelo matemático baseou-se no balanço de massa e energia do equipamento, além de considerar alguns parâmetros necessários. Considerou-se: o volume do sistema constante; a concentração do licor na saída do evaporador e sua temperatura iguais àquelas no interior do equipamento; para líquidos a capacidade calorífica a volume constante é aproximadamente igual à capacidade calorífica a pressão constante ($C_v \cong C_p$); a retenção de vapor gerado no evaporador é pequena diante da massa de solução retida; retenção de energia nas paredes do equipamento desprezível; perdas de energia para o ambiente pequenas (ARAUJO et al., 2016).

A memória de cálculo a seguir, todo o balanço, está de acordo com Araujo et al. (2016).

A Equação (1) descreve o balanço global de massa para o evaporador e a Equação (2) o balanço de massa para o componente sólido.

$$\frac{d\mu}{dt} = W - L - V \quad (1)$$

Onde μ é a massa retida no evaporador; W a vazão mássica de alimentação do evaporador (kg/h) fornecido pelo produto da densidade do licor de alimentação (ρ_e) pela vazão volumétrica de licor na entrada (F_e); L a vazão mássica de saída do evaporador (kg/h); V a vazão mássica de vapor gerado durante a evaporação (kg/h) e o tempo (h).

$$\frac{d(x \cdot \mu)}{dt} = x_e \cdot W - x \cdot L \quad (2)$$

Sendo que x_e e x são as concentrações do licor na entrada e na saída, respectivamente. Aplicando diferenciação pela regra do produto do lado esquerdo da Equação (2), tem-se a Equação (3).

$$\mu \frac{dx}{dt} + x \frac{d\mu}{dt} = x_e \cdot W - x \cdot L \quad (3)$$

Substituindo a Equação (1) na Equação (3) e reorganizando os termos, obtém-se:

$$\mu \frac{dx}{dt} + x(W - L - V) = x_e \cdot W - x \cdot L \quad (4)$$

Reorganizando:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\mu} (W(x_e - x) + x \cdot V) \quad (5)$$

O balanço de energia para o evaporador é representado na Equação (6)

$$\frac{d(\mu \cdot U(\tau, x))}{dt} = W \cdot h(T_e, x_e) - L \cdot h(\tau, x) - V \cdot H(\tau) + Q \quad (6)$$

onde $U(\tau, x)$ é a energia interna do licor retido no evaporador (J/kg); $h(\tau, x)$ a entalpia da corrente que deixa o evaporador (J/kg); $h(T_e, x_e)$ a entalpia do licor que alimenta o evaporador (J/kg); $H(\tau)$ a entalpia do vapor gerado no processo de evaporação (J/kg); o calor cedido pelo vapor vivo que alimenta o evaporador (J/h); T_e a temperatura do licor que alimenta o evaporador (°C) e τ a temperatura de ebulição do licor (°C). Sabendo que para líquidos a capacidade calorífica a volume constante é aproximadamente igual à capacidade calorífica a pressão constante a Equação (6) pode ser reescrita como:

$$\frac{d(\mu \cdot U(\tau, x))}{dt} = W \cdot h(T_e, x_e) - L \cdot h(\tau, x) - V \cdot H(\tau) + Q \quad (7)$$

Aplicando diferenciação pela regra do produto do lado esquerdo da Equação (7) é possível obter a Equação (8).

$$\mu \frac{d(h(\tau, x))}{dt} + h(\tau, x) \frac{d\mu}{dt} = W \cdot h(T_e, x_e) - L \cdot h(\tau, x) - V \cdot H(\tau) + Q \quad (8)$$

Para pressão constante, tem-se (Equações (9) e (10))

$$\frac{d(h(\tau, x))}{dt} = \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial \tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\partial \tau}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (10)$$

$$\frac{d(h(\tau, x))}{dt} = \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (11)$$

Substituindo a Equação (10) na Equação (9), têm-se as Equações (11) a (14)

$$\frac{d(h(\tau, x))}{dt} = \frac{dx}{dt} \cdot \left(\frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} + \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial x} \right) \quad (12)$$

$$D = \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} + \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial x} \quad (13)$$

Assim:

$$\frac{d(h(\tau, x))}{dt} = \frac{dx}{dt} \cdot D \quad (14)$$

Substituindo a Equação (14) na Equação (8), tem-se a Equação (15).

$$\mu \frac{dx}{dt} \cdot D + h(\tau, x) \frac{d\mu}{dt} = W \cdot h(T_e, x_e) - L \cdot h(\tau, x) - V \cdot H(\tau) + Q \quad (15)$$

Substituindo a Equação (1) e Equação (5) na Equação (15), têm-se as Equações (16) a (19).

$$(W(x_e - x) + x \cdot V) \cdot D + h(\tau, x) \cdot (W - L - V) = W \cdot h(T_e, x_e) - L \cdot h(\tau, x) - V \cdot H(\tau) + Q \quad (16)$$

$$(x_e - x) \cdot W \cdot D + x \cdot V \cdot D + h(\tau, x) \cdot (W - L - V) = W \cdot h(T_e, x_e) - L \cdot h(\tau, x) - V \cdot H(\tau) + Q \quad (17)$$

$$[x \cdot D - h(\tau, x) + H(\tau)] \cdot V = W \cdot [h(T_e, x_e) - (x_e - x) - h(\tau, x)] + Q \quad (18)$$

Temos a equação de Vapor que deixa o evaporador:

$$V = \frac{W \cdot [h(T_e, x_e) - D(x_e - x) - h(\tau, x)] + Q}{x \cdot D - h(\tau, x) + H(\tau)} \quad (19)$$

Para encontrar a corrente de licor que deixa o evaporador (L) parte-se da definição de volume dada pela Equação (20), onde $\rho(\tau, x)$ é a densidade do licor (kg/m^3). Assim, considerando o volume constante, é possível escrever a Equação (21).

$$\frac{\mu}{\rho(\tau, x)} = \text{Volume} \quad (20)$$

$$\rho(\tau, x) \cdot \frac{d\mu}{dt} - \mu \frac{d\rho(\tau, x)}{dt} = 0 \quad (21)$$

Substituindo a Equação (1) na Equação (21) e aplicando derivadas parciais, obtém-se a Equação (22).

$$\rho(\tau, x) \cdot (W - L - V) - \mu \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} \right) = 0 \quad (22)$$

Substituindo a Equação (10) na Equação (22), têm-se as Equações (23) e (24).

$$\rho(\tau, x) \cdot (W - L - V) - \mu \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \right) = 0 \quad (23)$$

$$\rho(\tau, x) \cdot (W - L - V) - \mu \cdot \frac{dx}{dt} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \right) = 0 \quad (24)$$

Substituindo a Equação (5) na Equação (24), tem-se a Equação (25).

$$\rho(\tau, x) \cdot (W - L - V) - (W(x_e - x) + x \cdot V) \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \right) = 0 \quad (25)$$

Reorganizando a Equação (25) em função de L, tem-se a Equação (26)

$$L = \frac{-(W(x_e - x) + x \cdot V) \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \right) + \rho(\tau, x) \cdot (W - V)}{\rho(\tau, x)} \quad (26)$$

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas pesquisas das revisões bibliográficas, é evidente que a evaporação desempenha um papel crucial em diversas indústrias, sendo elas: indústrias de alimentos e bebidas, indústrias química, farmacêuticas, papel e celulose, tratamento de água e efluentes e petróleo e gás, facilitando a concentração de soluções líquidas por meio da remoção controlada do solvente. Os evaporadores são equipamentos essenciais para esse processo, oferecendo eficiência e economia nos procedimentos de evaporação. A diversidade de tipos de evaporadores, como os de múltiplo efeito, de placas e de tubos, destaca a versatilidade dessa tecnologia e sua capacidade de atender às diferentes necessidades industriais. Essa variedade permite às indústrias selecionar o tipo de evaporador mais adequado às suas necessidades específicas, contribuindo para a otimização dos processos e a conservação de recursos.

O amplo uso dos evaporadores de múltiplo efeito ressalta sua superior eficiência energética, enquanto os evaporadores de placas se destacam no manuseio de fluidos sensíveis ao calor, e os evaporadores de tubos são ideais para aplicações de alta viscosidade. Os evaporadores de múltiplos efeitos do tipo Roberts são utilizados em usinas de cana de açúcar para a concentração/extração da sacarose devido suas propriedades de operação e controle, evidenciando a economia energética no processo como também a facilidade de operação e eficiência térmica na evaporação de caldo.

Além disso, compreender o processo de evaporação e os tipos de evaporadores é crucial para fins acadêmicos e práticos. Isso permite que pesquisadores e profissionais da indústria tomem decisões informadas sobre a seleção de equipamentos, estratégias operacionais e otimização de processos. Ao aprofundarmos nosso conhecimento nessas áreas, podemos aprimorar os processos de produção, melhorar a qualidade dos produtos e minimizar o consumo de energia, resultando em ganhos gerais de eficiência e práticas industriais sustentáveis.

Assim, pode-se concluir que o presente trabalho de conclusão de curso (TCC) apresenta uma contribuição para os alunos que cursam a graduação em Engenharia Química e também contribuiu com o maior aprendizado desta operação unitária para minha formação como Engenheiro Químico.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. N. et al. **Modelagem Fenomenológica do Comportamento Dinâmico de Evaporadores de Múltiplo Efeito**. O PAPEL, vol. 77, num. 6, p. 77 – 81, Jun 2016.
- BARBOSA, S. D. **Modelagem e Simulação de Evaporadores na Indústria de Alimentos**. Monografia — Universidade Federal de Rondônia, Ariquemes - RO, 2014.
- Crivellaro, F. P. P. et al. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica 20(2)**, 61-70, 2016.
- ELY, D. et al. **Evaporação**. UFRGS, 2001-2003. Disponível em: https://www.ufrgs.br/alimentus1/feira/opconser/opc_evapor.htm. Acesso em: 10 mar 2024.
- EVAPORACIÓN: Evaporador de película descendente**. INDUSTRIAL. Disponível em: <https://industrialevaporacion.blogspot.com/>. Acesso em: 18 Abril. 2024
- FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos - Princípios e Prática**. 2 ed. São Paulo: Artmed, 2006
- FOUST, A. S. et al. **Princípios das Operações Unitárias**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. 2 ed. São Paulo: Mestre Jou, 1969.
- LIMA, R. A. **Eficiência Energética de Evaporadores de Múltiplos Efeitos**. Monografia — Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Maceió – A, 2020.
- PEREIRA, F. M. **Evaporadores - Operações Unitárias II**. (s.d.). Disponível em: Evaporadores Evaporadores OPERAÇÕES UNITÁRIAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS II II | Santos Cesar - Academia.edu. Acesso: 10 mar 2024.
- PERES, A. **Sistema de Evaporação de Caldo – Tipos de Evaporadores – Usinas Sucroalcooleiras**. 2020. Disponível em: Sistema de Evaporação de Caldo – Tipos de Evaporadores - Usinas Sucroalcooleiras. | LinkedIn. Acesso: 11 mar 2024.
- POLOVNIKOV, V. Y., GUBINA, E. V. “**Heat Loss of Heat Pipelines in Insulation Moisture Conditions With the Evaporation**”, National Research Tomsk Polytechnic University, p.1-6 (2014)
- ROGERIO, H. A. et al. **Aplicações Industriais de Evaporadores de Múltiplo Efeito**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiania, v. 9, n. 16, p. 2815 – 2834, 2013.
- Ronkin, V. M. “**Improvement in Operating Efficiency of Falling Film Evaporators**”, Chemical and Petroleum Engineering, 48 (9), 540-545, 2013.
- SANTOS, L. J. C. **Avaliação do Ciclo de Vida e Custeio do Ciclo de Vida de Evaporadores Para Usina de Açúcar**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2007.
- SILVA, P. R. S. **Simulação Dinâmica e Otimização de Evaporadores de Múltiplos Efeitos em Biorrefinarias**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Rio de Janeiro, 2013.
- TIPOS de Revisão de Literatura**. UNESP, 2015. Disponível em: <https://www.fca.unesp.br/Home/Biblioteca/tipos-de-evisao-de-literatura.pdf>. Acesso: 02 abril de 24.

USED-Alfa-Laval Centri-Therm Centrifugal Evaporator, Model CT-6. AARON EQUIPMENT COMPANY. Disponível em: <https://www.aaronequipment.com/usedequipment/evaporators/wipe-film-thin-film/alfa-laval-ct-6-47676001>. Acesso em: 18 Abril. 2024

WESTPHLEN, D. L. **Modelagem, Simulação e Otimização de Sistemas de Evaporação.** Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 1999.