



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



EDUARDA FIRMINO BARBOSA

**ESTUDO DO USO DAS TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL (CFD) APLICADAS A EVAPORADORES DO TIPO
*FALLING FILM***

UBERLÂNDIA

2023

EDUARDA FIRMINO BARBOSA

**ESTUDO DO USO DAS TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL (CFD) APLICADAS A EVAPORADORES DO TIPO
*FALLING FILM***

Projeto de Monografia de graduação apresentada a Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de curso, do curso de Engenharia Química.

Professor: Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DE MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE EDUARDA FIRMINO BARBOSA
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 27/11/2023.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva
Orientador - FEQUI/UFU

Prof. Dr. Larissa Nayhara Soares
Santana Falleiros
PPGEQ/UFU

Doutorando Paulo Sérgio de
Andrade
PPGEQ/UFU

Resumo

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma ferramenta de simulação numérica que busca avaliar e prever o comportamento de um fluido dentro de um volume. Para esta finalidade, são utilizados modelos matemáticos, baseados nas equações do contínuo, que governam os fenômenos de transferência de massa, calor e quantidade de movimento. Dessa forma, as técnicas de CFD apresentam-se como um instrumento extremamente versátil na solução de problemas dentro da engenharia, visto que permitem uma análise profunda do sistema em estudo, sem que haja necessidade de intervenção direta no processo, evitando erros e riscos que possam ocasionar perdas produtivas e operacionais. Ademais, é possível reduzir, de forma significativa, o tempo para a realização de um projeto, o que otimiza a produção e reduz gastos e custos. Tendo isso em vista, este trabalho objetiva realizar uma revisão bibliográfica sobre a técnica de fluidodinâmica computacional e suas aplicações, especificamente, em operações de evaporação que ocorrem em evaporadores industriais do tipo filme descendente (*falling film*).

Palavras-chave: simulação; evaporação; fluxo descendente; transferência de calor, energia e massa.

Abstract

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a numerical simulation tool that seeks to evaluate and predict the behavior of a fluid within a volume. For this purpose, mathematical models are used, based on the continuum equations, which govern the phenomena of mass, heat and momentum transfer. Therefore, CFD presents itself as an extremely versatile instrument in the solution of problems within engineering, since it allows a deep analysis of the system under study, without the need for direct intervention in the process, avoiding errors and risks that can cause productive and operational losses. In addition, CFD is able to significantly reduce the time to carry out a project, which optimizes production and reduces expenses and costs. Thus, this work aims to carry a literature review out on the computational fluid dynamics technique and its applications, specifically, in evaporation operations. With this in mind, this work aims to carry out a literature review on the computational fluid dynamics technique and its applications, specifically in evaporation operations that take place in industrial falling film evaporators.

Keywords: *simulation; evaporation; descendent flux, heat, energy mass transfer.*

Lista de Figuras

Figura 1 – Processo de evaporação em múltiplos estágios.....	16
Figura 2 – Elementos de um evaporador	17
Figura 3 – Evaporador <i>falling film</i>	19
Figura 4 - Malha de uma análise de CFD.....	21
Figura 5 - Gráfico X-Y da velocidade horizontal ao longo do comprimento L no caminho entre dois cilindros.....	23
Figura 6 – Gráfico dos vetores de velocidade entre dois cilindros.....	23
Figura 7 - Contornos de linha para a distribuição do coeficiente de pressão de um fluido escoando entre dois cilindros.....	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS.....	10
2.1	OBJETIVO GERAL.....	10
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3	METODOLOGIA.....	11
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4.1	FUNDAMENTOS DA EVAPORAÇÃO	12
4.2	EVAPORADORES INDUSTRIAIS	13
4.2.1	CONCEITOS E PREMISSAS	13
4.2.2	EVAPORADORES DE SIMPLES E MÚLTIPLO EFEITO	14
4.2.3	COMPONENTES BÁSICOS DE UM EVAPORADOR	16
4.3	EVAPORADORES DO TIPO <i>FALLING FILM</i>	18
4.4	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	19
4.4.1	PRINCÍPIOS DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	19
4.4.2	PRÉ-PROCESSAMENTO	20
4.4.3	RESOLUÇÃO	22
4.4.4	PÓS PROCESSAMENTO	22
5	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA A EVAPORADORES DO TIPO <i>FALLING FILM</i>	25
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	29
	REFERÊNCIAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

A evaporação é comumente descrita como o processo térmico de remoção de um solvente de uma solução, gerando, por consequência, um produto mais espesso ou mais concentrado. Assim, a evaporação é uma operação unitária básica que abrange os fenômenos de transferência de massa, calor e quantidade de movimento, sendo amplamente empregada em diversas manufaturas, dentre as quais é possível citar as indústrias químicas, de alimentos, de papel e celulose, dessalinização e têxtil (Cyklis, 2017; Dai *et al.*, 2022; Minton, 1986). Neste contexto, uma das principais vantagens do uso da evaporação é a garantia da diminuição do peso e do volume do produto final, o que acarreta a redução de gastos com transporte e manuseio, além de diminuir a deterioração biológica e aumentar sua vida útil (Jaskulski; Wawrzyniak; Zbiciński, 2018; Kudra, 2004; Mujumdar, 2015; Rogério; Costa; Junior, 2013).

De maneira semelhante, a evaporação de filme descendente ou *falling film*, é uma técnica largamente utilizada para a obtenção de um material mais concentrado a partir de uma solução diluída. Durante a evaporação do solvente, a concentração da solução é elevada e as propriedades, como a densidade e a viscosidade, aumentam com o teor de sólidos até a solução ficar saturada. Frequentemente, o líquido em vaporização encontra-se sob vácuo moderado para reduzir a sua temperatura de ebulição, o que amplia a diferença de temperatura entre o vapor de condensação e o líquido em ebulição, aumentando assim a taxa de transferência de calor no evaporador (Padilla; Beltrán; Correa-Mahecha, 2020). Tendo isso em vista, as principais vantagens do uso desse equipamento consistem na operação de forma contínua e em uma larga amplitude de temperaturas, bem como elevadas taxas de evaporação, uma vez que a disposição dos dutos do equipamento aumenta a superfície de contato e a inserção do vácuo fazem com que os processos de transferência de calor e de massa sejam facilitados (Langrish; Fletcher, 2001; Poozesh *et al.*, 2021).

Os desdobramentos da evaporação abrangem inúmeros aspectos da mecânica dos fluidos, transferência de calor e massa, bem como tecnologia de partículas e ciência

dos materiais. Tais fatores são cruciais para o progresso na automação e na otimização da evaporação por *falling film*. Entretanto, representam também o principal impedimento para que os desenvolvimentos citados anteriormente possam acontecer, visto que, para modelos tradicionais, a descrição do processo de evaporação envolve balanços materiais e de energia entre as fases vapor/líquido no estado de equilíbrio. Tal mecanismo de análise possui algumas limitações, como os elevados custo e tempo gastos na realização do projeto. Além disso, podem ser adotadas generalizações e simplificações que aumentam o erro associado aos modelos usados para descrever o comportamento do fluido (Poozesh *et al.*, 2021).

Dessa maneira, a fluidodinâmica computacional, do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD), apresenta-se como uma ferramenta promissora na realização de estudos que envolvam a simulação de processos reais através de recursos computacionais e matemáticos. Nos últimos anos, o número de publicações sobre CFD cresceu exponencialmente, devido ao aumento dos recursos computacionais disponíveis (Golshan *et al.*, 2020). Assim, esta técnica tem potencial de aplicação em inúmeros processos industriais, especialmente na simulação de escoamentos fluido-vapor na engenharia química e de processos (Zawawi *et al.*, 2018).

À vista disso, as técnicas de CFD são capazes de fornecer uma aproximação numérica das equações que governam a fluidodinâmica. Desse modo, combinam-se modelos cinéticos, termo e fluidodinâmicos com uma representação detalhada da geometria do evaporador permitindo compreender os diversos fenômenos que ocorrem no equipamento e gerar resultados que levem a um melhor dimensionamento, controle e manutenção do aparato industrial. Posto isso, a aplicação das ferramentas de CFD, em mecanismos de fluxo de fluidos, permite que sejam realizados estudos paramétricos de modelos matemáticos, de modo a possibilitar uma mudança rápida e flexível dos parâmetros de projeto, reduzindo o tempo e o custo associados a alterações e modificações do projeto preliminar (Poozesh *et al.*, 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho é, através de uma revisão de literatura, realizar o estudo da operação unitária de evaporação em evaporadores do tipo *falling film* e entender como as técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) podem auxiliar na compreensão e no dimensionamento destes equipamentos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos deste trabalho, destacam-se:

- definir conceitos básicos da evaporação;
- descrever o processo de evaporação dentro de um evaporador;
- descrever o funcionamento de um evaporador do tipo *falling film*;
- definir o conceito CFD e explicitar seu potencial como ferramenta de análise em seus inúmeros campos de aplicação;
- realizar uma revisão bibliográfica sobre a fluidodinâmica computacional e suas aplicações mais recentes em evaporadores do tipo *falling film*.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho é do tipo revisão bibliográfica e teve como base a análise de trabalhos com temáticas equivalentes, de modo a pesquisar, condensar e recapitular conhecimentos sobre o tema. Os seguintes parâmetros foram utilizados para realizar a revisão bibliográfica com o tema em estudo:

- pesquisaram-se artigos, dissertações e teses via *Google Scholar*;
- realizou-se uma leitura de diversos tópicos relacionados ao tema deste trabalho, a fim de agregar as informações principais a respeito do assunto;
- definiram-se as palavras-chaves “*falling film; evaporators; CFD; computational fluid dynamics; simulation; heat, mass and energy transfer*” que demarcam os principais conteúdos relativos ao tema;
- separou-se cerca de quarenta trabalhos para a realização da revisão bibliográfica.
- filtraram-se estudos entre os anos de 1990 a 2020 para a revisão sobre evaporação e evaporadores *falling film*. Já para os tópicos relacionados à CFD e suas aplicações, consideraram-se estudos entre 2017 e 2023;
- identificaram-se os itens e subitens relevantes para incluir nos tópicos do trabalho;
- elaborou-se o trabalho de conclusão de curso de revisão bibliográfica, com base nas leituras realizadas nas etapas anteriores.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 FUNDAMENTOS DA EVAPORAÇÃO

Por definição, a evaporação é a mudança de uma substância do estado líquido para o estado de vapor. Essa transformação ocorre por meio da transferência de calor e massa. Uma vez que essa transição provém de fundamentos básicos da física, é possível encontrar a aplicação da evaporação e, por consequência, o uso de evaporadores em diversos setores das indústrias químicas, alimentícias, de dessalinização, farmacêuticas e de papel e celulose. Alguns exemplos dessas aplicações são: concentração de suco de frutas, produções de açúcar, café solúvel e leite em pó e dessalinização da água do mar (Hui, 2006; Rogério; Costa; Junior, 2013).

A taxa de evaporação, por sua vez, deriva da quantidade de vapor gerado em um determinado período. Assim, existem alguns fatores básicos que afetam a taxa de evaporação e estão diretamente relacionados às características do fluido a ser evaporado. Algumas dessas propriedades são o calor específico, o ponto de ebulição, entalpia de vaporização e pressão de vapor (Zhao *et al.*, 2022b). Além disso, ainda se destacam os itens listados na sequência, conforme McCabe; Smith; Harriott (1993)

- **Concentração:** à medida que a concentração aumenta, a viscosidade e a densidade da solução também aumentam, o que pode prejudicar a troca de calor. Além disso, a ebulição contínua pode gerar uma solução saturada, promovendo a formação de cristais que devem ser removidos, caso contrário causarão incrustações nos tubos;
- **Espuma:** alguns materiais formam espuma durante a vaporização. A espuma acompanha o vapor que sai do evaporador, provocando arraste do material e, em casos extremos, toda a massa de líquido pode transbordar;
- **Sensibilidade à temperatura:** muitos produtos químicos, principalmente os orgânicos, se decompõem quando sua temperatura é elevada. Dessa forma, para concentração de materiais sensíveis ao calor, técnicas especiais são utilizadas para que ocorra uma redução, tanto da temperatura do líquido, quanto do tempo de aquecimento.

Além das características da solução a ser concentrada, as propriedades do material de construção do evaporador também influenciam no desempenho da taxa de evaporação. Em grande parte dos casos, os evaporadores são constituídos por algum tipo de aço. Contudo, existem algumas soluções que degradam materiais ferrosos ou são contaminadas por eles. Nestes casos, materiais especiais como cobre, aço inoxidável, níquel e alumínio devem ser utilizados (Gourdon; Mura, 2017; Urbaniec, 2004).

4.2 EVAPORADORES INDUSTRIAIS

4.2.1 CONCEITOS E PREMISAS

Os evaporadores industriais possuem como principal objetivo a concentração de uma solução que contenha o produto desejado ou a recuperação de um solvente. Em muitos casos, é possível realizar ambas as operações. Dessa forma, visando atingir estes escopos, o projeto de um evaporador tem como base três elementos principais: transferência de calor, separação líquido-vapor e a utilização eficiente da energia disponível (Minton, 1986).

Usualmente, a água é o solvente mais presente nos processos de evaporação. O calor disponível, por sua vez, é fornecido pelo vapor de condensação e é transferido de maneira indireta através de superfícies metálicas. Tendo isso em vista, existem algumas premissas que um evaporador deve ser capaz de cumprir de modo a ser considerado eficiente (McCabe; Smith; Harriott, 1993).

O primeiro destes requisitos é a transferência de grandes quantidades de calor para a solução, utilizando a menor quantidade possível de superfície metálica, visto que este é o fator determinante na escolha do tipo, do tamanho e do custo de todo o processo de evaporação. Um outro fator essencial na avaliação da eficiência de um evaporador é a capacidade de separar as fases líquido e vapor do sistema, uma vez que essa separação é parte fundamental da recuperação de um produto que, de outra forma, perder-se-ia, bem como também é responsável por garantir a concentração de um produto de maior valor agregado (Périn-Levasseur; Palese; Maréchal, 2008).

Além disso, é necessário que o evaporador seja capaz de utilizar da melhor forma possível toda a energia disponível durante a evaporação, posto que o desempenho do equipamento é habitualmente avaliado com base na economia de vapor, isto é, a quantidade, em quilos, de solvente evaporado por quilo de vapor utilizado. À vista disso, algumas soluções que envolvem a melhoria da eficiência energética de um evaporador são: a reutilização do solvente vaporizado como meio de aquecimento e a troca de calor entre a alimentação e o condensado que sai do sistema (Minton, 1986)

Existem ainda condições impostas, pelo líquido a ser evaporado e/ou a solução a ser concentrada, que devem ser consideradas. Tais fatores foram discutidos na seção “4.1- Fundamentos da Evaporação” deste trabalho. Em suma, deve-se sempre ter em vista a qualidade, as propriedades físico-químicas, a tendência para formação de incrustação, espumas e a degradação das substâncias envolvidas na evaporação. Assim como, é preciso avaliar a necessidade de propriedades especiais de construção e de projeto do evaporador (Glover, 2004).

No que diz respeito à seleção ideal de evaporadores em aplicações industriais, não existe uma regra definida para a determinação do tipo de evaporador a ser utilizado. É comum que diferentes tipos do equipamento sejam utilizados para um mesmo propósito ou serviço. Dessa forma, a escolha final frequentemente pode resultar de experiências passadas ou histórico de utilização do modelo específico para determinada área de atuação (Glover, 2004).

4.2.2 EVAPORADORES DE SIMPLES E MÚLTIPLO EFEITO

O processo de evaporação pode ser conduzido por meio de um sistema composto por um único efeito ou múltiplos. Por definição, um efeito refere-se a um ou mais corpos em ebulição que se encontram submetidos a uma mesma pressão. De modo geral, um efeito simples é o termo utilizado para designar um módulo básico de um sistema de evaporação. (Shah; Bhagchandani, 2012).

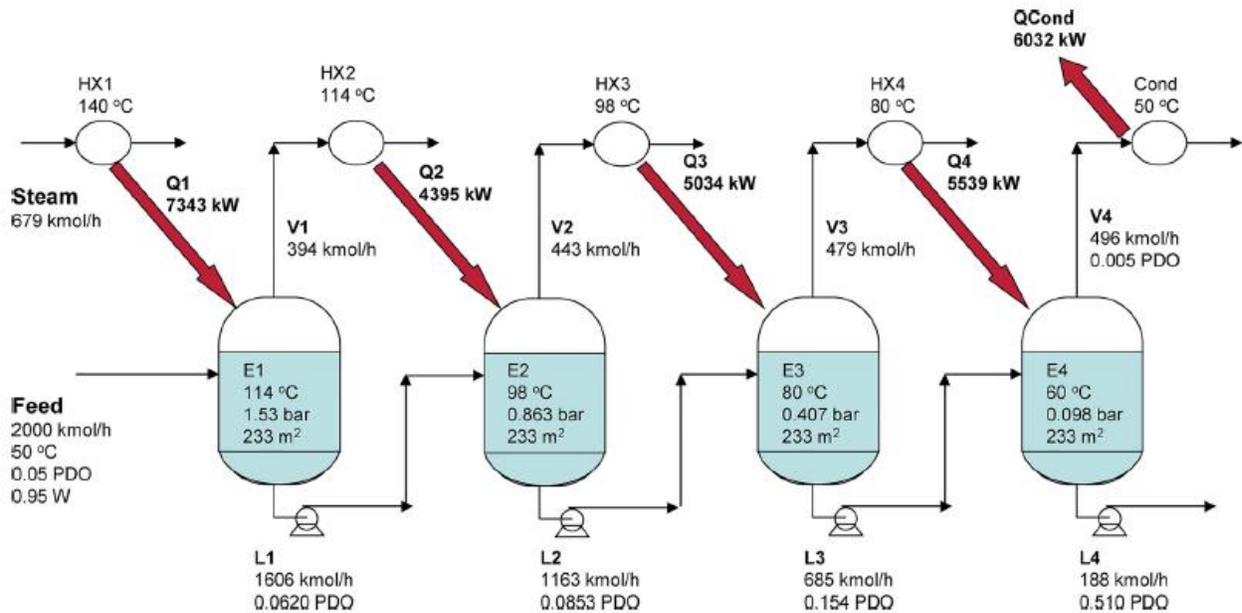
A utilização de sistemas de evaporação com um único efeito é recorrente em casos, nos quais existe um fornecimento barato de vapor. Ainda, esse tipo de configuração é utilizada em processos que demandam materiais de construção do evaporador com

valores mais dispendiosos, seja devido à matéria-prima utilizada ser corrosiva ou quando o vapor gerado está tão contaminado que não é possível reutilizá-lo. As unidades de efeito único possuem a flexibilidade de serem trabalhadas de modo contínuo, descontínuo ou semibatelada. Ademais, sabe-se que, para evaporadores de efeito simples, um quilograma de vapor pode vaporizar até um quilograma de água (Shah; Bhagchandani, 2012).

Em contrapartida, um evaporador de múltiplos efeitos é um sistema de evaporação em que o vapor de um efeito é utilizado como meio de aquecimento para um efeito subsequente que se encontra a uma pressão mais baixa. O vapor gerado no último efeito vai para um condensador e pode ser reaproveitado para aquecer o fluido de alimentação da evaporação ou em alguma outra parte do processo industrial que envolva troca de calor (de Lima, 2020; Minton, 1986; Ortolá Ortolá; Fito Suñer; Castro Giráldez, 2018).

A configuração de múltiplos efeitos é mais comumente encontrada nos processos industriais. Isso ocorre, pois essa disposição reduz significativamente a quantidade de energia consumida. Posto que, idealmente, um quilograma de vapor é capaz de vaporizar cinco quilogramas de água em um múltiplo efeito de cinco estágios, fazendo com que o sistema seja mais energeticamente eficiente.(Luyben, 2018). Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma de um processo de evaporação de múltiplos efeitos.

Figura 1 – Processo de evaporação em múltiplos estágios. Fonte: (Luyben, 2018)



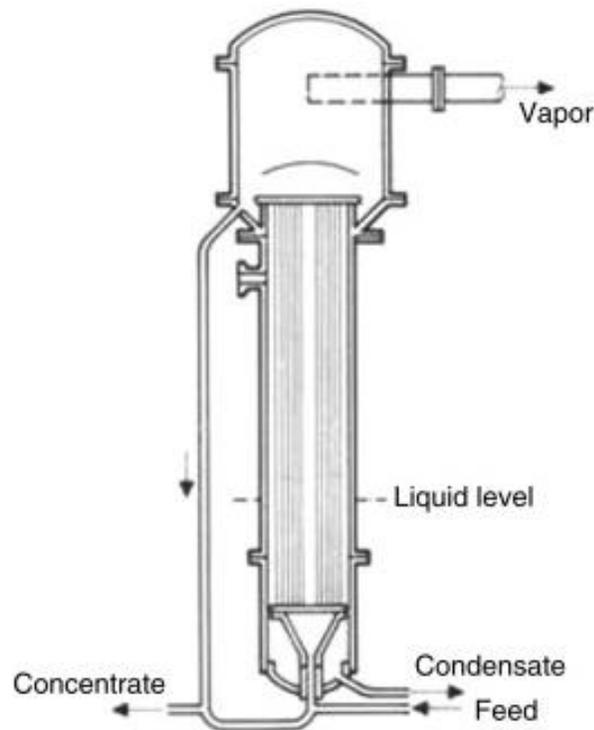
4.2.3 COMPONENTES BÁSICOS DE UM EVAPORADOR

Na indústria, existem inúmeros tipos de evaporadores. Dentre eles, é possível destacar os evaporadores do tipo descontínuo, de circulação natural, de película ascendente e descendente e de película fina agitada. De maneira geral, para se projetar os equipamentos responsáveis pela evaporação industrial, são elaborados balanços de massa e energia para processos de simples efeito ou múltiplo. É válido lembrar também que economia de vapor fornece uma indicação da eficiência do processo, sendo que sistemas de reutilização de vapor e recuperação térmica são úteis para minimizar o consumo de energia (Singh; Heldman, 2014).

Tendo isso em vista, um evaporador comum é constituído por tubos, aletas e um coletor. O coletor é um tubo maior ligado a todos os circuitos de um evaporador para fornecer a quantidade necessária do fluido a ser concentrado para cada circuito. Dessa forma, o produto circula no interior dos tubos com aletas, enquanto o fluido de condensação circula no exterior sobre as superfícies dos tubos e das aletas (Moerman; Fikiin, 2016).

A principal função das aletas é aumentar a superfície total de troca térmica dos evaporadores. Geralmente, os recipientes onde ocorrem a transferência de calor são compostos por uma vasta quantidade de tubos, cujas seções transversais normalmente possuem geometria arredondadas ou ovais, que atravessam as aletas planas e retangulares em uma disposição em linha ou escalonada. Na Figura 2 apresenta-se um sistema elementar dos componentes de um evaporador (Moerman; Fikiin, 2016)

Figura 2 - Elementos de um evaporador, adaptado de Berk (2016)



Majoritariamente, a energia necessária para que o material, que flui dentro dos tubos seja evaporado, provém da condensação do vapor. Assim, em um múltiplo efeito, a queda de pressão que ocorre entre um efeito e o seguinte, reduz a temperatura de ebulição do líquido, aumentando a diferença de temperatura entre o vapor e o líquido. Por consequência, a taxa de transferência de calor no evaporador aumenta (Moerman; Fikiin, 2016).

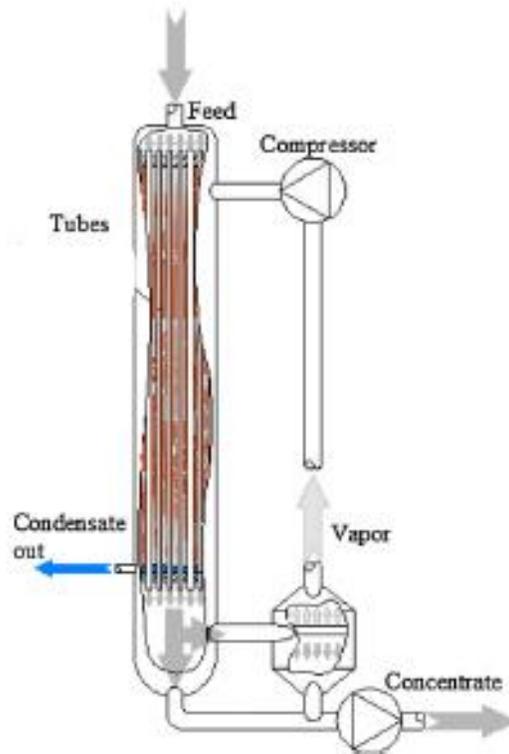
4.3 EVAPORADORES DO TIPO *FALLING FILM*

Os evaporadores de película descendente, *falling film* ou evaporadores de *spray*, são amplamente utilizados nas indústrias petroquímicas, em processos de dessalinização, bem como em sistemas de conversão de energia termal oceânica. Além disso, esse equipamento é largamente utilizado na concentração de substâncias cujas propriedades são afetadas pelo tempo de transferência de calor, como é o caso da indústria de laticínios e demais empresas do ramo alimentício nas quais o produto utilizado, se aquecido durante períodos muito longos, cria uma camada que adere às paredes do evaporador formando incrustações e provocando a perda de uma grande quantidade de sólidos dissolvidos. Nesse sentido, evaporadores de película descendente são amplamente utilizados para concentrar produtos sensíveis ao calor, uma vez que o tempo de residência é menor do que em outros tipos de evaporadores. Idealmente, os evaporadores *falling film* também são adequados para o manuseamento de fluidos viscosos. (Fernández-Seara; Pardiñas, 2014; Padilla; Beltrán; Correa-Mahecha, 2020).

Em contrapartida, um dos principais problemas associado à esse equipamento é a necessidade de se distribuir o líquido de forma uniforme por toda a extensão dos tubos. Assim, frequentemente, é necessário o uso de bombeamentos e um sistema de recirculação para garantir que a evaporação ocorra de forma efetiva e eficiente dentro do evaporador (Shah; BHAGCHANDANI, 2012).

A Figura 3 esquematiza o modo básico de configuração de um evaporador de película descendente com recirculação. No que diz respeito ao funcionamento, em evaporadores *falling film*, inicialmente, líquido é alimentado no topo dos tubos e deixa-se cair pelas paredes como uma película, por meio da ação da gravidade. Simultaneamente, ocorre a injeção de vapor no evaporador, em direção contrária ao sentido do fluxo do líquido. Então, no fundo do evaporador, o concentrado é recolhido e o vapor produzido é separado e condensado. Posteriormente, por fim, o calor fornecido pelo condensador flui para o exterior dos tubos e o condensado formado também é direcionado para baixo. (Gourdon; Mura, 2017; Shah; BHAGCHANDANI, 2012)

Figura 3 – Evaporador *falling film*, adaptado de Gourdon; Mura (2017)



4.4 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

4.4.1 PRINCÍPIOS DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A fluidodinâmica computacional deriva de diferentes disciplinas da mecânica dos fluidos, transferência de calor, ciência da computação e matemática. Dessa forma, a CFD surge intrinsecamente ligado às áreas de alta tecnologia dentro de campos como aeronáutica, astronomia e engenharias. Atualmente, essa ferramenta é capaz de trazer soluções dentro das mais variadas áreas de estudo da ciência com aplicações dentro da biologia, matemática, geofísica, dentre inúmeras outras (Wang *et al.*, 2020).

A mecânica dos fluidos é essencialmente o estudo dos fluidos em movimento ou em repouso. As técnicas de CFD dedicam-se particularmente à primeira alternativa, fluidos em estado dinâmico, e ao modo como o comportamento do fluxo influencia em processos de transferência de calor, massa e até mesmo em reações químicas. Além

disso, as características físicas do movimento de um fluido podem ser descritas por meio de equações matemáticas fundamentais sob a forma de equações diferenciais parciais, cujas resoluções são realizadas através de linguagens de programação e do poder computacional dessas ferramentas (Wen *et al.*, 2019). Portanto, a CFD representa a oportunidade do estudo de termos específicos das equações governantes, bem como possui uma série de vantagens quando comparado às técnicas de estudo tradicionais. Conforme pode ser visto na sequência conforme Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun (2023):

- A CFD complementa abordagens experimentais e analíticas, fornecendo uma alternativa e uma maneira mais econômica de simular o escoamento de fluidos reais. Além disso, é capaz de resolver diversos problemas complexos, nos quais a abordagem analítica não é suficiente ou demanda um tempo e esforço operacional muito altos. É válido ressaltar que esta vantagem só pode ser viabilizada através da crescente capacidade de desempenho dos *hardwares* computacionais e da diminuição dos seus custos;
- As técnicas de CFD são capazes de simular condições de escoamento não reproduzíveis em testes de laboratório, tais como acidentes nucleares ou cenários demasiadamente grandes como comportamento de furacões terremotos.

A CFD pode ser utilizado para compreender melhor os acontecimentos ou processos físicos que ocorrem no escoamento de fluidos à volta e dentro dos objetos designados. Assim, o desenvolvimento de uma análise utilizando as técnicas de fluidodinâmica computacional passa, de forma geral, por três etapas: pré-processamento, resolução e pós processamento (Wang *et al.*, 2020).

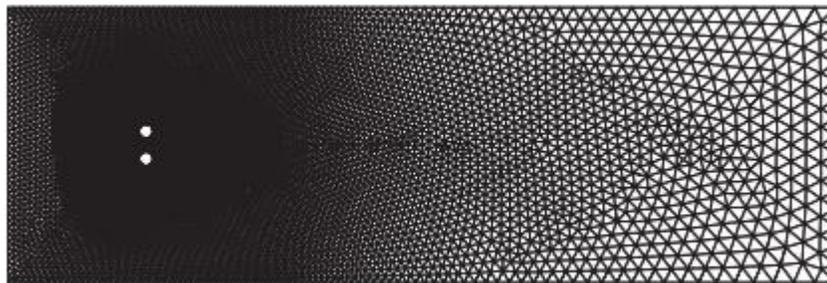
4.4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

O pré-processamento consiste na definição do problema. Nesta etapa, é criada a geometria da região onde o fluxo irá acontecer. Isto é, determina-se o domínio computacional para os cálculos das equações fundamentais. Posteriormente, é gerada a malha que é um dos fatores mais essenciais do estágio de pré-processamento. A CFD

exige a subdivisão do domínio em vários subdomínios menores e não sobrepostos, a fim de resolver a física do escoamento no interior da geometria do domínio que foi criada; isto resulta na criação de uma malha de células que cobrem toda a geometria do domínio. Portanto, a exatidão de uma análise em CFD é fortemente influenciada pelo número de células na malha (Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun, 2023). Na Figura 4, exemplifica-se uma malha de um fluido que passa por dois cilindros.

Figura 4 -- Malha de uma análise de CFD.

Fonte: (Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun, 2023)



Isto posto, existem métodos de controle para validação e verificação da qualidade da malha, dentre os quais, o teste de independência de malha é o principal (Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun, 2023; Wang *et al.*, 2020).

Para a realização de um teste de independência de malha, são utilizadas mais de uma malha aplicada a um mesmo domínio e, então, realiza-se uma comparação entre os dois sistemas. Em suma, as malhas são geradas com diferentes resoluções, cada vez mais finais, de modo a se realizar um comparativo dos resultados de suas simulações. Se os resultados não demonstrarem divergências consideráveis, a malha original é considerada como satisfatória. Caso contrário, uma malha ainda mais fina deve ser elaborada (Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun, 2023; Tahir; Al-Ghamdi, 2022; Tahir; Mabrouk; Koç, 2021).

Isto feito, deve-se definir as propriedades dos materiais e dos fluidos envolvidos. Nesta fase, é estabelecido se o sistema está ou não no estado estacionário, se o fluido é compressível ou incompressível, bem como as formas de transferência de calor a serem consideradas (condução, convecção, radiação). Especificam-se, então, as

condições de contorno. O sistema pode abranger contornos abertos ou fechados que permitirão ou bloquearão a passagem do fluido durante a simulação (Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun, 2023).

4.4.3 RESOLUÇÃO

Na etapa de resolução, as equações que regem os fluidos são aplicadas à malha pelo *software* utilizado. De modo geral, os trabalhos mais recentes utilizam o *Ansys*® como principal ferramenta para resolução das simulações em CFD. Neste, são consideradas equações de fenômenos de transporte que envolvem massa, momento, energia, equações de estado e modelos físicos matemáticos que, por sua vez, levam em consideração a existência de turbulência, combustão, radiação, reação química e outros processos que possam existir dentro do sistema em análise. Assim, as configurações iniciam a simulação que deve ser monitorada e verificada quanto a sua convergência. Caso a solução encontrada seja divergente, deve-se reestruturar a malha ou reavaliar os parâmetros utilizados para, então, retomar a simulação e repetir este processo até que se encontre uma solução convergente (Wen *et al.*, 2019).

No que diz respeito ao modo como as equações de conservação são solucionadas em cada volume de controle, esse fator depende fundamentalmente do método numérico aplicado. Atualmente, o método dos volumes finitos é o mais utilizado. Ainda (Hui, 2006; Tahir; Al-Ghamdi, 2022; Zhao *et al.*, 2022a, 2022b).

4.4.4 PÓS PROCESSAMENTO

Este é o estágio final da simulação. Nesta fase, são gerados gráficos que auxiliam na interpretação, análise e compreensão dos resultados alcançados. De maneira geral, existem alguns modelos de gráfico que são utilizados de maneira mais frequente. São eles: gráficos X-Y, de vetores e de contorno. Todos estão representados nas Figuras 5, 6 e 7, para o trabalho desenvolvido por Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun (2023) no estudo sobre escoamento entre dois cilindros.

Figura 5 - Gráfico X-Y da velocidade horizontal ao longo do comprimento L no caminho entre dois cilindros. Fonte: (Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun, 2023)

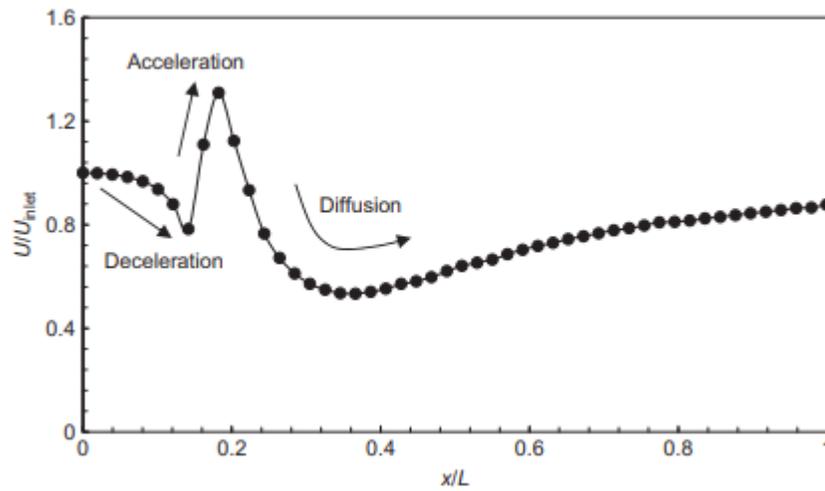


Figura 6 – Gráfico dos vetores de velocidade entre dois cilindros. Fonte: (Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun, 2023)

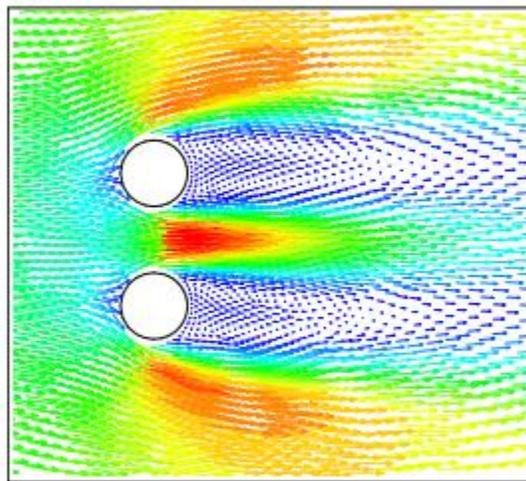
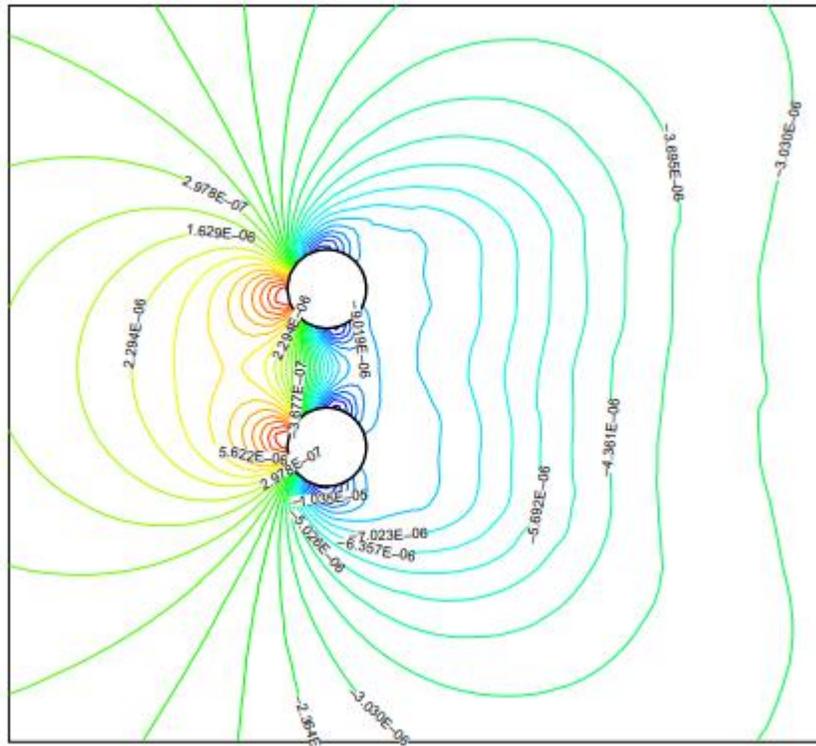


Figura 7 Contornos de linha para a distribuição do coeficiente de pressão de um fluido escoando entre dois cilindros (Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun, 2023).



Ainda, durante o pós-processamento, é necessário que os resultados da simulação sejam confrontados com procedimentos experimentais e laboratoriais, de modo a validar e verificar os resultados alcançados pelas análises dos dados gerados. Durante este processo de comprovação, variáveis como a posição e o tempo devem ser levados em consideração, uma vez que são responsáveis por influenciar toda a dinâmica dos fenômenos transcorridos durante a simulação (Jiyuan; Guan-Heng; Chaoqun, 2023).

5 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA A EVAPORADORES DO TIPO *FALLING FILM*

Como citado previamente neste trabalho, diversas são as aplicações da fluidodinâmica computacional dentro da engenharia. Dessa maneira, é possível encontrar na literatura muitos trabalhos que envolvam a CFD e evaporadores de película descendente. De forma majoritária, estes estudos contemplam aplicações que impactam diretamente o cotidiano. Alguns exemplos são: a estimativa em escala industrial da transferência de calor em evaporadores que produzem sucos (Cyklis, 2017), avaliação de evaporadores de múltiplo efeito na produção de água potável por meio do processo de dessalinização (Tahir; Mabrouk; Koç, 2021), o estudo do efeito de gases na hidrodinâmica, na transferência de calor e massa evaporadores do tipo *falling film*, em processos de absorção, resfriamento e desumidificação (Zhao *et al.*, 2022b).

Recentemente, uma grande quantidade de pesquisadores vem realizando trabalhos que exploravam profundamente o caráter da hidrodinâmica e os mecanismos de transferência de calor e massa, baseando-se nos aspectos da simulação numérica da CFD (Wang *et al.*, 2020).

As técnicas CFD permitem extrair facilmente os comportamentos transitórios do escoamento de fluidos e até mesmo distribuições espaciais e temporais pormenorizadas de velocidades e temperaturas. Embora tais fenômenos sejam amplamente conhecidos e estudados, para entender o escoamento bifásico em evaporadores *falling film*, é necessário uma construção, descrição e formação detalhada, uma vez que o comportamento do fluido e o transporte de energia e massa desse equipamento são muito complexos, o que dificulta sua simulação (Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2022a).

Tendo isso em vista, uma das abordagens mais habituais utilizadas pelos pesquisadores, para tornar a simulação em CFD plausível de ser realizada, consiste na simplificação do modelo físico por meio da inserção de premissas e suposições (Zhao *et al.*, 2022a). Em seguida, estão escritas algumas das considerações frequentemente utilizadas na simulação de evaporadores de película descendente, descritas por Wang *et al.* :

- Os fluidos envolvidos em ambas as fases são contínuos e newtonianos;
- A fase gasosa não aplica força viscosa sobre a superfície do filme líquido;
- A interface líquido-gás está em equilíbrio dinâmico, na qual ignora-se o gradiente de pressão e a força de cisalhamento. Quando estes componentes são desconsiderados, a força motriz do fluxo do líquido é equivalente à componente tangencial da força da gravidade ao longo da parede;
- A espessura do filme do líquido é muitas vezes menor que o raio do tubo;
- A distribuição do líquido é uniforme ao longo de todo o evaporador;
- A película distribui-se simetricamente em ambos os lados do tubo;
- O fluido em queda livre no topo do tubo equivale a um jato que incide sobre uma superfície plana;
- As características termodinâmicas e físicas dos fluidos, como densidade e viscosidade, são constantes quando estão sob a condição adiabática;
- Quando a temperatura do fluido descendente é igual a sua temperatura de saturação, assume-se propriedades termodinâmicas constantes. Caso contrário, pressupõe-se que os parâmetros termodinâmicos e físicos do fluido são funções da temperatura.

Após a determinação das condições nas quais a simulação ocorre, são então aplicados sistemas de equações para a resolução do problema. Observa-se, na literatura, que as equações de conservação de energia, momento e massa são amplamente utilizadas nessa etapa do processamento (Wen *et al.*, 2019). As equações 1, 2 e 3 representam, respectivamente, cada um dos fenômenos supracitados:

1. Equação da conservação de energia:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + P)) = \nabla \cdot [k_{eff} \nabla T - \sum h_k J_k] + S_E \quad (1)$$

2. Equação da conservação de momento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

3. Equação da conservação de massa:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3)$$

Onde t é o tempo, ρ é a densidade, E é a energia, \vec{u} o vetor de velocidade, P a pressão, k a condutividade térmica, T a temperatura, h_k a entalpia, J_k o fluxo de massa, S_E o termo da fonte de energia, g a aceleração da gravidade, \vec{F} o termo da fonte de momento. Tais equações são inseridas e, posteriormente, são realizadas as simplificações que melhor adequam-se às premissas do sistema em estudo (Canela-Sánchez *et al.*, 2022; Wen; Lu; Luo, 2021).

Em casos mais específicos, destacam-se ainda modelos de turbulência da energia cinética, da interface de transferência de massa e energia durante a transformação de fase, bem como modelos para superfícies contínuas e tensão superficial. Os desdobramentos de cada modelo são dados com base na complexidade do problema e os objetivos de cada trabalho.

Por fim, percebe-se que os resultados apresentados pelas simulações CFD de evaporadores *falling film* possuem características recorrentes. Principalmente, é comum que os autores destaquem os inúmeros aspectos que influenciam no resultado e na acurácia das análises obtidas. Majoritariamente, tem-se que esses fatores são os fluxos de calor, a velocidade de escoamento do líquido em película, as geometrias do trocador de calor e dos tubos, as propriedades intrínsecas dos fluidos utilizados e o sistema de distribuição e alimentação (Fernández-Seara; Pardiñas, 2014; Prost; González; Urbicain, 2006; Wang *et al.*, 2020)..

Ainda, os modelos de disposição dos tubos, bem como o poder de bombeamento da alimentação e o fluxo de escoamento são fatores importantes para evitar que a quebra da película. Além disso, ressalta-se também que existem muitas correlações empíricas distribuídas na literatura, mas a exatidão das previsões está associada e é limitada por condições experimentais específicas. (Fernández-Seara; Pardiñas, 2014; Zhao *et al.*, 2022a, 2022b).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Evaporadores do tipo *falling film* fazem parte de operações essenciais dentro de indústrias como a farmacêutica, química, de alimentos, de papel e celulose, de processos de dessalinização, entre outras diversas manufaturas. Dessa forma, uma melhor compreensão do funcionamento destes equipamentos, aliada ao estudo de novas técnicas que buscam melhorar os métodos de avaliação, dimensionamento e a compreensão do comportamento dos fluidos e dos materiais que compõem a os evaporadores de película descendente é fundamental para o futuro, visando cada vez mais um processo energeticamente eficiente.

Posto isso, este trabalho propôs-se a realizar uma revisão bibliográfica para auxiliar pesquisas futuras na concepção de como as técnicas de fluidodinâmica computacional apresentam-se cada vez mais como uma alternativa viável no desenvolvimento e na realização de análises de sistemas compostos por fluidos dinâmicos, que envolvem conceitos e aplicações teóricas da mecânica dos fluidos, dos fenômenos de transporte, bem como a ciência da computação e a de materiais.

Conforme exposto por meio deste trabalho, é possível compreender e perceber que o potencial de aplicação das técnicas de CFD é completamente plausível e factível dentro de inúmeras áreas que abrangem não só a engenharia química, como também são capazes de englobar uma vasta área de conhecimentos multidisciplinares dentro da ciência.

REFERÊNCIAS

BERK, Zeki. Production of citrus juice concentrates. **Citrus Fruit Processing**, [s. l.], p. 187–217, 2016. Disponível em: Acesso em: 23 nov. 2023.

CANELA-SÁNCHEZ, I. J. *et al.* Film breakdown onset Reynolds number of an absorption heat transformer with falling film heat exchangers: Modeling and estimation. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 215, p. 118914, 2022. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

CYKLIS, Piotr. Industrial scale engineering estimation of the heat transfer in falling film juice evaporators. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 123, p. 1365–1373, 2017. Disponível em: Acesso em: 11 nov. 2023.

DAI, Zhengshu *et al.* Falling-film heat exchangers used in desalination systems: A review. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 185, p. 122407, 2022. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

DE LIMA, Rafael Antônio. **Eficiência Energética de Evaporadores de Múltiplos Efeitos**. 2020. - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

FERNÁNDEZ-SEARA, José; PARDIÑAS, Ángel Á. Refrigerant falling film evaporation review: Description, fluid dynamics and heat transfer. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 64, n. 1–2, p. 155–171, 2014. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

GLOVER, William B. Selecting Evaporators for Process Applications . **Chemical Engineering Progress**, [s. l.], 2004.

GOLSHAN, Shahab *et al.* Review and implementation of CFD-DEM applied to chemical process systems. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 221, p. 115646, 2020.

GOURDON, Mathias; MURA, Ernesto. Performance evaluation of falling film evaporators in the dairy industry. **Food and Bioproducts Processing**, [s. l.], v. 101, p. 22–31, 2017. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

HUI, Y. H. **Handbook of Food Science Technology and Engineering**. Taylor & Francis. [S. l.: s. n.], 2006. v. 1

JASKULSKI, M.; WAWRZYNIAK, P.; ZBICIŃSKI, I. CFD simulations of droplet and particle agglomeration in an industrial counter-current spray dryer. **Advanced Powder Technology**, [s. l.], v. 29, n. 7, p. 1724–1733, 2018.

JIYUAN, Tu; GUAN-HENG, Yeoh; CHAOQUN, Liu. **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach** . 3. ed. [S. l.]: Katey Birtcher, 2023.

KUDRA, T. Energy Aspects in Drying. **Drying Technology: An International Journal**, [s. l.], v. 22, n. 5, p. 917–932, 2004.

LANGRISH, T. A.G.; FLETCHER, D. F. Spray drying of food ingredients and applications of CFD in spray drying. **Chemical Engineering and Processing**, [s. l.], v. 40, n. 4, p. 345–354, 2001.

LUYBEN, William L. Dynamic simulation of multi-effect evaporators. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, [s. l.], v. 131, p. 106–115, 2018. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5. ed. [S. l.]: McGraw-Hill, Inc. , 1993.

MINTON, Paul E. **Handbook of Evaporation Technology** . New Jersey: Noyes Publications, 1986.

MOERMAN, F.; FIKIIN, K. Hygienic Design of Air-Blast Freezing Systems. **Handbook of Hygiene Control in the Food Industry: Second Edition**, [s. l.], p. 271–316, 2016. Disponível em: Acesso em: 23 nov. 2023.

MUJUMDAR, Arun S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. [S. l.]: CRC Press, 2015.

ORTOLÁ ORTOLÁ, M^a Dolores; FITO SUÑER, Pedro José; CASTRO GIRÁLDEZ, Marta. TIPOS DE EVAPORADORES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://riunet.upv.es/handle/10251/102965>. Acesso em: 9 out. 2023.

PADILLA, Luis Eduardo Ayala; BELTRÁN, John Antony Pabón; CORREA-MAHECHA, Felipe. UNA MIRADA A LA EVAPORACIÓN COMO OPERACIÓN EN LA INDUSTRIA QUÍMICA. **FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**, [s. l.], v. 13, 2020.

PÉRIN-LEVASSEUR, Zoé; PALESE, Vanessa; MARÉCHAL, François. Energy integration study of a multi-effect evaporator. **Proceedings of the 11th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction**, [s. l.], 2008. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/126248>. Acesso em: 22 nov. 2023.

POOZESH, Sadegh *et al.* Integrating a model predictive control into a spray dryer simulator for a closed-loop control strategy. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 170, p. 121010, 2021.

PROST, J. S.; GONZÁLEZ, M. T.; URBICAIN, M. J. Determination and correlation of heat transfer coefficients in a falling film evaporator. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 73, n. 4, p. 320–326, 2006. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

ROGÉRIO, Heitor; COSTA, Andréa; JUNIOR, Esly Costa. APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLO EFEITO. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, [s. l.], v. 9, n. 16, 2013. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3543>. Acesso em: 19 nov. 2023.

SHAH, Dhara J.; BHAGCHANDANI, C.G. Design, Modelling and Simulation of Multiple Effect Evaporators. **International Journal of Scientific Engineering and Technology**, [s. l.], 2012.

SINGH, R. Paul; HELDMAN, Dennis R. Evaporation. **Introduction to Food Engineering**, [s. l.], p. 565–592, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123985309000085>. Acesso em: 23 nov. 2023.

TAHIR, Furqan; AL-GHAMDI, Sami G. CFD analysis of evaporation heat transfer for falling films application. **Energy Reports**, [s. l.], v. 8, p. 216–223, 2022. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

TAHIR, Furqan; MABROUK, Abdelnasser; KOÇ, Muammer. Heat Transfer Coefficient Estimation of Falling Film for Horizontal Tube Multi-Effect Desalination Evaporator Using CFD. **International Journal of Thermofluids**, [s. l.], v. 11, p. 100101, 2021. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

URBANIEC, K. The evolution of evaporator stations in the beet-sugar industry. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 61, n. 4, p. 505–508, 2004. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

WANG, Qifan *et al.* Review on liquid film flow and heat transfer characteristics outside horizontal tube falling film evaporator: Cfd numerical simulation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 163, p. 120440, 2020. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

WEN, Tao *et al.* Development of a novel quasi-3D model to investigate the performance of a falling film dehumidifier with CFD technology. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 132, p. 431–442, 2019. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

WEN, Tao; LU, Lin; LUO, Yimo. Review on the fundamentals and investigations of falling film dehumidification/absorption refrigeration based on CFD technology. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 171, p. 121042, 2021. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

ZAWAWI, M. H. *et al.* A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). **AIP Conference Proceedings**, [s. l.], v. 2030, n. 1, p. 020252, 2018.

ZHAO, Chuang Yao *et al.* A comprehensive review on computational studies of falling film hydrodynamics and heat transfer on the horizontal tube and tube bundle. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 202, p. 117869, 2022a. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.

ZHAO, Chuang Yao *et al.* The effect of gas streams on the hydrodynamics, heat and mass transfer in falling film evaporation, absorption, cooling and dehumidification: A

comprehensive review. **Building and Environment**, [s. l.], v. 219, p. 109183, 2022b.
Disponível em: Acesso em: 9 out. 2023.