

SIMULAÇÃO DE PELÍCULAS LÍQUIDAS DESCENDENTES PELA PAREDE INTERNA DE UM TUBO VERTICAL

C. S. GONÇALVES¹, M. B. QUADRI¹, R. A. F. MACHADO¹,
D. P. TRAMONTIN¹, F. MIOTTO¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e
Engenharia de Alimentos

E-mail para contato: camila.goncalves@posgrad.ufsc.br

RESUMO: O filme líquido descendente tem se tornado uma das formas mais eficazes de transferir calor e massa nos processos de evaporação e condensação. No campo das aplicações industriais, o escoamento de um líquido em superfície livre encontra sua principal utilização em trocadores com transferência de calor e massa. A principal vantagem desse tipo de dispositivo são as altas taxas de transferência de calor e massa obtidas com um pequeno fluxo de líquido. Por conseguinte, como primeiro passo, é de fundamental importância aprofundar o conhecimento da fluidodinâmica desse tipo de sistema frente a diferentes condições operacionais. Para o estudo de simulação numérica, empregou-se o método de elementos finitos e um modelo do tipo campo de fases (*Phase Field*) implementado no *software Comsol Multiphysics 4.3b*. Testaram-se líquidos de diferentes viscosidades e densidades, obtendo-se bons resultados diante de evidências experimentais encontradas na literatura.

Palavras-chave: Película descendente. Simulação. Escoamento bifásico. Fluidodinâmica.

1. INTRODUÇÃO

A destilação é uma técnica de separação que consiste na ebulição preferencial dos componentes voláteis de uma mistura, separando-a em dois ou mais produtos de diferentes pontos de ebulição. Entretanto, o consumo de energia que este tipo de processo exige é extremamente alto. Industrialmente, apesar de novos métodos de separação serem continuamente explorados, a destilação foi e continua sendo a principal etapa de separação utilizada nas indústrias químicas, pois permite obter altas taxas de produtos, além de ampla faixa de aplicação (Moussa, 2001).

Uma nova tecnologia vem sendo estudada e a mesma consiste em avaliar as vantagens de uma destilação por película descendente. O processo de destilação por filme líquido descendente é uma maneira eficaz de transferir calor e massa nos processos de evaporação e condensação. Isso ocorre devido a grande superfície de contato da fina camada de líquido em circulação, que possibilita altas taxas de transferência de calor e massa, necessitando de um pequeno fluxo de líquido (Teleken, 2013).

A destilação convencional praticamente não utiliza o calor de condensação resultado de parte da água condensada que pode outra vez evaporar e ascender pela coluna. Em contra

partida, a destilação por película tem a grande vantagem de utilizar como foco o calor de condensação dos compostos.

Este trabalho apresenta como foco principal o estudo da fluidodinâmica da destilação por filme descendente, utilizando fluidos de diferentes viscosidades e densidades (água e óleo), a fim de comparação.

Para o estudo de simulação numérica que representa o sistema de destilação por película descendente, utilizou-se o *software COMSOL Multiphysics* versão 4.3b, no intuito de obter a melhor fluidodinâmica dos sistemas bifásicos frente a diferentes condições operacionais.

1.1. Destilação por película de filme descendente

A destilação por filme líquido descendente é um processo com baixo tempo de residência e estrutura simples quando comparado à destilação convencional. Consiste basicamente de um tubo vertical por onde o líquido flui descendente formando uma película nas paredes do tubo. Além disso, é possível obter altas taxas de transferência de massa e calor (Batistella, 1999 *apud* Teleken, 2013).

Conforme Wang *et al.* (2010), o uso de filmes líquidos finos é amplamente encontrado em equipamentos de processos industriais comuns, onde os fenômenos de transferência de calor e massa ocorrem, tais como bomba de absorção de calor, evaporador, entre outros. Baixa resistência térmica e grande superfície de contato em pequenas vazões específicas de líquido tornam o filme um meio eficaz na intensificação da transferência de calor e massa na interfase. É amplamente utilizado na petroquímica, refrigeração, processamento de alimentos e geração de energia de calor residual.

O desempenho deste tipo de equipamento é fortemente afetado pela distribuição dos líquidos e da estabilidade do filme, fatores estes que são críticos e decisivos no transporte de massa e na transferência de calor. Sem a estabilidade do filme, estas taxas ficariam aquém do esperado. Conforme Pinto *et al.* (2003), em dispositivos deste tipo a diferença de temperatura entre o fluxo de vapor e o filme líquido deve ser mantida a menor possível.

A tecnologia do filme descendente é utilizada em uma variedade de aplicações industriais onde são desejadas grandes taxas de transferência de calor ou de massa (Albert *et al.* 2013).

1.2. Definição do Modelo

O modelo representado foi baseado em relatórios técnicos sobre DESTUBCAL (destilação por tubo de calor) desenvolvidos no departamento de Engenharia Química e Engenharia de alimentos, no laboratório de Controle de Processos; e no departamento de Engenharia Mecânica, no laboratório de tubos de calor, localizados na Universidade Federal de Santa Catarina. Os parâmetros assim como o modelo da geometria foram extraídos destes relatórios.

A geometria do destilador consiste em uma coluna, com 1 m de comprimento, 26 mm de diâmetro e um cone localizado na parte superior da coluna, cuja finalidade é distribuir a película de líquido. As dimensões do cone são: 46,5 mm de comprimento; 10,5 mm o raio maior e 6,75 mm o raio menor. A geometria é axissimétrica. Para fins de economia de malha,

representou-se a coluna com 30 cm de comprimento, sendo esta suficiente para representar a fluidodinâmica dos filmes.

O modelo abrange o fenômeno de escoamento multifásico com regime turbulento para a água e laminar para os óleos, do tipo campo de fase (phase field).

O fluido é alimentado na entrada superior direita da coluna com uma determinada velocidade em m/s. A interface adotada é a linha horizontal que segue do final do cone à parede da coluna. Especificaram-se duas saídas; a superior e a inferior, adotando-se nestes pontos pressão igual a zero. A Figura 1 ilustra a geometria geral do modelo, ou seja, a coluna de 30 cm.

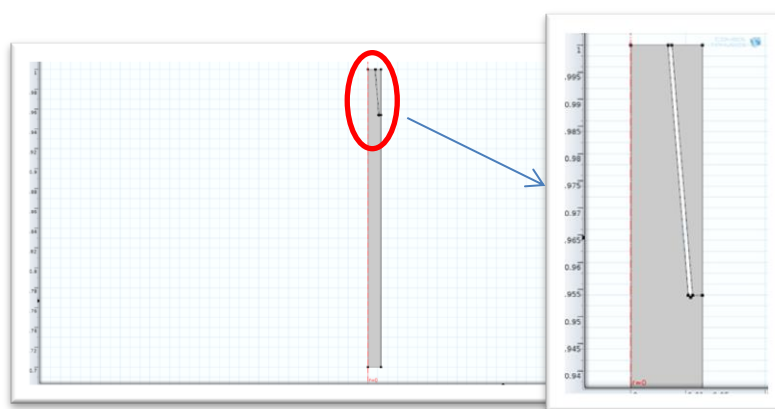


Figura 1 - Geometria da coluna em plano 2D axissimétrico.

Considerou-se neste modelo a ação da gravidade somente para a água, anulando o efeito da mesma para o ar.

1.3. Escoamento Turbulento Para Duas Fases – *Phase Field*

No modelo de Fluxo turbulento para duas fases, *phase field*, o método de campo de fase oferece uma alternativa frente aos métodos mais tradicionais para a solução de problemas de fluxo multifásico. Em vez de controlar diretamente a interface entre dois fluidos, a camada interfacial é governada por um domínio variável de fase. A variável de campo de fase é governada pela equação de Cahn-Hilliard. A equação de Cahn-Hilliard é um modelo de campo de fase que permite simular a separação dos componentes de uma mistura bifásica. Os modelos de campo de fase constituem uma classe particular dos modelos de interface difusiva. Nesses modelos, as transições nas interfaces entre os diferentes fluidos ou materiais são substituídas por camadas delgadas nas quais as forças interfaciais são distribuídas suavemente. A ideia básica é introduzir um parâmetro de ordem ou campo de fase ϕ que descreve em cada instante o estado do fluido. Esse parâmetro de ordem varia continuamente sobre as finas camadas interfaciais, tornando-se mais uniforme no interior das fases (Nós et al. 2012). No contexto de problemas transientes e assumindo que os fluxos difusivos interfaciais são aproximadamente proporcionais ao potencial químico, a dinâmica do campo de fase pode ser descrita pelo conjunto de equações de Navier-Stokes (1) e (2) para escoamentos incompressíveis e pelas equações de Cahn-Hilliard (3) a (6):

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{st} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \frac{\gamma \lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi \quad (3)$$

$$\psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1)\phi + \left(\frac{\varepsilon^2}{\lambda}\right) \frac{\partial f_{ext}}{\partial \phi} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{3\varepsilon\sigma}{\sqrt{8}} \quad (5)$$

$$\gamma = X \varepsilon^2 \quad (6)$$

Onde: ρ é densidade (kg/m³); \mathbf{u} é o vetor velocidade (m/s); p é a pressão (Pa); (\mathbf{F}_g) representa a gravidade; (\mathbf{F}_{st}) a tensão interfacial; ϕ é a variável campo de fase; ψ é uma variável auxiliar; γ é uma constante não negativa; $\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi$ é o termo que representa a energia interfacial; ε é uma constante associada à espessura da interface e $f_{ext}(\phi)$ é a energia livre externa.

1.4. Malha da Geometria e Condições de Contorno

A malha da geometria consta de 13797 elementos triangulares, 2440 elementos quadrados, totalizando 16237 elementos. Na parede da coluna e do cone, foram utilizados elementos de camada, cuja finalidade é representar melhor o comportamento do fluido nesta região.

As condições de contorno utilizadas foram: as paredes da coluna e do cone foram assumidas como função de parede, para o regime turbulento (água) e para o regime laminar (óleos) foram assumidas como parede molhada; inicialmente, não há movimento, onde $u = 0$ em z e r ; a pressão inicial do sistema se encontra a 0 Pa; na entrada, a velocidade assume um valor específico, conforme a natureza do fluido; nas saídas considera-se pressão igual a 0 Pa e ação da gravidade somente no fluido.

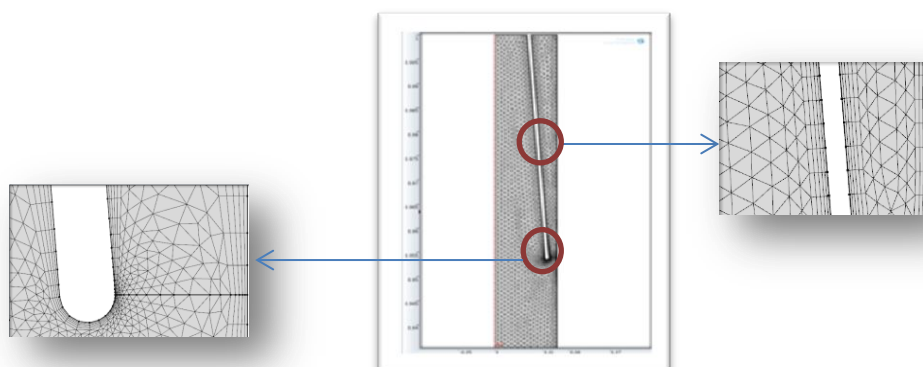


Figura 3 – Detalhes da malha utilizada na discretização do domínio.

2. RESULTADOS

Para o fluxo de água, foi simulado o perfil de escoamento de uma película com diferentes velocidades de entrada em relação às encontradas na literatura. Em primeiro, simulou-se fielmente o fenômeno seguindo os parâmetros estudados por Teleken, 2013 em sua tese de doutorado. Posteriormente, a simulação seguiu com apenas um parâmetro diferente, ou seja, alterou-se a velocidade de entrada da água a fim de observar o comportamento e o desempenho da formação da película em relação ao primeiro caso. Para o conjunto óleo e ar, manteve-se os parâmetros da tese.

2.1. Simulação da Formação da Película Descendente de Água com Parâmetros Operacionais Experimentais

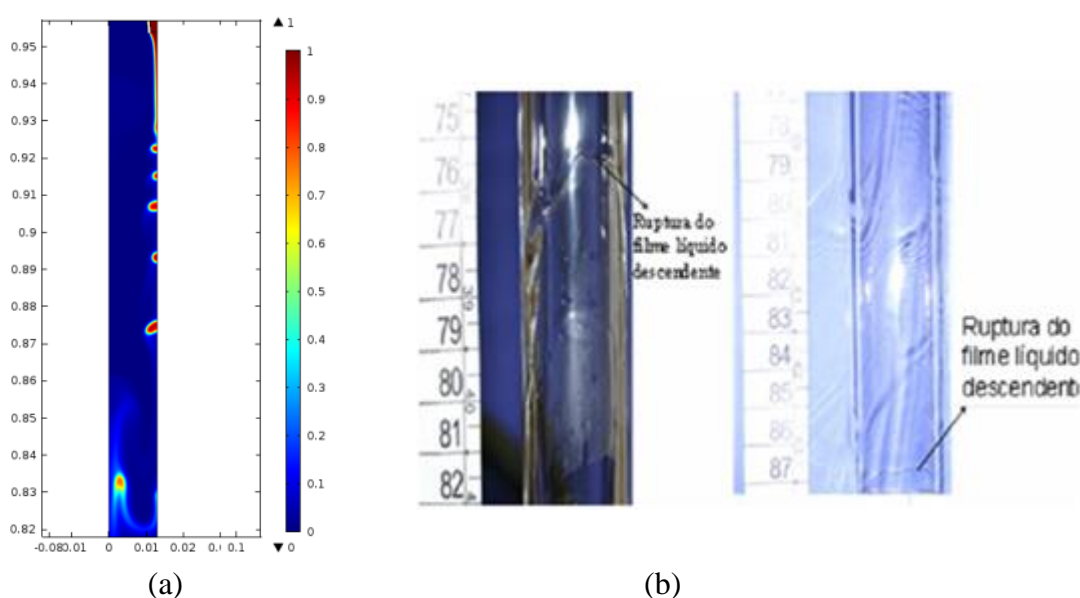


Figura 4 – Película descendente simulada de água na coluna (a) e película descendente experimental (b)

A Figura 4 (b) ilustra experimentalmente a distribuição da película de água na coluna, na vazão de alimentação de 25 kg/h ou 0,0376 m/s. A Figura 4 (a) é a simulação que representa este experimento, utilizando as mesmas condições experimentais. Observa-se na Figura 4 (b) que houve uma pequena película formada, havendo rupturas no filme logo no início da coluna. A simulação, na Figura 4 (a) reproduziu o fenômeno de forma aproximada, isto é, houve ruptura do filme no início da coluna e formação de anéis no restante, fato este que não ocorreu no experimental.

2.2. Simulação da Formação da Película Descendente de Água com Parâmetros de Operação Modificados

O objetivo da destilação por filme descendente, primeiramente, é formar uma película estável, sem rupturas e uniforme. Mantendo os parâmetros de Teleken (2013) e alterando-se

somente a vazão de entrada, para 0,15 m/s ou aproximadamente 100 kg/h de água, obteve-se o resultado abaixo:

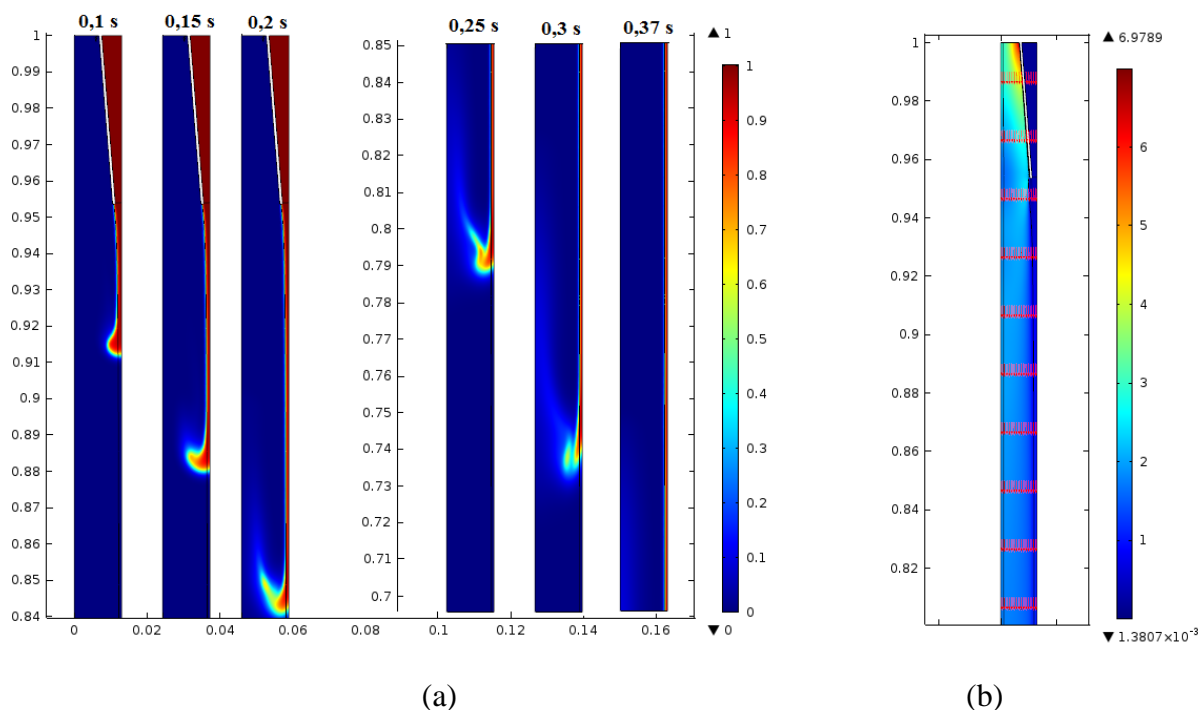


Figura 5 – Filme descendente de água na coluna (a) e velocidade de escoamento (b)

A vazão de 100 kg/h (que corresponde a 0,15 m/s) pode ser considerada como um valor otimizado, isto é, estudou-se diversos valores de vazão de entrada, entre eles 25 kg/h, 35 Kg/h, 50 kg/h, 66 kg/h e 100 kg/h, em que este último apresentou o melhor resultado, adquirindo um filme longo, sem rupturas e estável, como ilustrado na Figura 5. Nesta situação, a película formada adquiriu uma espessura de 0,756 cm, sendo que espessuras próximas a 0,3 cm são faixas de valores ideais para operação de um sistema de destilação por filme líquido descendente.

Segundo Teleken (2013), o desenvolvimento da espessura do filme líquido descendente é influenciado pela velocidade da fase gasosa e as propriedades físicas do líquido. A velocidade de descida do filme atingiu um valor aproximado de 0,25 m/s na interface.

2.3. Simulação da Formação da Película Descendente de óleo de Spindura e óleo de Soja

Para comparar com a água, outros dois fluidos foram testados: o óleo Spindura e o óleo de soja, sendo o último mais denso que o primeiro. Suas densidades são de 830 kg/m³ e 920 kg/m³ e suas viscosidades são de 0,0175 Pa.s e 0,0621 Pa.s, para o óleo de Spindura e óleo de soja, respectivamente. Para esta simulação, utilizou-se regime de escoamento laminar, visto que as viscosidades altas destes fluidos diminuem o número de Reynolds, que por sua vez tornam o escoamento laminar. Para velocidade de alimentação, utilizou-se 0,0376 m/s, que corresponde a 20,75 kg/m³ e 23,00 kg/m³ para o spindura e o de soja, respectivamente.

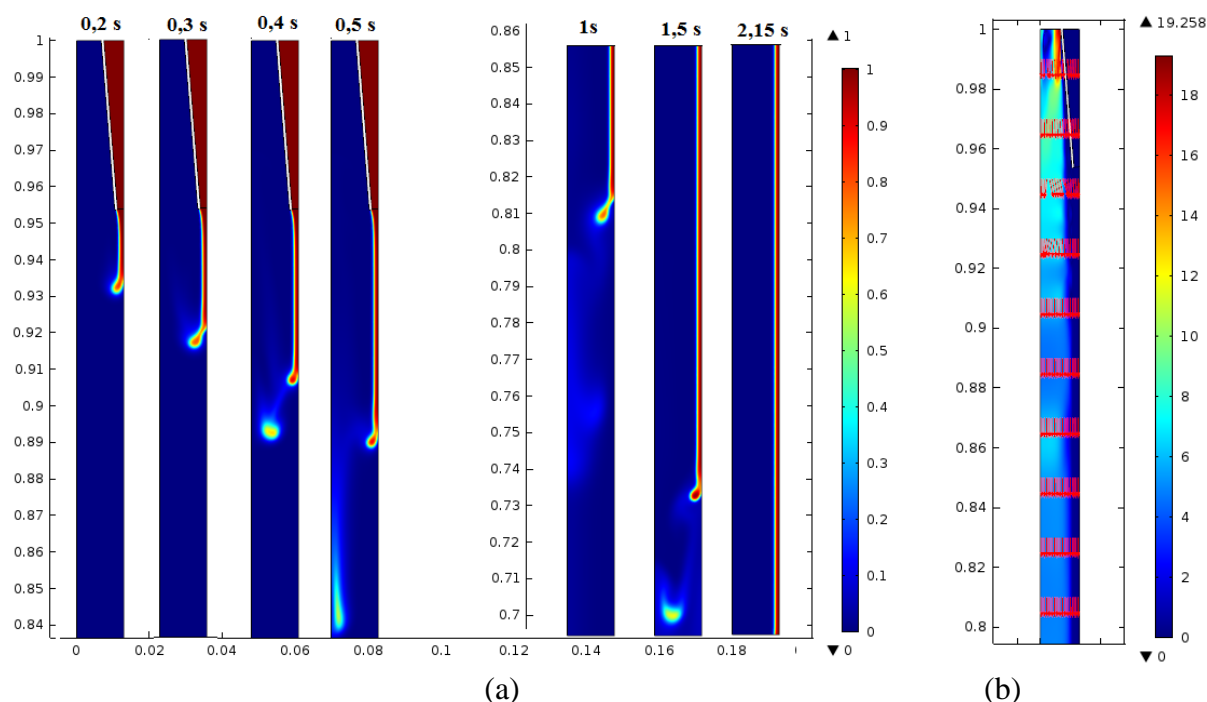


Figura 6 – Filme descendente de óleo de Spindura (a) e velocidade de escoamento (b)

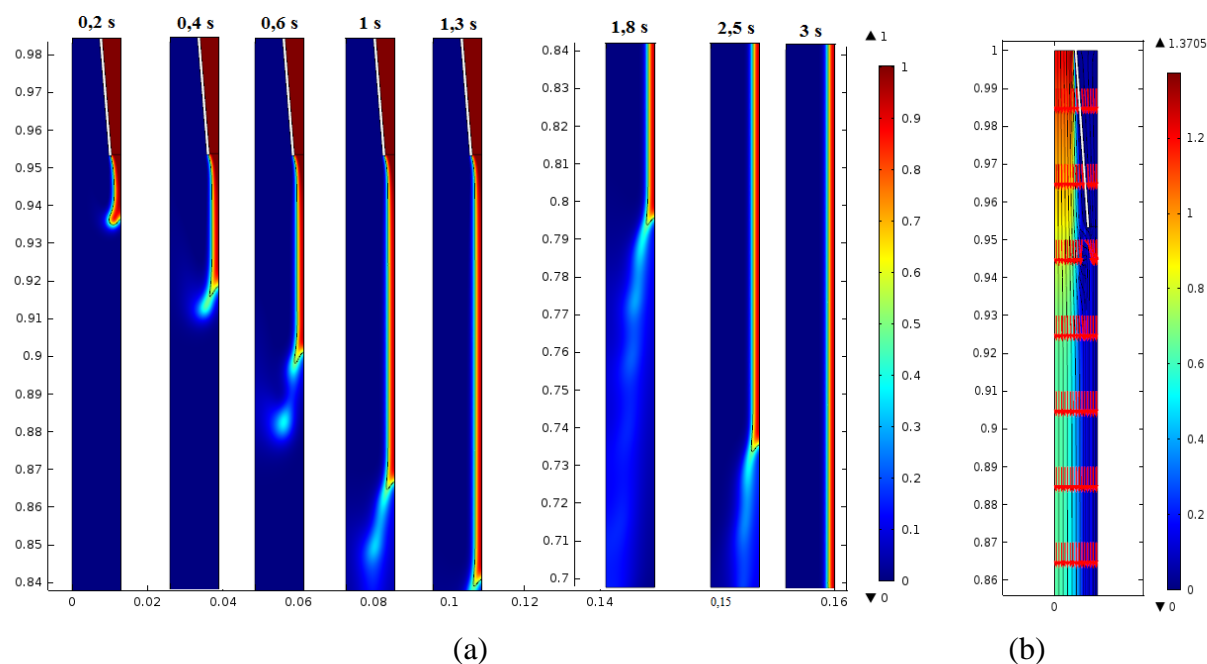


Figura 7 – Filme descendente de óleo de soja (a) e velocidade de escoamento (b)

As Figuras 6 e 7 comprovam que líquidos mais viscosos tendem a estabilizar a película com uma pequena velocidade de entrada de fluido. Observa-se que não há rompimentos ou instabilidade ao longo da coluna.

A película de óleo de Spindura da Figura 6 (a) apresentou a espessura de 1,36 cm. A velocidade na interface chegou ao valor de 6 m/s, como se observa na Figura 6 (b). Também

nessa figura se observa, junto ao cone de alimentação do óleo, na abertura superior, que o ar atinge uma velocidade de cerca de 18 m/s.

Na Figura 7, observa-se que a película do óleo de soja atingiu uma espessura de 2,023 cm. Já para esse óleo, a velocidade na interface atingiu um valor de 0,6 m/s e, na abertura superior, a velocidade da fase gasosa (ar) atingiu 1,2 m/s, aproximadamente.

3. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos apresentaram-se satisfatórios, sendo o principal objetivo demonstrar a formação de uma película longa, uniforme e estável, pois estes fatores são críticos e decisivos na eficiência do transporte de calor e massa para um processo em coluna de parede molhada. A literatura apresenta um vasto conteúdo sobre este tema e muitos registros relatam a obtenção de películas instáveis, com rupturas frequentes.

A viscosidade demonstrou ser um parâmetro importante para a formação da película, bem como a velocidade de alimentação do líquido. Fluidos menos viscosos necessitam de maior vazão de entrada (100 kg/h) para produzir uma película estável, como verificado no caso da água, cuja viscosidade é de 0,001 Pa.s. Para fluidos mais viscosos, vazões mais baixas (~20 Kg/h) são suficientes, como comprovado nas simulações de escoamento do óleo de Spindura e de soja.

4. REFERÊNCIAS

- ALBERT, C.; MARSCHALL, H.; BOTHE, D. Direct Numerical Simulation of interfacial mass transfer into falling films. *Int. j. heat mass transfer*; v.69, p.343-357, 2013.
- MOUSSA, L.S. **Análise Termodinâmica de Colunas de Destilação Visando à Otimização Energética**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Curso de Engenharia Química; 2001.
- NÓS, R. L.; CENICEROS, H. D.; ROMA, A. M. Simulação tridimensional adaptativa da separação das fases de uma mistura bifásica usando a equação de Cahn-Hilliard. *Mat. Apl. Comput.* v. 13, p. 37-50, 2012.
- PINTO, J. C. P.; PADILHA, A.; SCALON, V. L. Simulação teórica da transferência de calor e massa de uma película líquida descendente ao longo da parede vertical interna de um tubo cilíndrico. *Mec. Comput.*; v. XXII, p. 1736 – 1746, 2003
- TAVARES, E. G.; MILANEZ, F.H.; BOLZAN, A.; MARANGONI, C.; TELEKEN, J. G.; WERLE, L. O.; QUADRI, M. B.; MACHADO, R. A. F. **Projeto Destubcal: Desenvolvimento de tecnologia por tubos de calor, aplicável ao melhoramento de petróleo extra-pesado, em ambiente de produção offshore**. Relatório técnico – Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- TELEKEN, J. G. **Modelagem Matemática e Análise Fluidodinâmica do Processo de Destilação por Filme Líquido Descendente**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos; 2013.
- WANG, Q.; MA, X.; LAN, Z.; CHEN, J.; BAI, T. Heat Transfer Characteristics of Falling Film Process on Coated Division Tubes: Effect of the Surface Configurations. *Ind. Eng. Chem. Res.*; v. 49, p. 6622-6629, 2010.