

IMPRESSÃO 3D E SIMULAÇÃO NUMÉRICA NO DESIGN DE DISTRIBUIDORES DE FLUXO

V. F. ANDOLPHATO¹, M. G. M. LOPES¹, H. S. SANTANA¹, J. L. SILVA JR² e O. P. TARANTO¹

¹ Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais

E-mail para contato: marianalopes@feq.unicamp.br

RESUMO – Microplantas são plantas químicas que utilizam estruturas micrométricas principalmente microrreatores, micromisturadores e microtrocaadores de calor. A microplanta envolve o aumento da produção de um determinado produto utilizando várias unidades micrométricas dispostas paralelamente (escalonamento). O escalonamento está relacionado com a distribuição uniforme de fluxo através dos microdispositivos, feita pelo distribuidor de vazão, que realiza a divisão de uma corrente de entrada em várias subcorrentes. Uma má distribuição, causada por designs inadequados, reduz a performance da microplanta. Assim, a fabricação em impressora 3D e a análise computacional permitem o desenvolvimento de uma forma mais rápida e econômica desses distribuidores. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi aplicar impressoras 3D na fabricação de distribuidores de vazão e comparar os resultados obtidos com simulações numéricas. A metodologia foi dividida em design do distribuidor, fabricação da peça, testes experimentais e ensaios computacionais. Foram obtidas as vazões mássicas em cada saída do distribuidor, para os ensaios experimentais e computacionais. Observou-se um perfil qualitativo de distribuição de fluxo próximo entre as metodologias analisadas. Houve aumento da uniformidade de fluxo com o aumento das vazões de teste para os ensaios experimentais. Porém, computacionalmente o comportamento observado foi oposto. Conclui-se que novos designs e condições de contorno devem ser testados.

1. INTRODUÇÃO

Microplantas químicas podem ser entendidas como plantas químicas que utilizam estruturas micrométricas principalmente microrreatores, micromisturadores e microtrocaadores de calor (i.e., estruturas com dimensões de dezenas a centenas de micrômetros) (Hasebe, 2004). Um exemplo de microplanta química é apresentada por Billo *et al.* (2015) para a produção de biodiesel, em que são empregados 14.000 microrreatores a uma taxa de produção de 2,47 L min⁻¹. A microplanta química envolve o aumento da produção de um determinado produto utilizando várias unidades micrométricas dispostas paralelamente (*numbering up* – escalonamento). O escalonamento está diretamente relacionado com a distribuição uniforme de fluxo através dos microdispositivos em paralelo, feita pelo distribuidor de vazão. A má distribuição é causada por designs inadequados de distribuidores de vazão, os quais reduzem a performance da microplanta. Dessa forma, o distribuidor de vazão pode operar com taxas de fluxos macroscópicas, mas tem o objetivo de manter o desempenho e performance de um único

microrreator. Na pesquisa realizada por Wang *et al.* (2016) foi relatado que o comprimento e a forma do distribuidor de vazão múltiplo (i. e., a corrente principal é dividida em duas e cada uma dessas subcorrentes são subdivididas até atingir o número de saídas desejado), a largura e a localização da entrada e da saída do microrreator são os parâmetros que mais influenciam na uniformidade de fluxo nos microcanais. Zhang *et al.* (2011) simularam o escoamento em três tipos de distribuidores utilizando o software ANSYS CFX e testaram, também, a influência do tipo de alimentação (entrada de líquido) do distribuidor de vazão. A simulação é uma das formas de se observar o comportamento do escoamento dos fluidos nos distribuidores de vazão, mas precisa ser confirmada através de experimentos. A impressão 3D (i.e., fabricação camada por camada de objetos físicos diretamente de objeto digitais) é a maneira mais fácil, rápida e econômica para fabricar e, posteriormente, testar os designs de distribuidores de vazão. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi aplicar impressoras 3D no desenvolvimento dos distribuidores de vazão, realizar testes experimentais de uniformidade de fluxo dos distribuidores e comparar os resultados obtidos com as simulações realizadas no software ANSYS CFX.

2. EXPERIMENTAL

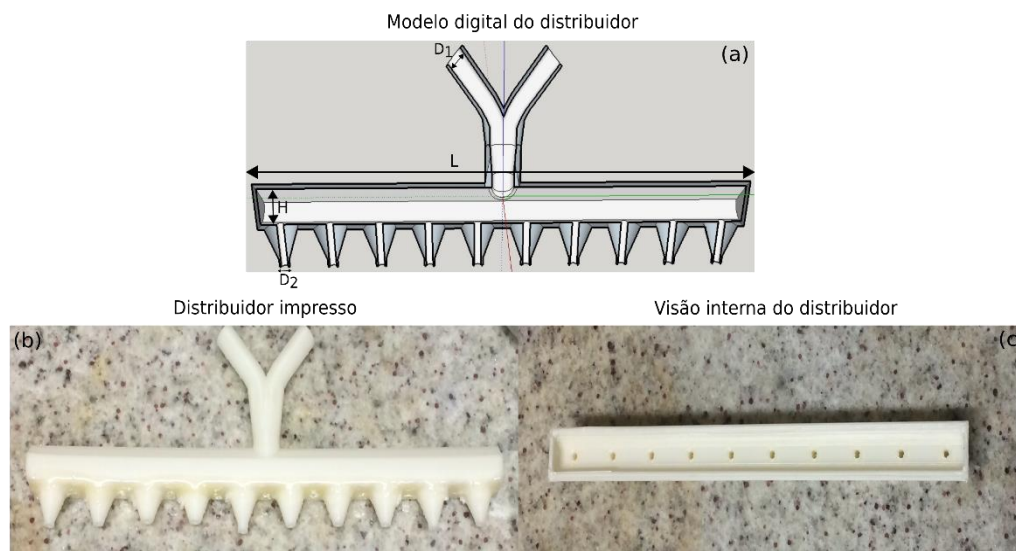
2.1. Impressão 3D, teste de vazão do distribuidor e Uniformidade de fluxo

O design do distribuidor utilizado nesse trabalho foi baseado no modelo apresentado em Zhang *et al.*, 2011. Esse modelo é um distribuidor retangular com 2 entradas centrais de 6,79 mm de diâmetro (D_1), com 10 saídas de 2,88 mm de diâmetro (D_2), sendo a que a parte interna do distribuidor possui 12,81 mm de altura (H), 200,01 mm de comprimento (L) e 4,05 mm de largura (dimensão próxima a saída do distribuidor). O software SketchUp foi utilizado para desenhar a geometria em três dimensões (Figura 1a). Após o design do distribuidor, realizou-se o fatiamento da peça (transformação do desenho 3D em um arquivo legível para a impressora 3D) utilizando o software *Simplify3D*. A impressora utilizada para a impressão do distribuidor foi a Sethi3D S3 e o material utilizado foi o polímero ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno). O processo de impressão do distribuidor ocorreu através do aquecimento do polímero ABS a 235°C (temperatura de fusão) e por um extrusor presente na impressora o polímero foi depositado, camada por camada, até a completa confecção da peça (Figura 1b e 1c). O tempo de impressão foi de 1 hora e 42 minutos, sendo que foram gastos 40,75 g de polímero e o custo estimado da peça impressa foi de 4,97 reais. O teste de vazão do distribuidor foi realizado através do bombeamento de água contida em béqueres de 1L por tubulações flexíveis Masterflex® (Tygon Lab - L/S 17) utilizando duas bombas peristálticas Masterflex® L/S® (modelo dos cabeçotes: 7518-10 e 7518-00). As vazões de teste de 30, 50, 100, 170, 250 e 300 mL min⁻¹ foram ajustadas para cada uma das bombas e as vazões de saída foram medidas com o auxílio de provetas de 10 mL e cronômetro. Os experimentos foram realizados em temperatura ambiente. As medidas de vazão das saídas do distribuidor foram realizadas em triplicatas e os resultados apresentam a média dessas medidas.

Os resultados desse trabalho foram avaliados através da normalização da vazão mássica e da distribuição de fluxo nas saídas. A normalização da vazão mássica é calculada através da vazão mássica de saída e da vazão mássica total de entrada, conforme a Equação 1.

$$\alpha = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_e} \quad (1)$$

Figura 1 – Distribuidor de vazão retangular: (a) Modelo digital obtido no software 3D SketchUp; (b) Peça impressa e (c) visão interna do distribuidor impresso.



Em que, \dot{m}_i é a vazão mássica em cada saída do distribuidor em kg s^{-1} e \dot{m}_e é a vazão mássica total de entrada do distribuidor em kg s^{-1} , sendo $0 < \alpha < 1$. A distribuição de fluxo pode ser quantificada pelo coeficiente de não-uniformidade de fluxo (Φ) utilizando o conceito de desvio padrão. O coeficiente de não-uniformidade de fluxo é dado por:

$$\Phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\beta_i - \bar{\beta})^2}{N}} \quad (2)$$

Em que β_i é a razão de escoamento para cada saída do distribuidor, $\bar{\beta}$ é a média das razões de escoamento de todas as N subcorrentes da saída do distribuidor e N é o número total de saídas do distribuidor. Assim, a razão de escoamento para cada saída do distribuidor é dada por:

$$\beta_i = \frac{Q_i}{Q} \quad (3)$$

Em que Q_i é a vazão para cada uma das N subcorrentes da saída (mL s^{-1}) e Q é a vazão total de saída do distribuidor (mL s^{-1}). A média das razões de escoamento de todas as N subcorrentes da saída do distribuidor é:

$$\bar{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^N \beta_i}{N} \quad (4)$$

Conforme Hassan *et al.* (2014) a uniformidade de fluxo aumenta com o decréscimo do valor do coeficiente de não-uniformidade de fluxo (Φ). Assim, a uniformidade de fluxo de um distribuidor é obtida pela minimização do valor do coeficiente de não-uniformidade de fluxo.

3. COMPUTACIONAL

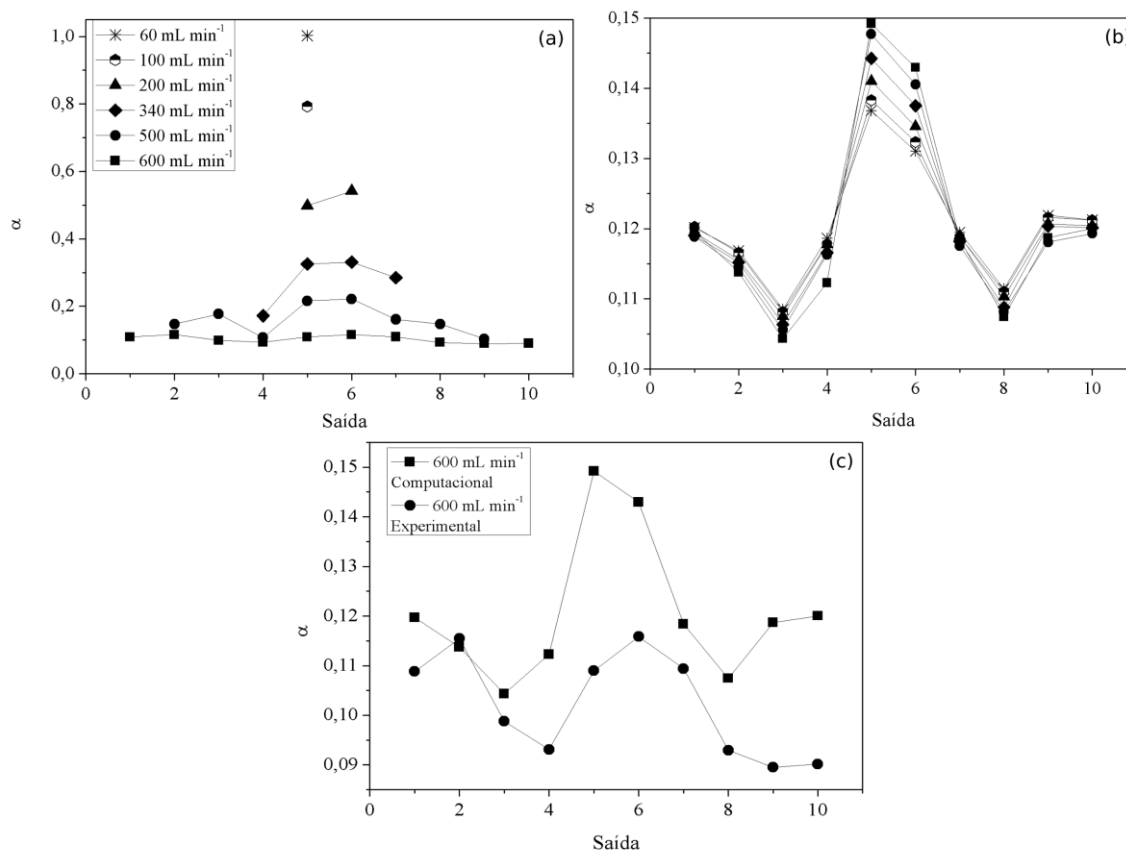
O modelo do distribuidor utilizado nos ensaios numéricos foi o mesmo da Figura 1. O software ANSYS ICEM 17.2 foi utilizado no processo de discretização da geometria (subdivisão da geometria/domínio em um número finito de volumes de controle), onde foram utilizados 663860 elementos tetraédricos. O software ANSYS CFX 17.2 foi utilizado nas simulações numéricas. Todas as simulações foram realizadas considerando regime laminar e estacionário e escoamento incompressível. As equações utilizadas no software foram a equação da continuidade e de Navier-Stokes. As condições de contorno para as equações de transporte descritas anteriormente são: entradas de fluido com velocidades constantes baseadas nas vazões experimentais; saídas com pressão média relativa zero; nas paredes do distribuidor foram aplicadas a condição de não deslizamento. Para a resolução numérica, esquema de alta resolução foram utilizados para os termos advectivos. O critério de convergência estabelecido RMS (root mean square) foi de 1×10^{-5} e o número de interações foi configurado entre 500 e 5000. As simulações foram resolvidas em processamento paralelo no LPQGe (Laboratório de Pesquisa em Processos Químicos e Gestão Empresarial). Os nós de computador são compostos de 8 processadores Intel Xeon de 3 GHz com 16 GB de RAM, que utilizam o sistema operacional Suse Linux de 64-bit.

4. RESULTADOS

Os resultados experimentais e computacionais obtidos no teste de vazão do distribuidor com água estão apresentados na Figura 2. Experimentalmente (Figura 2a) observa-se que para todas as vazões de teste houve vazão mássica na saída 5 do distribuidor. Para as vazões totais de entrada (soma das vazões de testes) de 60 mL min^{-1} e 100 mL min^{-1} houve somente vazão mássica em uma das 10 saídas do distribuidor (saída 5). Isso pode estar relacionado a quantidade de volume bombeado que não foi suficiente para preencher o distribuidor com água. A partir da vazão total de entrada de 200 mL min^{-1} já é possível constatar vazão mássica em duas saídas (saídas 5 e 6) do distribuidor, sendo que nas vazões de 340 mL min^{-1} , 500 mL min^{-1} e 600 mL min^{-1} pode ser observado um perfil de distribuição de fluxo. Os fluxos mássicos são superiores nas saídas centrais do distribuidor (saídas 5 e 6) como apresentado na Figura 2a para as vazões totais de entrada de 340 mL min^{-1} , 500 mL min^{-1} e 600 mL min^{-1} . Esse comportamento também é observado no trabalho de Zhang et al. (2011), em que a vazão mássica nas saídas centrais do distribuidor é maior. Nos ensaios computacionais (Figura 2b) observa-se que para todas as vazões de teste houveram vazões mássicas em todas as 10 saídas do distribuidor. Verifica-se também que ocorrem maiores vazões mássicas nas saídas centrais do distribuidor (saídas 5 e 6), assim como observado nos ensaios experimentais. O perfil de distribuição das vazões de saída observado para a vazão total de entrada de 600 mL min^{-1} do ensaio experimental concorda parcialmente com aquele apresentado nas simulações para mesma vazão de teste (Figura 2c). A diferença pode estar relacionada com a presença de bolhas de ar dentro do distribuidor durante os ensaios experimentais. Essas bolhas são causadas pela bomba peristáltica e pelo não completo preenchimento da parte interna do distribuidor com água. Esse mesmo fenômeno foi observado por Zhang et al. (2011) na comparação entre as simulações e os ensaios experimentais.

A uniformidade de fluxo é um fator importante para ser avaliado em um distribuidor de fluxo, pois o mesmo tem o objetivo de garantir em cada saída do distribuidor as mesmas condições de operação para um único microrreator. Assim, a uniformidade de fluxo pode ser quantificada pelo coeficiente de não-uniformidade de fluxo (Φ).

Figura 2 – Vazão mássica das saídas do distribuidor para diferentes vazões de entrada: (a) Ensaios experimentais, (b) Ensaios computacionais e (c) comparação da distribuição de fluxo experimental e computacional a 600 mL min^{-1} .



A Tabela 1 apresenta o resultado do cálculo para os ensaios experimentais e computacionais, em que é observado que esse parâmetro diminui com o aumento da vazão experimentalmente e aumenta nos ensaios computacionais. Su *et al.* (2016) apresentam um distribuidor de vazões múltiplos com 8 saídas conectadas a microrreatores. Nesse trabalho, também é abordado o desvio de fluxo nas saídas do distribuidor múltiplo por ensaios experimentais. Os autores concluíram que altas vazões contribuem para uma boa uniformidade de fluxo do distribuidor com baixos desvios, menores que 5% (desvios são tipicamente maiores que 10%). O mesmo fenômeno é observado para os ensaios experimentais realizado com o distribuidor, em que a uniformidade de fluxo aumenta com o aumento das vazões de entrada (i.e., diminuição do coeficiente de não-uniformidade de fluxo). Porém, para as simulações ocorre o oposto, a uniformidade de fluxo decresce com o aumento das vazões de entrada. Liu *et al.* (2010) analisam o coeficiente de não-uniformidade para simulações com um distribuidor múltiplo. Nos ensaios computacionais realizados por Liu *et al.* (2010) foi avaliada a uniformidade de fluxo para diferentes geometrias em diferentes valores de Reynolds. Sendo que das 7 geometrias analisadas 6 apresentaram o aumento do coeficiente de não-uniformidade do fluxo com o aumento de Reynolds, ou seja, a uniformidade de fluxo diminuiu com o aumento da velocidade (Reynolds). O mesmo caso pode ser observado nos resultados do coeficiente de não-uniformidade de fluxo obtidos para os ensaios computacionais com a geometria do distribuidor.

Tabela 1 – Coeficiente de não-uniformidade de fluxo para ensaios experimentais e computacionais.

Vazões totais de entrada (mL min ⁻¹)	Experimental		Computacional	
	Φ	Φ (%)	Φ	Φ (%)
60	0,3	30	0,00655	0,655
100	0,3	30	0,00707	0,707
200	0,2002	20,02	0,00798	0,798
340	0,1278	12,78	0,00923	0,923
500	0,0576	5,76	0,01045	1,045
600	0,00973	0,973	0,01137	1,137

5. CONCLUSÃO

A uniformidade de fluxo do distribuidor de vazão foi avaliada utilizando as abordagens experimental e computacional. Com isso foi possível observar perfis qualitativos da distribuição de fluxo próximos entre os ensaios experimentais e as simulações. Em relação a uniformidade de fluxo, nos ensaios experimentais verificou-se o aumento desse parâmetro com o aumento das vazões de teste, porém para as simulações o comportamento obtido foi oposto. Assim, conclui-se que é necessário refinar as condições de contorno das simulações para que se obtenha resultados mais próximos dos experimentais. É preciso também aprimorar o design e desenvolver novas geometrias do distribuidor e realizar novos ensaios experimentais para que se observe um padrão de comportamento dos distribuidores em relação a uniformidade de fluxo.

6. REFERÊNCIAS

- BILLO, R. E.; OLIVER, C. R.; CHAROENWAT, R.; DENNIS, B. H.; WILSON, P. A.; PRIEST, J. W.; BEARDSLEY, H. A cellular manufacturing process for a full-scale biodiesel microreactor. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 37, p. 409-416, 2015.
- HASEBE, S. Design and operation of microchemical plants bridging the gap between nano, micro and macro technologies. *Computers and Chemical Engineering*, v. 29, p. 57-64, 2004.
- HASSAN, J. M.; MOHAMMED, W. S.; MOHAMED, T. A.; ALAWEE, W. H. CFD simulation for manifold with tapered longitudinal section. *International journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 4, p. 28-35, 2014.
- LIU, H.; LI, P.; LEW, J. V. CFD study on flow distribution uniformity in fuel distributors having multiple structural bifurcations of flow channels. *International journal of hydrogen energy*, v. 35, p. 9186-9198, 2010.
- SU, Y.; KUIJPERS, K.; HESSEL, V.; NOËL, T. A convenient numbering-up strategy for the scale-up of gas-liquid photoredox catalysis in flow. *Reaction Chemistry & Engineering*, v. 1, p. 73-81, 2016.
- WANG, L.; KONG, X.; QI, Y. Optimal design for split-and-recombine-type flow distributors of microreactors based on blockage detection. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 24, p. 897-903, 2016.
- ZHANG, L.; GAO, G.; SUI, H.; LI, H.; LI, X. CFD simulation and experimental validation of fluid flow in pre-distributor. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 19, p. 815-820, 2011.