

## INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO SOBRE FEIXES DE TUBOS COM A PRESENÇA DE CHICANAS

D. N. VENTURI<sup>1\*</sup>, W. P. MARTIGNONI<sup>2</sup>, D. NORILER<sup>1</sup>, H. F. MEIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Regional de Blumenau, Departamento de Engenharia Química

<sup>2</sup>PETROBRAS, AB-RE/TR/OT

\*e-mail: diegoventuri@gmail.com

### RESUMO

Estudos experimentais do escoamento bifásico em feixes de tubos têm sido reportados na literatura, porém, geralmente com o uso de geometrias simplificadas, que não representam fielmente os equipamentos em que são utilizados. Neste trabalho, uma investigação exploratória é realizada, utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional, avaliando este escoamento em uma geometria mais complexa, com o efeito da configuração de chicanas. Para a simulação numérica, utilizou-se água e ar para a representação das fases líquida e gasosa. Ainda, a abordagem VOF foi utilizada, a qual permite a captura da interface entre os fluidos, que é fundamental na predição deste escoamento. A troca da configuração das chicanas permitiu dois efeitos benéficos, a redução da oscilação da pressão, e a redução da fração volumétrica média do líquido na saída. A simulação permitiu, também, a visualização do mapa de fração volumétrica dentro do equipamento, e das linhas de corrente dos fluidos na carcaça do equipamento, mostrando as regiões de acúmulo de líquido, de aceleração e de recirculação.

### 1 INTRODUÇÃO

Feixes de tubos são aparatos presentes principalmente em equipamentos com função de troca térmica, por exemplo, trocadores de calor do tipo casco e tubo. Porém, enquanto o escoamento monofásico nestes equipamentos já é bastante discutido na literatura (ASLAM BHUTTA et al., 2012; MOHANRAJ; JAYARAJ; MURALEEDHARAN, 2012), para o escoamento bifásico isto é menos comum, sendo significativamente mais complexo.

Um exemplo comum deste escoamento é no processo de remoção de enxofre do diesel, o qual é realizado por reações de hidrogenação com a presença de catalisadores sólidos. Esta etapa de purificação requer alta temperatura (200 a 425°C) e pressão (150 a 250 psi) (CASTRO DANTAS et al., 2014), e uma série de trocadores de calor é usada para

integração energética entre o efluente dos reatores e a alimentação. Estes trocadores de calor operam com uma mistura bifásica de diesel e hidrogênio para evitar a decomposição do diesel pelo calor, e os efeitos de evaporação e condensação são mínimos. Problemas conhecidos da operação destes equipamentos incluem grandes oscilações de pressão, que afetam a produtividade, e a geração de *slugs* nas tubulações subsequentes.

A investigação dos padrões de escoamento bifásico sobre feixes de tubos é, portanto, importante, mas realizada geralmente de forma simplificada, com aparatos experimentais onde o escoamento cruza com o feixe em apenas uma ou outra direção, às vezes ainda sem a presença de chicanas (RIBATSKII; THOME, 2005). Assim, estes estudos com condições idealizadas diferem da realidade em alguns quesitos, como efeitos de se-

paração influenciados pela troca de direção do escoamento induzida pelas chicanas, e *bypass* do escoamento a redor do feixe de tubos (HEWITT, 2008).

Alguns autores já realizaram estudos experimentais para a caracterização dos regimes em escoamentos verticais (ULBRICH; MEWES, 1994; XU; TSO; TOU, 1998; NOGHREHKAR; KAWAJI; CHAN, 1999), e em escoamentos horizontais (GRANT; CHISHOLM, 1979) sobre feixes de tubos. Porém a falta de similaridade com equipamentos reais resulta em falhas nesta predição, quando usados estes mapas. Ainda, simulações numéricas tridimensionais via fluidodinâmica computacional (CFD) ainda não foram reportadas na literatura para este tipo de sistema, as quais podem trazer mais conhecimento para o estudo deste tema.

Deve-se notar que para a correta simulação destes escoamentos, os fenômenos de interface entre os fluidos são de extrema importância, e, portanto, uma abordagem numérica que possa capturar corretamente a interface entre os fluidos é necessária. Dentre os métodos de captura de interface mais utilizados atualmente, pode-se citar os métodos: avanço de fronteira (*front-tracking*), conjunto de nível (*level-set*), marcador de célula (MAC) e volume de fluido (VOF). Neste trabalho, foi utilizado o método VOF proposto por Hirt e Nichols (1981), no qual uma equação de conservação diferencial para um escalar representando a fração volumétrica é resolvida em cada célula computacional. Este escalar assume valor unitário para indicar a presença de uma fase e nulo para a outra.

Desta forma, o objetivo deste artigo é conduzir uma investigação numérica exploratória do escoamento bifásico em um feixe de tubos que possui todas as características principais de um equipamento industrial, como a combinação da direção horizontal e vertical do escoamento, e o formato das chicanas. Ainda, é avaliada a influência da disposição destas chicanas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como este trabalho trata de uma investigação apenas via simulações numéricas, os tópicos decorrentes do método dos volumes finitos, necessário para a condução da análise por CFD, são descritos resumidamente a seguir.

### 2.1 Modelagem Matemática

O modelo matemático utilizado para a solução numérica considera um sistema euleriano tridimensional e transiente com duas fases presentes. Apenas as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento são resolvidas, considerando as massas específicas ( $\rho$ ) e as viscosidades ( $\mu$ ) de cada fluido constantes. Para modelagem da turbulência, as equações de conservação são utilizadas na forma da média de Reynolds seguida da adoção da hipótese da viscosidade turbulenta, onde esta é predita pelo modelo *k-ε* padrão.

Ainda, a Equação 1 deve ser resolvida para a atualização da fração volumétrica no domínio, utilizando o campo de velocidades ( $\mathbf{v}$ ) do fluido presente na célula:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}\alpha) = 0 \quad (1)$$

Como na abordagem VOF apenas uma equação de conservação de cada variável é resolvida para ambas as fases, as propriedades físicas são ponderadas linearmente pela fração volumétrica, conforme as Equações 2 e 3:

$$\rho = (1 - \alpha_2)\rho_1 + \alpha_2\rho_2 \quad (2)$$

$$\mu = (1 - \alpha_2)\mu_1 + \alpha_2\mu_2 \quad (3)$$

Em todas as simulações deste trabalho os esquemas de interpolação são de segunda ordem para a quantidade de movimento e de primeira ordem para as variáveis da turbulência, o esquema de reconstrução geométrica é

utilizado para a fração volumétrica (RIDER; KOTHE, 1998), a tensão superficial foi modelada de acordo com Brackbill, Kothe e Zemach (1992), e o passo de tempo utilizado foi de  $10^{-4}$  s.

## 2.2 Incerteza Numérica

Para quantificação da incerteza relacionada ao tamanho da malha numérica, foi aplicada a metodologia do índice de convergência da malha (GCI) proposta por Roache (1994). Esta análise foi conduzida de acordo com as etapas sugeridas por Celik et al. (2008) regressando o parâmetro de ordem aparente  $p$  para um caso teste a partir da geração de três malhas numéricas. Em seguida, este parâmetro foi utilizado na análise de GCI de um caso principal deste trabalho, utilizando somente duas malhas numéricas.

## 2.2 Metodologia Numérica

Primeiramente, um caso de teste é simulado para comparação com dados experimentais da literatura retirados em um escoamento vertical em duto, utilizando ar e óleo de silicone como fluidos de trabalho. Assim, pode-se realizar a validação do modelo utilizado, e, também, retirar informações sobre espaçamento da malha numérica e do parâmetro  $p$ , para que a análise de GCI seja conduzida nas simulações do feixe de tubos. Em seguida, dois casos são propostos para a simulação do escoamento sobre um feixe de tubos, com variações na disposição das chicanas. Água e ar são utilizados para representar as fases líquida e gasosa, respectivamente, sendo a vazão do líquido igual a 4,5 kg/s e do gás igual a 0,0696 kg/s.

As duas geometrias utilizadas no estudo estão apresentadas na Figura 1, com a diferença entre elas sendo principalmente na disposição das chicanas. Ambas são derivadas de trocadores de calor casco e tubo industriais que operam no hidrotreatamento do diesel, porém em escala reduzida. O formato retangular foi adotado para futuros estudos de vali-

dação com uma unidade experimental, o que facilita medidas ópticas como PIV (velocimetria por imagem de partícula), LDA (anemometria por laser Doppler) e PDA (análise dinâmica de partículas).

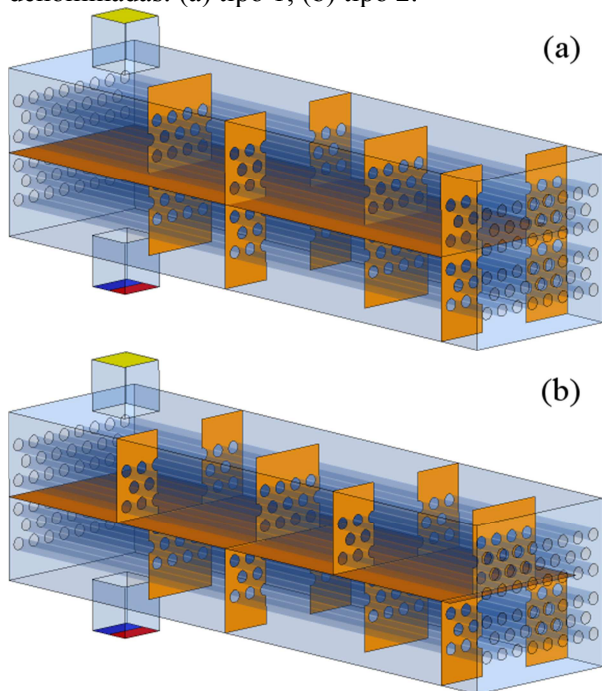
O feixe contém 23 tubos de 24,2 mm de diâmetro em cada passe, dispostos em arranjo triangular com 40 mm de espaçamento entre centros. O comprimento total da carcaça é de 1300 mm, o espelho é formado por um quadrado com 330 mm de lado, e a chicana que divide os dois passes tem 1200 mm de comprimento. As chicanas posicionadas no centro deixam 50% de passagem livre em relação à área de um passe, e as chicanas posicionadas nas laterais deixam 35% de passagem livre. Nestes equipamentos é comum a entrada dos fluidos pela base, fazendo dois passes na carcaça, e saindo para uma longa tubulação. Assim, as faces azul e vermelha na base das geometrias (Figura 1), representam a entrada do gás e do líquido, respectivamente, e a face amarela, no topo, representa uma saída com pressão relativa prescrita.

Para todas as simulações foram utilizados 16 processadores AMD Opteron™ Processor 6366 HE 1.8 GHz. No caso das simulações para a validação do modelo, isto representou cerca de 15 dias de processamento para a malha esparsa e 60 dias para a malha refinada. Para as simulações do escoamento sobre o feixe de tubos, representou cerca de 30 dias de processamento para cada geometria.

## 3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Embora a abordagem VOF já venha sendo aplicada com sucesso em vários escoamentos de engenharia, um teste de comparação com dados disponíveis na literatura foi conduzido. O estudo de Abdulkadir et al. (2013) foi escolhido para este fim, uma vez que possui dados experimentais adquiridos por tomografia capacitiva elétrica (ECT) e sensoramento por malha de eletrodos

**Figura 1** – Geometrias utilizadas neste trabalho, denominadas: (a) tipo 1; (b) tipo 2.



(WMS). O aparato experimental utilizado pelos autores consiste em um duto circular de 67 mm de diâmetro interno e 6000 mm de comprimento, na posição vertical, onde o escoamento de ar e óleo de silicone é no sentido ascendente. Medidas de fração volumétrica do gás foram coletadas em três posições: a 4400 e 4489 mm da base, medida com ECT; a 4920 mm da base, medida com WMS.

Note-se que na condição escolhida para validação ocorre o regime *slug*, o que é interessante do ponto de vista da validação, pois é um regime que apresenta oscilações de pressão similares às do regime intermitente no escoamento sobre feixes de tubos. Também, apresenta regiões de segregação total das fases e regiões de altos gradientes de velocidade, testando bem o modelo.

### 3.1 Análise de Malha

Três malhas numéricas foram confeccionadas para a análise de GCI nas simulações do duto vertical, uma esparsa com 165.880 células, uma intermediária com 452.000 células,

e uma refinada com 1.198.400 células. A razão de refinamento é, então, de aproximadamente 1,4 entre os pares de malhas.

A análise foi realizada sobre o perfil da função densidade de probabilidade (PDF) aplicada sobre o perfil de fração volumétrica nos três planos. A PDF representa a probabilidade de que certo valor de fração volumétrica encontre-se em certa faixa. Estas faixas de valores têm amplitude de 0,01, resultando em 100 caixas centradas nos valores de 0,005; 0,0015; ...; 0,995; então o número de pontos em cada caixa é dividido pelo número de pontos totais, indicando os valores de fração volumétrica dominantes no sistema.

A Figura 2 compara os perfis de PDF da fração volumétrica do gás obtida pelos experimentos físicos e simulação numérica no plano mais distante da base. O resultado numérico apresentado é o obtido com a malha refinada, onde as barras verticais representam a incerteza estimada pelo método GCI. Nota-se que neste nível de discretização da malha os resultados representam bem a característica da PDF para o regime de escoamento encontrado na prática, mesmo que os dados experimentais encontrem-se fora da faixa de incerteza dos resultados numéricos. A incerteza média é da ordem de 30%, o que indica uma dependência forte da abordagem VOF em relação ao tamanho da malha numérica, ratificando a necessidade de se conduzir uma análise de GCI nas simulações para o feixe de tubos.

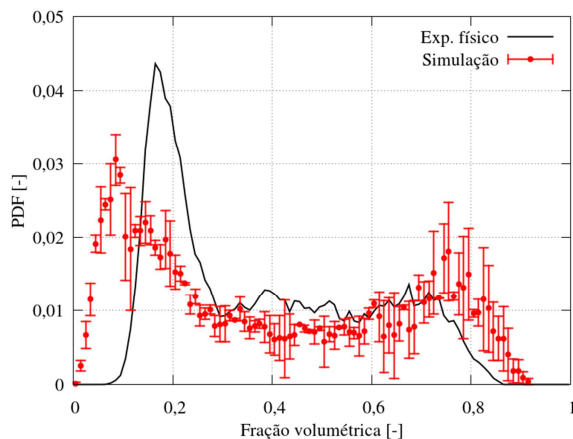
Ainda, o parâmetro de ordem aparente média do método ( $p$ ) foi calculado como 2,5. Isto indica que assumir  $p = 2,0$  em uma análise de GCI com apenas duas malhas como indica Roache (1994), leva a uma estimativa conservadora e coerente da incerteza numérica.

### 3.1 Comparação dos Resultados

A Figura 3 apresenta a comparação entre os dados experimentais de Abdulkadir et al. (2013) e os dados obtidos por simulação numérica com a malha refinada. A fração vo-



**Figura 2** – Comparação da PDF da fração volumétrica do gás obtida por medição experimental e simulação numérica no plano mais distante da base.

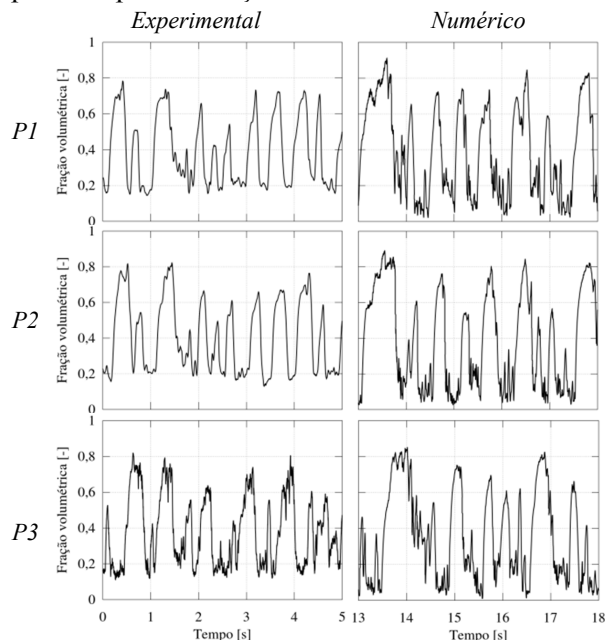


lumétrica do gás é mostrada nos três planos de medição. Pode-se verificar que os comportamentos são similares, tendo as mesmas características de forma e período, porém apresentando amplitudes diferentes. Uma vez que o modelo é capaz de prever bem a formação dos *slugs* visualizados nos experimentos, caracterizados pela curva característica da PDF na Figura 2 e pelos picos de fração volumétrica na Figura 3, considera-se este modelo validado para utilização nas simulações do escoamento bifásico sobre o feixe de tubos.

#### 4 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SOBRE O FEIXE DE TUBOS

Cinco variáveis foram selecionadas para evidenciar a dinâmica do escoamento em cada caso, sendo elas: fração do volume total ocupado pela água; perda de pressão; vazão mássica de ar na saída; vazão mássica de água na saída; e fração volumétrica média de água na saída. Todas estas variáveis foram coletadas depois que uma variável de controle, neste caso o volume de água dentro do equipamento, alcançou um estado onde seu valor oscilava em torno de uma média bem definida (regime quasi-estacionário). Deste ponto em diante, todos os dados foram coletados duran-

**Figura 3** – Comparação da fração volumétrica do gás obtida pelas medições experimentais nos três planos e por simulação numérica.



te aproximadamente 10 segundos em uma taxa de amostragem de 10 Hz. Em seguida, a média e o desvio padrão de cada série foram calculados, como forma de comparação do valor base e sua flutuação, respectivamente, entre os casos.

##### 4.1 Análise de Malha

Duas malhas foram confeccionadas para a análise de GCI, uma refinada com 600 mil células, e outra esparsa de modo a gerar uma razão de refinamento de 1,45 entre elas. Como sugerido pelo método para duas malhas, a ordem aparente foi fixada em 2,0 com um fator de segurança de 3,0. Esta análise foi conduzida sobre três das cinco variáveis de resposta (média e desvio padrão) obtidas na simulação da segunda geometria, e está apresentada na Tabela 1. A análise sobre as vazões mássicas na saída não tem sentido, pois seu valor médio deve ser igual.

Os resultados da análise evidenciam que as incertezas estão em níveis aceitáveis, mostrando que a malha numérica refinada é adequada para este estudo. Os valores de incerte-

**Tabela 1** – Análise de GCI para a simulação da segunda geometria utilizando a malha refinada

Resposta	Incerteza no valor médio [%]	Incerteza no desvio padrão [%]
A	0,3	3,5
B	7,2	16,7
C	5,1	44,5

A – Fração do volume total ocupado pela água; B – Perda de pressão; C – Fração volumétrica média do líquido na saída.

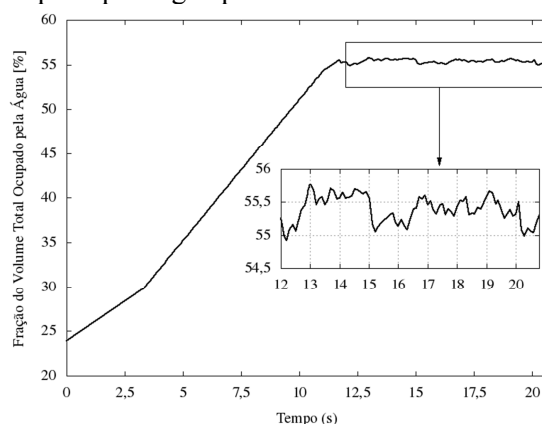
za nas médias das propriedades avaliadas são sempre menores que 10%, confirmando a malha refinada como adequada. Já o desvio padrão apresenta maior sensibilidade ao espaçamento da malha, mas ainda apresenta níveis aceitáveis, exceto para a fração volumétrica.

#### 4.2 Resultados e Discussão

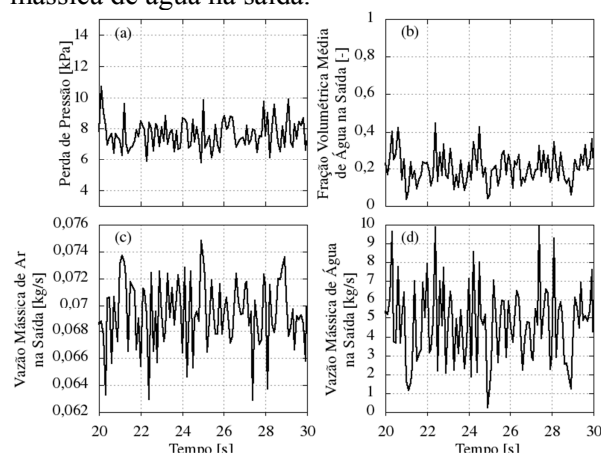
A Figura 4 apresenta um exemplo da dinâmica da variável utilizada para definir o estado quasi-estacionário, pela simulação numérica da Geometria 1. Nota-se que é necessário um tempo para o enchimento do domínio com a fase líquida, após o qual a variável passa a oscilar em torno de um valor médio, e as variáveis de resposta começam a ser adquiridas.

A Figura 5 apresenta as séries temporais das demais variáveis de resposta tomadas após o tempo de estabilização do volume de líquido no equipamento, para o caso da simulação da Geometria 2. Pode-se notar que todas as variáveis são bem caracterizadas por um valor médio mais algumas flutuações. As séries de perda de pressão e vazão mássica de ar na saída são as mais estáveis, com as flutuações representando apenas uma fração do valor médio. Já os sinais de fração volumétrica média na saída e vazão mássica de água na saída apresentam flutuações muito intensas, que podem representar o dobro do valor base nos picos, e quase atingem valores nulos em alguns momentos, o que explica porque o volume de líquido no equipamento não é constante. O mesmo comportamento é verificado nos dois casos simulados, com algumas

**Figura 4** – Fração do volume total do domínio ocupado pela água para o caso da Geometria 1.



**Figura 5** – Séries temporais das variáveis de resposta para a simulação da Geometria 2: (a) perda de pressão; (b) fração volumétrica de água na saída; (c) vazão mássica de ar na saída; (d) vazão mássica de água na saída.



diferenças na amplitude da oscilação do sinal, por isso a comparação é realizada com os valores médios e desvio padrão de cada série.

Na Tabela 2 está apresentada a matriz de correlações entre as séries das variáveis de respostas, para a simulação da Geometria 2. Pode-se verificar que as vazões mássicas de ar e água têm correlação de -1,0, indicando um comportamento equivalente e inverso entre elas, ou seja, um pico em um dos sinais acarretará em um vale de proporção equivalente no outro. Também a fração volumétrica média na saída mostra uma dependência estatisticamente significativa nas vazões, caracterizada

**Tabela 2** – Matriz de correlação entre as séries temporais obtidas pela simulação numérica da Geometria 2.

	A	B	C	D	E
A	1	0,13	-0,06	0,06	-0,07
B	0,13	1	-0,27	0,27	0,21
C	-0,06	-0,27	1	-1,00	-0,80
D	0,06	0,27	-1,00	1	0,80
E	-0,07	0,21	-0,80	0,80	1

A – Fração do volume total ocupado pela água; B – Perda de pressão; C – Vazão mássica de ar na saída; D – Vazão mássica de água na saída; E – Fração volumétrica média do líquido na saída.

por uma correlação de 0,80. Já o volume total ocupado pela água e a perda de pressão não têm seu comportamento diretamente associado ao comportamento das demais variáveis. Estas mesmas características foram verificadas na simulação da Geometria 1.

A Tabela 3 apresenta a média e o desvio padrão de cada série temporal em cada caso simulado. Nota-se que a mudança da configuração das chicanas da Geometria 1 para a 2 é responsável por uma redução de 41,7% na fração volumétrica de água na saída, indicando que, no segundo caso, a região da superfície de saída ocupada pela fase líquida é menor, e a formação de agregados de líquidos na tubulação subsequente é menos provável de ocorrer, porque a fase gasosa pode quebrá-los mais facilmente. No entanto, os valores médios da queda de pressão e da fração do volume total ocupado pela água sofreram um ligeiro aumento de 1,5% e 1,4%, respectivamente. A análise da média da vazão mássica de saída da água e do ar não tem validade, uma vez que devem ser próximas aos valores de entrada no estado quasi-

estacionário. Também, a média da fração volumétrica de água na saída teve uma redução de 41,7%, por uma redução substancial de 34,7% nas flutuações da perda de pressão, 28,6% nas flutuações da vazão mássica de ar de saída, e 28,4% nas flutuações da vazão mássica de água de saída. Já para a fração do volume total ocupado pela água e para a fração volumétrica da água na saída, o nível das oscilações foi mantido.

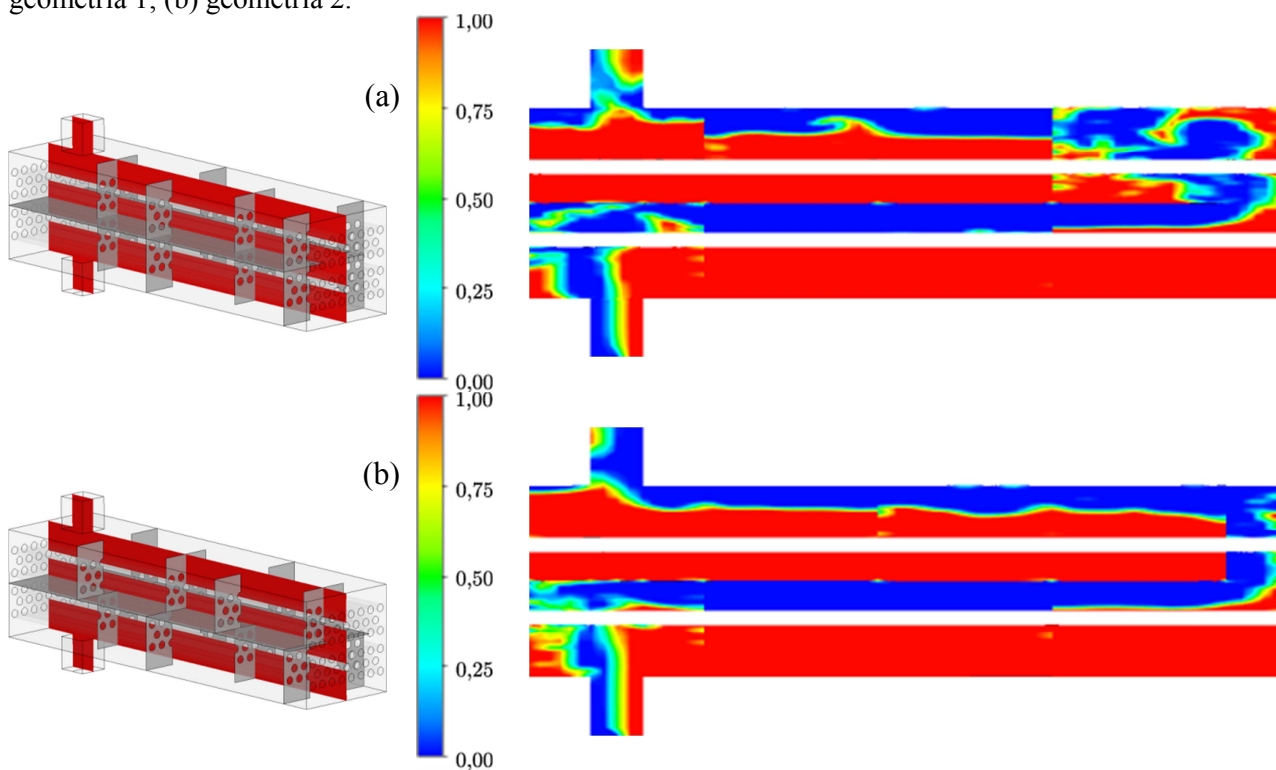
A Figura 6 apresenta um mapa de fração volumétrica do líquido em um plano no centro do feixe de tubos para ambas as geometrias. Nota-se uma distribuição bem estratificada das fases na maior parte da seção horizontal inferior e superior, com destaque na maior dispersão causada pela Geometria 1 na região de passagem dos fluidos para o segundo passe da carcaça, em relação à segunda geometria. Ainda, os dois casos têm uma região de mistura bastante intensa na entrada do equipamento, e uma saída caracterizada por golfadas intermitentes de líquido, como já sugerido pelos gráficos apresentados nas Figuras 4 e 5. Embora esta imagem represente um único passo de tempo, o comportamento é semelhante para todo o tempo de simulação.

A Figura 7 mostra as linhas de corrente da Geometria 1 em dois planos distintos. O primeiro (Figura 7a) é no topo (150 mm acima da chicana longitudinal), portanto mostrando o caminho percorrido pela fase gasosa, e o segundo (Figura 7b), é na base (12,5 mm acima da chicana longitudinal), portanto mostrando o caminho da fase líquida. As cores no mapa representam o componente de velocidade no eixo da direção do escoamento principal. Já a Figura 8 apresenta a mesma situação para a segunda geometria. As duas figuras

**Tabela 3** – Resultados das simulações numéricas (média  $\pm$  desvio padrão).

Geometria	Fração do volume total ocupado pela água [%]	Perda de pressão [kPa]	Vazão mássica de ar na saída [kg/s]	Vazão mássica de água na saída [kg/s]	Fração volumétrica média do líquido na saída [-]
Tipo 1	55,40 $\pm$ 0,21	7,56 $\pm$ 1,44	0,0696 $\pm$ 0,0035	4,46 $\pm$ 2,89	0,36 $\pm$ 0,09
Tipo 2	56,15 $\pm$ 0,20	7,67 $\pm$ 0,94	0,0694 $\pm$ 0,0025	4,68 $\pm$ 2,07	0,21 $\pm$ 0,09

**Figura 6** – Mapa de contorno da fração volumétrica do líquido em um plano no centro do feixe de tubos: (a) geometria 1; (b) geometria 2.



deixam clara uma tendência de formação de regiões de recirculação atrás de cada chicana, e uma zona de aceleração na área livre de escoamento.

Outro comportamento evidenciado pelas linhas de corrente dos fluidos em ambos os casos, é que o escoamento ocorre mais no sentido paralelo aos tubos, do que no sentido cruzado. Entretanto, os mapas de padrões de regime discutidos anteriormente, tratam de sistemas com escoamento no sentido cruzado aos tubos, e, por isso, podem falhar na predição dos regimes de escoamento encontrados neste tipo de equipamento.

#### 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, realizou-se uma investigação exploratória do efeito da configuração de chicanas em escoamentos bifásicos sobre um feixe de tubos, utilizando simulações numéricas com um modelo de captura de interface.

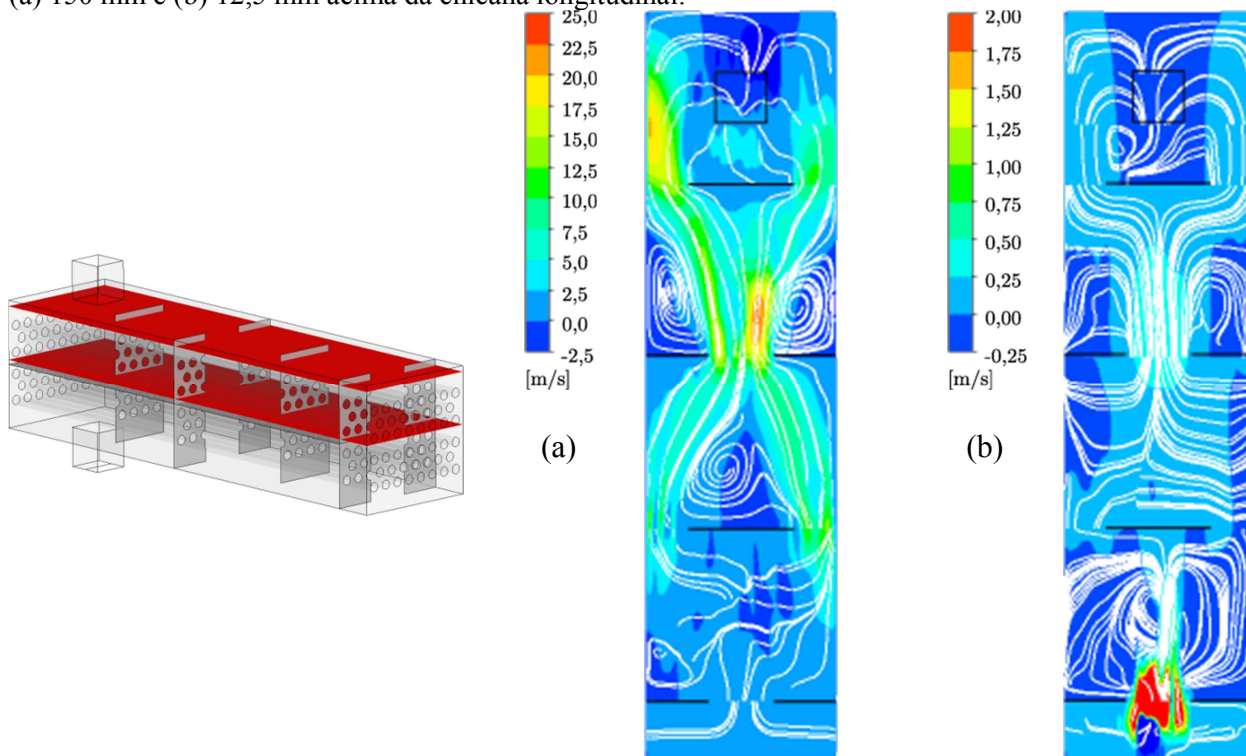
Concluiu-se que o efeito geométrico é muito importante, e pode diminuir o nível de oscilação da pressão e o valor médio da fração volumétrica do líquido na saída. Ambos os fatores trazem benefícios para um equipamento similar, pois o primeiro estabiliza a operação e o segundo reduz a possibilidade de formação de slugs nas tubulações subsequentes.

#### NOMENCLATURA

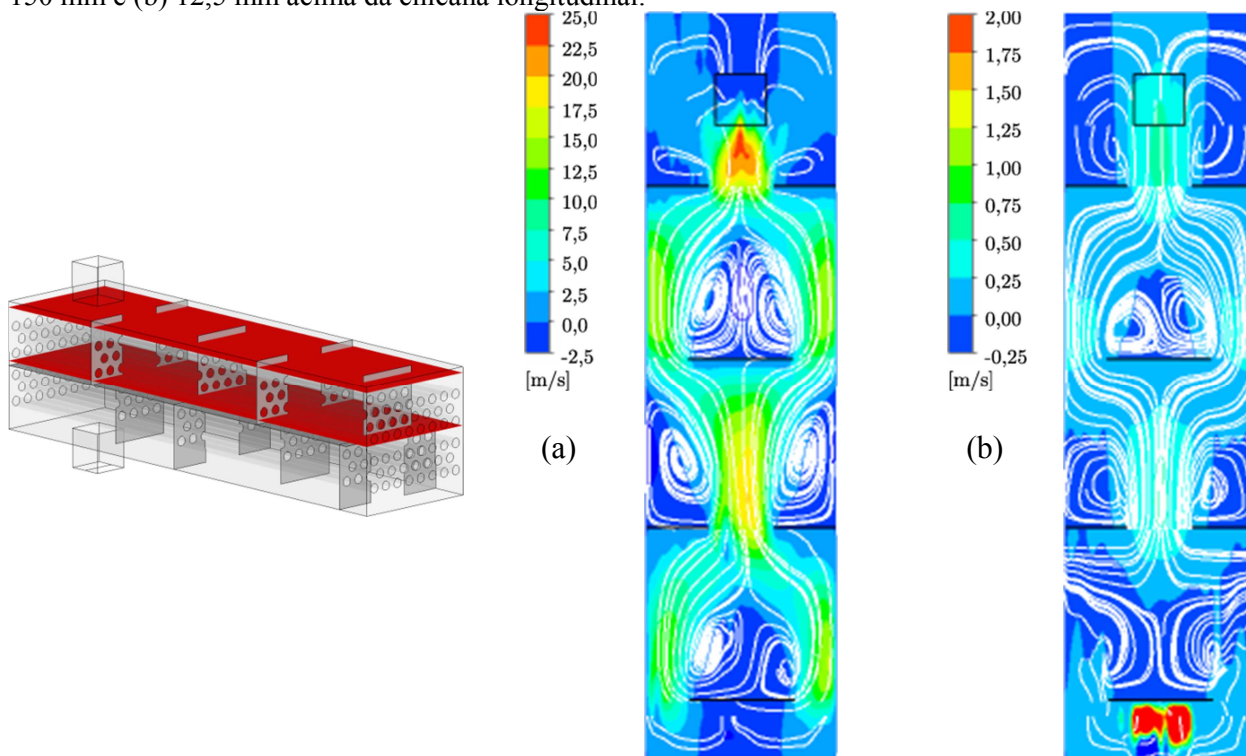
$p$	ordem aparente [-];
$r$	razão de refinamento entre malhas [-];
$\mathbf{v}$	vetor velocidade [m/s];
$\alpha$	fração volumétrica [-];
$\mu$	viscosidade [kg/(m.s)];
$\rho$	massa específica [kg/m <sup>3</sup> ];
1	refere-se à fase 1;
2	refere-se à fase 2;



**Figura 7** – Linhas de corrente e mapas de velocidade para a simulação da primeira geometria, nos planos: (a) 150 mm e (b) 12,5 mm acima da chicana longitudinal.



**Figura 8** – Linhas de corrente e mapas de velocidade para a simulação da segunda geometria, nos planos: (a) 150 mm e (b) 12,5 mm acima da chicana longitudinal.



## REFERÊNCIAS

ABDULKADIR, M.; HERNANDEZ-PEREZ, V.; LO, S.; LOWNDES, I. S.; AZZOPARDI, B. J. Comparison of experimental and Computational Fluid Dynamics (CFD) studies of slug flow in a vertical 90° bend. **The Journal of Computational Multiphase Flows**, v. 5, n. 4, p. 265–282, 2013.

ASLAM BHUTTA, M. M.; HAYAT, N.; BASHIR, M. H.; KHAN, A. R.; AHMAD, K. N.; KHAN, S. CFD applications in various heat exchangers design: a review. **Applied Thermal Engineering**, v. 32, p. 1–12, 2012.

BRACKBILL, J. U.; KOTHE, D. B.; ZEMACH, C. A continuum method for modeling surface tension. **Journal of Computational Physics**, v. 100, p. 335–354, 1992.

CASTRO DANTAS, T. N.; DANTAS NETO, A. A.; MOURA, M. C. P. A.; BARROS NETO, E. L.; FORTE DUARTE, K. R. Study of new alternatives for removal of sulfur from diesel. **Brazilian Journal of Petroleum and Gas**, v. 8, n. 1, p. 15–32, 2014.

CELIK, I. B.; GHIA, U.; ROACHE, P. J.; FREITAS, C. J.; COLEMAN, H.; RAAD, P. E. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, p. 078001, 2008.

GRANT, I. D. R.; CHISHOLM, D. Two-phase flow on the shell-side of a segmentally baffled shell-and-tube heat exchanger. **Journal of Heat Transfer**, v. 101, p. 38–42, 1979.

HEWITT, G. F. Gas-Liquid Flow. In: HEWITT, G. F. (Ed.). **Heat exchanger design handbook online**. 4. ed. New York: Beggell House Inc., 2008.

MOHANRAJ, M.; JAYARAJ, S.; MURA-

LEEDHARAN, C. Applications of artificial neural networks for refrigeration, air-conditioning and heat pump systems - a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 2, p. 1340–1358, 2012.

NOGHREHKAR, G. R.; KAWAJI, M.; CHAN, A. M. C. Investigation of two-phase flow regimes in tube bundles under cross-flow conditions. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 25, n. 5, p. 857–874, 1999.

RIBATSKI, G.; THOME, J. R. Dynamics of two-phase flow across horizontal tube bundles - a review. **Revista de Engenharia Térmica**, v. 4, n. 2, p. 122–131, 2005.

RIDER, W. J.; KOTHE, D. B. Reconstructing volume tracking. **Journal of Computational Physics**, v. 141, p. 112–152, 1998.

ROACHE, P. J. Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies. **Journal of Fluids Engineering**, v. 116, p. 405–413, 1994.

ULBRICH, R.; MEWES, D. Vertical, upward gas-liquid two-phase flow across a tube bundle. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 20, n. 2, p. 249–272, 1994.

XU, G. P.; TSO, C. P.; TOU, K. W. Hydrodynamics of two-phase flow in vertical up and down-flow across a horizontal tube bundle. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 24, n. 8, p. 1317–1342, 1998.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradem o apoio financeiro da PETROBRAS (termo de cooperação 0050.0070334.11.9), e do CNPq (processo 310504/2012-0).