5
Golfadas

Escoamentos multifásicos são caracterizados pela existência de diversos padrões de escoamento. Estes padrões dependem de variáveis operacionais, notadamente da velocidade do líquido e do gás, das propriedades dos fluidos e de alguns aspectos geométricos, tais como diâmetro e ângulo de inclinação da tubulação. Os aspectos hidrodinâmicos do escoamento mudam drasticamente para cada padrão de escoamento.

Considerando que, pela geometria do misturador, o escoamento em sua entrada se dará na horizontal, tem-se as seguintes possibilidades de padrão de escoamento: bolhas dispersas, estratificado liso ou ondulado, bolhas alongadas, golfada (*slug)*, anular ondulado ou simplesmente anular, conforme ilustrado na Figura 5.1.

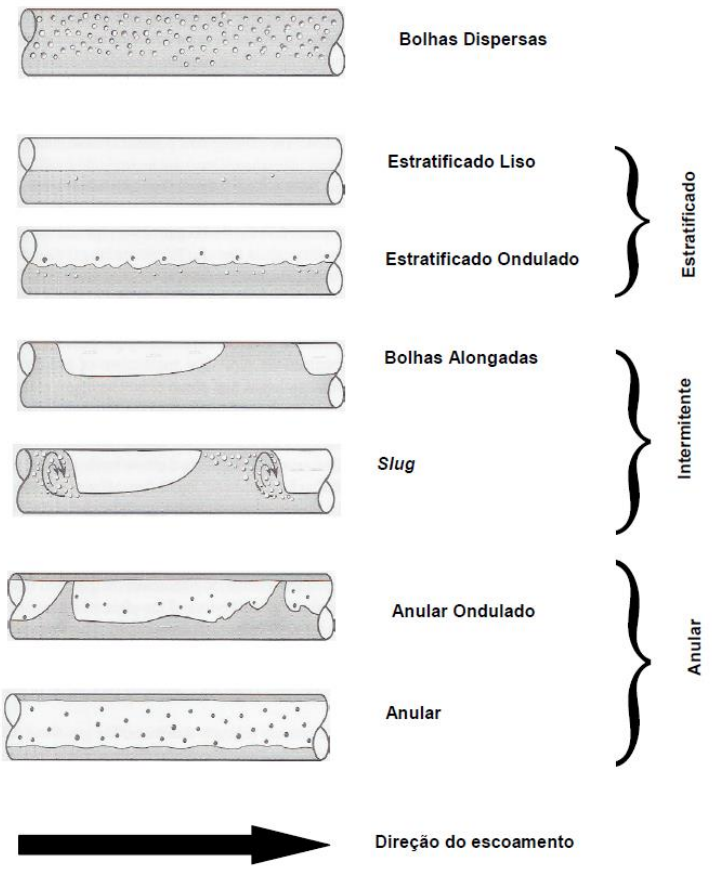

Figura 5.1 - Padrões de escoamento para tubulações horizontais (Fonseca Junior, 2009)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

De acordo com Dukler et al. (1975), escoamentos intermitentes ou em golfadas existem para uma grande variação de vazões e tamanhos moderados de tubulações na configuração de escoamento horizontal. Este tipo de padrão de escoamento é inerentemente instável com grandes variações temporais de vazão mássica, pressão e velocidade em todas as seções transversais da tubulação. Isto ocorre mesmo quando as vazões de gás e líquido entrando no sistema estão estáveis. Como resultado, processos de transferência de calor e massa ficam também instáveis com flutuações na temperatura e na concentração. O que leva a grandes dificuldades e problemas ao projetista destes sistemas.

Como comentado no Capítulo 1, variações grandes, na condição de sucção, podem causar danos aos sistemas de bombeio. Daí advém a vantagem do emprego, em escoamento multifásico, de misturadores logo ao montante da sucção de bombas. Conforme já mencionado, um dos objetivos do presente trabalho é verificar a eficiência do misturador em condicionar o escoamento para um sistema de bombeio, inclusive na presença de intermitências no escoamento.

No experimento realizado pelo CENPES, cujo resultado foi comparado com os resultados das simulações no Capítulo 4, não foram realizadas visualizações do escoamento, que permitissem identificar os padrões de escoamento na entrada do misturador. Devido a este desconhecimento e, para minimizar o esforço computacional envolvido, na verificação do melhor modelo considerou-se, inicialmente, que o escoamento na entrada do misturador se dava através do padrão de bolhas dispersas.

Entretanto, adicionando-se os pares de velocidades superficiais utilizados nas experiências realizadas pelo CENPES (pontos de 1 a 3 na Figura 5.2), no mapa de padrão de fluxo sugerido por Taitel e Dukler (1976), verifica-se que todos estão na região de padrão intermitente (golfada ou bolha alongada).

Uma das dificuldades em se modelar o escoamento intermitente é se conhecer, previamente, o tamanho da unidade de golfada (tamanhos do pistão de líquido e da bolha de gás), além da frequência, ou da velocidade, com que estas unidades trafegam pela tubulação.

Com a indisponibilidade destas informações, buscou-se verificar o comportamento do misturador considerando limites aceitáveis de GVF (*gas void fraction*) fração de vazio ou fração de gás, para algum equipamento de bombeamento já existente, que poderia ser instalado à jusante deste misturador.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

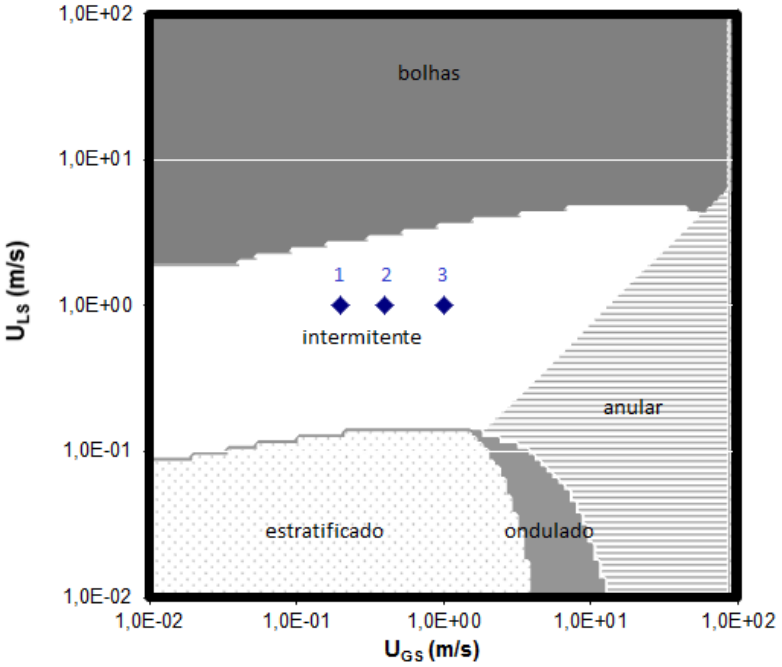

Figura 5.2 – Mapa de padrão de escoamento (Taitel e Dukler, 1976)

Alguns equipamentos, como a bomba multifásica hélico-axial instalada pela Petrobras na Bacia de Campos, têm limite máximo de GVF na ordem de 70% (Kuchpil et al, 2013).

Para representar o regime intermitente, adotou-se a seguinte estratégia:

1. Partindo-se de um caso simulado com bolhas dispersas, já estabilizado, ou seja, já em regime permanente, alterou-se a condição na entrada para 98% de ar com somente bolhas grandes (19 mm), mantendo-se a velocidade constante e igual à velocidade da mistura medida no experimento.
2. Monitorou-se a fração de ar (r_g) na saída do misturador até que este atingisse um limite de 70%.
3. Neste ponto alterou-se a condição de entrada para 98% de água, com a velocidade ainda constante. Esta condição foi mantida até que o comprimento de uma unidade de golfada, ou seja, o comprimento da bolha de gás (L_G) somado ao do pistão de líquido (L_L), ver Figura 5.3, formasse uma unidade de golfada com fração de ar igual ao caso experimental disponível.
4. Retornou-se à condição de 98% de ar na entrada, com velocidade constante e voltou-se ao passo 2, repetindo este procedimento até que os comprimentos das unidades de golfada ficassem bem próximos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

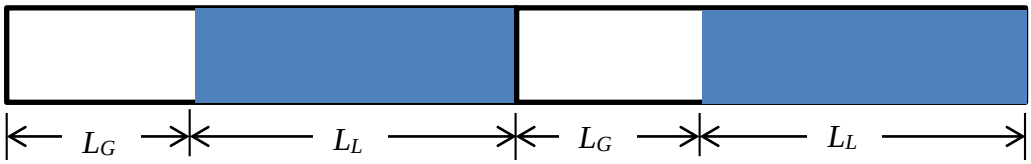

Figura 5.3 – Duas unidades de golfada

A fração de gás (r_g), em uma unidade de golfada pode ser determinada como:

$$r_g = \frac{\forall_G}{\forall_G + \forall_L} \tag{5.1}$$

onde $\forall_G$ e $\forall_L$ representam os volumes de ar e líquido, respectivamente.

Considerou-se que no pistão de líquido havia 2% de ar e na bolha de ar havia 2% de líquido. Desta forma os volumes de gás e líquido na unidade de golfada podem ser determinados como:

$$\begin{aligned} \forall_G &= A_{tubo}\left(0{,}98\, L_G + 0{,}02\, L_L\right) \\ \forall_L &= A_{tubo}\left(0{,}98\, L_L + 0{,}02\, L_G\right) \end{aligned} \tag{5.2}$$

onde A_{tubo} representa a área da seção transversal do tubo de entrada e, é a mesma para as duas fases.

Substituindo-se a Equação 5.2 na Equação 5.1 e rearranjando a equação, tem-se:

$$L_L = L_G\left(\frac{0{,}98 - r_g}{r_g - 0{,}02}\right) \tag{5.3}$$

Os comprimentos do pistão de líquido (L_L) e da bolha de gás (L_G) podem ser definidos como:

$$L_G = U_G\, t_G \quad ; \quad L_L = U_L\, t_L \tag{5.4}$$

onde U_G, t_G e U_L, t_L representam as velocidades e o tempo de deslocamento das fases gás e líquido na entrada do misturador, respectivamente. Considerando que praticamente somente uma fase encontra-se presente na entrada de forma alternada, sua velocidade é considerada igual a velocidade da mistura. Logo, o tempo de deslocamento da fase líquida pode ser obtido a partir do tempo de deslocamento da fase gasosa como:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

$$t_L = t_G \left(\frac{0{,}98 - r_g}{r_g - 0{,}02} \right) \tag{5.5}$$

Assim, com base no tempo em que se manteve a condição de entrada com ar a 98% e na Equação 5.5, pode-se determinar o tempo necessário para se manter a condição de líquido, a 98%, na entrada, de forma a que cada unidade de golfada respeitasse a fração média de ar, medida experimentalmente.

Como o número de simulações necessárias para representar todos os pontos experimentais como golfadas, para todas as geometrias, seria muito elevado, optou-se por analisar, apenas para as geometrias com menor área aberta ao fluxo (configurações 1 e 3), e somente um caso de par de vazões de ar e de água. O caso escolhido foi o intermediário, com velocidade de mistura de 1,4 m/s e fração de ar de 29%.

Em todas as simulações apresentadas a partir deste ponto do trabalho foram mantidas as condições de contorno de acordo com a Tabela 5.1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

Tabela 5.1 – Condições de contorno para a simulação de golfadas

Condição		
Fluidos	Água	Fluido incompressível contínuo
	Ar	Fluido incompressível polidisperso em 10 grupos de bolhas com diâmetros de acordo com a Tabela 4.2
Contorno	Entrada	Perfil de velocidade uniforme = 1.4 m/s
	Saída	Pressão relativa = 0 Pa
Pressão de referência		Pressão atmosférica = 101.325 Pa
Troca térmica		Isotérmico a 25º C
Modelo de turbulência		$\kappa - \omega$ *SST*
Força de arraste		Ishii-Zuber
Força de sustentação		Legendre e Magnaudet

5.1 Configurações 1 e 3

A Figura 5.4 mostra, para a configuração 1, a variação da fração de ar média na saída com a variação na condição de entrada, considerando-se a metodologia

descrita acima. O tempo médio de permanência das bolhas de ar foi de 0,58 segundos, já o tempo médio de permanência das golfadas de água foi de 1,48 segundos, correspondendo a comprimentos de 81,2 cm (*L/D* = 42,7) e 207,2 cm (*L/D* = 109,1) respectivamente. Lembrando que a tubulação de entrada tem 1,9 cm. Observa-se que a fração de ar na saída acompanha com uma defasagem em tempo a condição de entrada, i.e., mesma frequência. Observa-se ainda que o comprimento da onda na saída é maior, mas com menor amplitude.

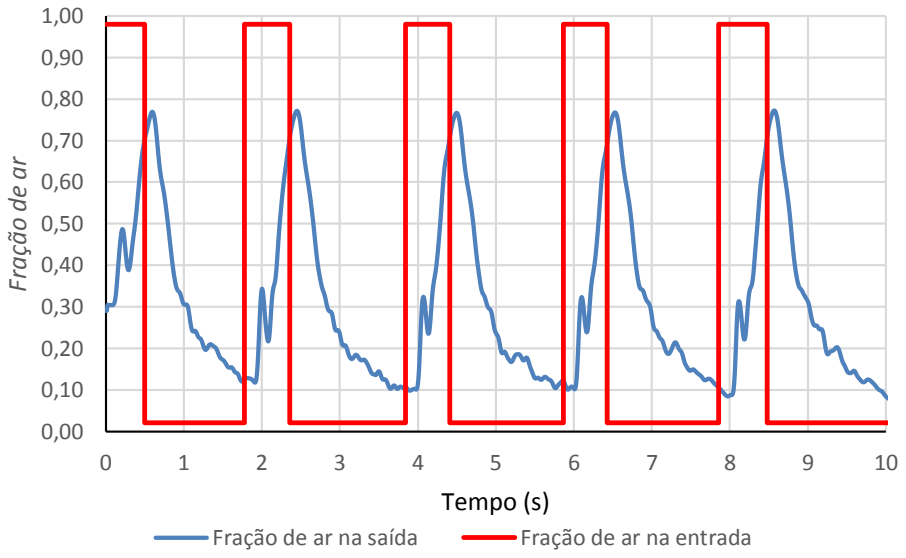

Figura 5.4 – Simulação de golfadas para a configuração 1 e U_m = 1,4m/s

A figura abaixo mostra o comportamento da fração de ar no interior do misturador com a passagem de uma golfada. O tempo escolhido para esta análise foi de 5,87s a 7,89s, por já ser um período onde há estabilidade no tamanho da golfada. No início da bolha de ar (5,87s) é possível perceber que já existe um acúmulo de ar na porção superior do cilindro interno e um acúmulo maior de ar no espaço anular entre os cilindros, acima da primeira fileira de furos. Os demais furos somente estão dando passagem para água. Com a continuação da entrada de ar no misturador percebe-se que a quantidade de ar no interior aumenta, liberando a segunda fileira de furos para a entrada de ar, fazendo com que a fração de ar na saída aumente rapidamente até o início da golfada de líquido (6,44s). A partir daí, o nível de água no misturador rapidamente aumenta, impedindo que o ar entre no cilindro interno pela segunda fileira de furos, reduzindo a fração de ar na saída.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

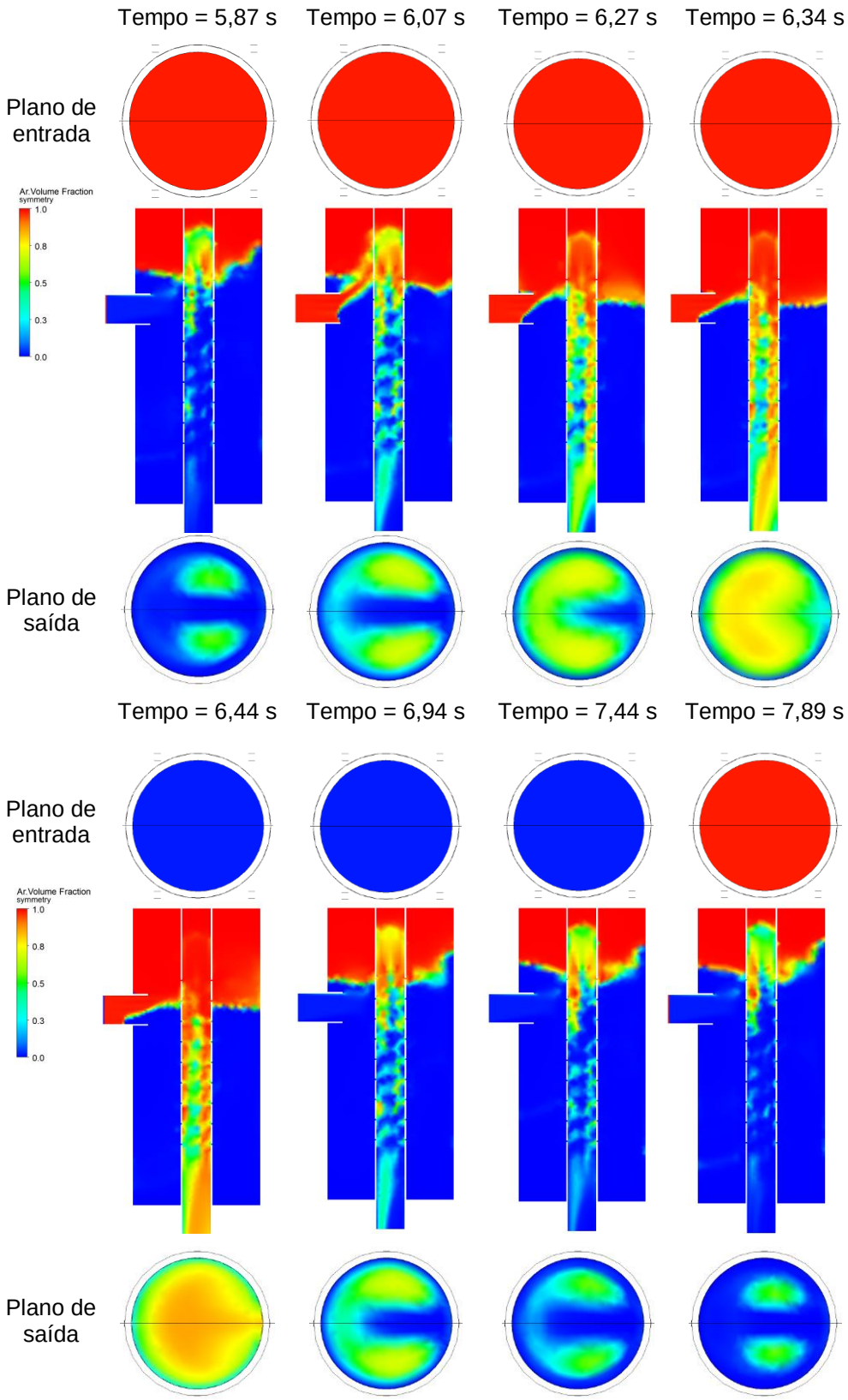

Figura 5.5 – Configuração 1, comportamento da fração volumétrica de ar no interior do misturador com a passagem de uma golfada

A Figura 5.6, mostra o comportamento do diferencial de pressão com a passagem de golfadas pelo misturador. É possível perceber que com o aumento na

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

quantidade de ar no misturador o diferencial de pressão diminui rapidamente. E, com a passagem da golfada de água, o diferencial de pressão volta a crescer, ou seja, o diferencial de pressão acompanha a variação da fração de ar. Isto se deve à variação na quantidade de furos abertos à passagem de água no interior do misturador.

O valor médio do diferencial de pressão no período analisado foi de 1,223 bar, com erro de 0,57% em relação ao valor experimental. Isto é um indicativo de que, provavelmente, durante a experiência o padrão de escoamento era intermitente.

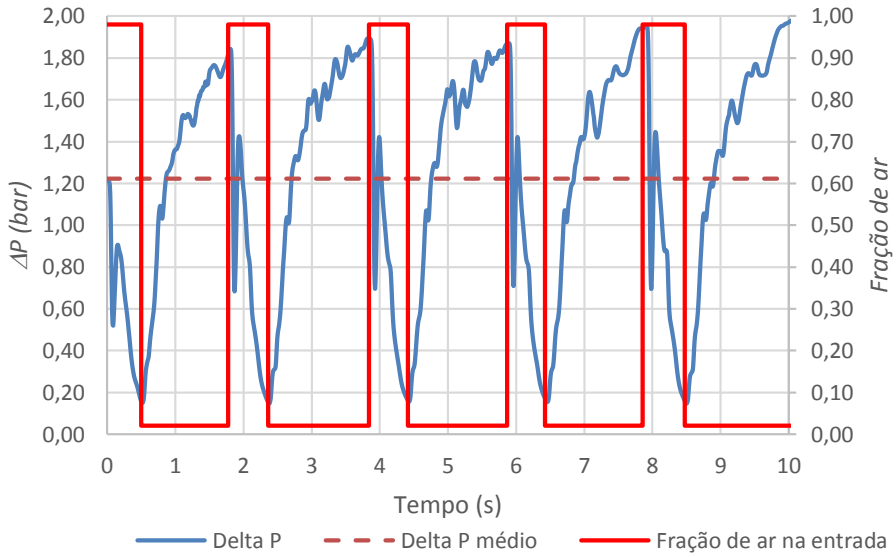

Figura 5.6 – Diferencial de pressão durante a simulação de golfadas para a configuração 1 e U_m = 1,4m/s

A Figura 5.7 apresenta, para a configuração 1, as distribuições dos grupos de bolhas na saída do misturador ao final da passagem de uma bolha de ar. Somente são apresentados os 4 primeiros grupos de bolhas, os demais grupos não foram identificados em nenhum momento na saída do misturador durante as golfadas.

Nesta figura é possível perceber que, mesmo com a fração volumétrica média de ar estando em 70%, não existem bolhas maiores que 5 mm na saída do misturador. Isto demonstra que, mesmo em uma situação extrema, esta configuração conseguiu quebrar as bolhas eficientemente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

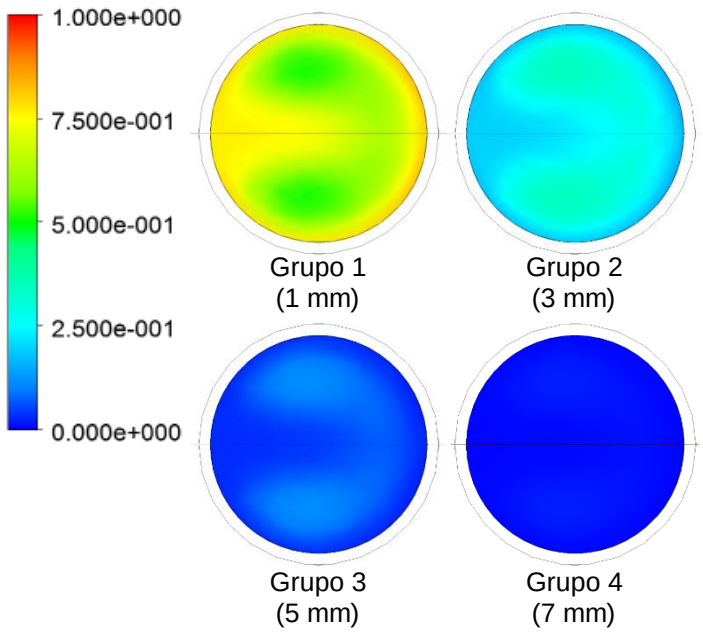

Figura 5.7 – Configuração 1, distribuição dos grupos de bolhas na saída ao final da passagem de uma bolha de ar (tempo = 6,44s)

Este teste indicou que para se garantir que a fração volumétrica média de ar na saída não ultrapasse 70%, a configuração 1 seria capaz de lidar com golfadas com comprimento máximo de L/D maior que 109. De acordo com Dukler e Hubbard, 1975 e Fabre e Liné, 1992, o comprimento médio das golfadas compreende valores entre 15D e 40D. Ou seja, esta configuração seria capaz de suportar golfadas médias esperadas pela literatura.

O mesmo tipo de teste foi realizado utilizando a configuração geométrica 3, na qual os orifícios são maiores, se concentram na parte inferior do duto interno e apresentam a mesma área aberta ao fluxo que a configuração 1.

A Figura 5.8 mostra, para a configuração 3, a variação da fração de ar na saída com a variação na condição de entrada, considerando-se a metodologia de alteração na condição de entrada quando a fração de ar na saída atinja 70%. As bolhas de ar ficaram com tempo médio de 0,56 segundos, já as golfadas de água ficaram com 1,43 segundos, ou seja, com comprimentos de 78,4 cm (*L/D* = 41,3) e 200,2 cm (*L/D* = 105,4) respectivamente.

Comparando-se as Figuras 5.4 e 5.8, verifica-se que as frequências e os comprimentos das golfadas são praticamente os mesmos, porém na configuração 3 a fração máxima de ar na saída foi menor que na configuração 1, que chegou próximo a 80%. A indicação é que a configuração 3 foi capaz de lidar melhor com estas golfadas simuladas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

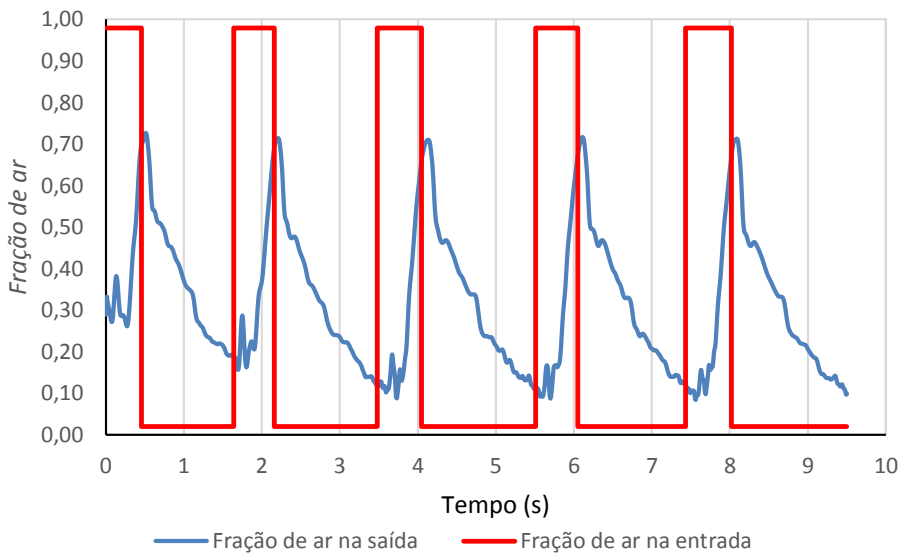

Figura 5.8 – Simulação de golfadas para a configuração 3 e U_m = 1,4m/s

As figuras abaixo mostram o comportamento da fração de ar no interior do misturador com a passagem de uma golfada. O tempo escolhido para esta análise foi de 5,51s a 7,49s, por já ser um período onde há estabilidade no tamanho da golfada. Em todas as figuras abaixo, à esquerda é mostrado o plano de simetria, no canto superior direito é o plano de entrada e no canto inferior direito é apresentado o plano de saída.

No início da bolha de ar, tempo igual a 5,51s, percebe-se que no interior do misturador ainda existe um acúmulo de ar na porção superior do espaço anular entre os cilindros interno e externo, porém não há tanto ar presente no cilindro interno quanto o percebido na configuração 1. No furo superior praticamente já não há mais influxo de ar e, os demais furos só dão passagem para água. Gradativamente, com a continuação da entrada de ar, o acúmulo de ar no interior do misturador aumenta, fazendo aumentar também a fração de ar na saída do misturador porém, diferentemente do que aconteceu na configuração 1, os demais furos não chegam a dar passagem para ar em nenhum momento até o final da passagem da bolha de ar, tempo igual a 6,08s. Com o início da golfada de água, a fração volumétrica de ar no interior do misturador vai decrescendo rapidamente, assim como na saída, até o início de uma nova bolha de ar.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

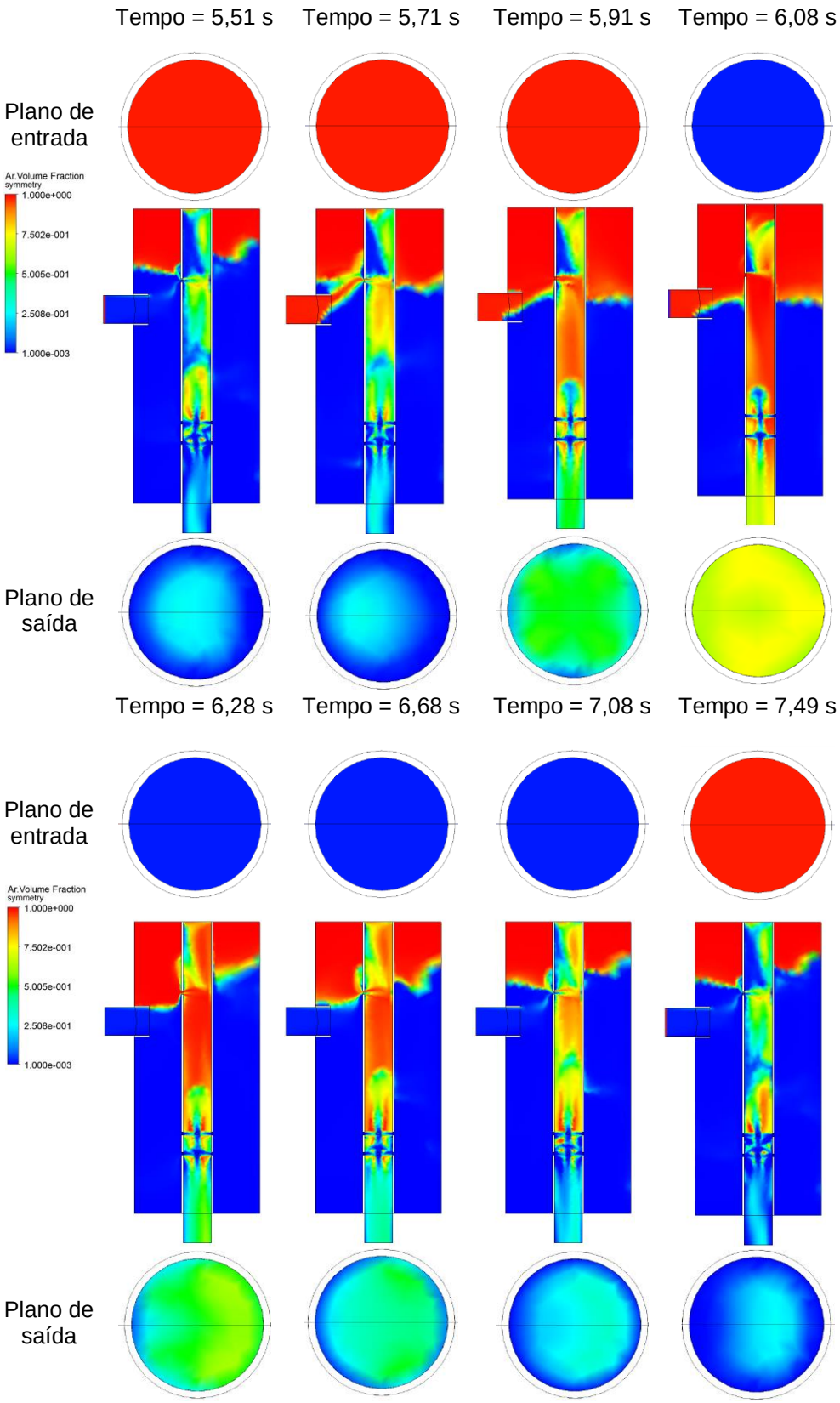

Figura 5.9 – Configuração 3, comportamento da fração volumétrica de ar no interior do misturador com a passagem de uma golfada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

A Figura 5.10, mostra o comportamento do diferencial de pressão com a passagem de golfadas pelo misturador. O valor médio do diferencial de pressão no período analisado foi de 0,906 bar, ou seja, uma diferença de –10,6% em relação à simulação realizada com bolhas polidispersas, porém o valor se aproximou mais do medido experimentalmente, que foi 0,78 bar. Indicando que, assim como observado na configuração 1, provavelmente no experimento o padrão de escoamento na entrada do misturador era intermitente.

Outro ponto interessante é que além de um diferencial de pressão médio menor que o da configuração 1, a configuração 3 apresentou valores máximos menores. As variações no diferencial de pressão foram mais suaves e, similarmente ao que foi verificado na configuração 1, a frequência de variação no diferencial de pressão também acompanhou a condição de entrada.

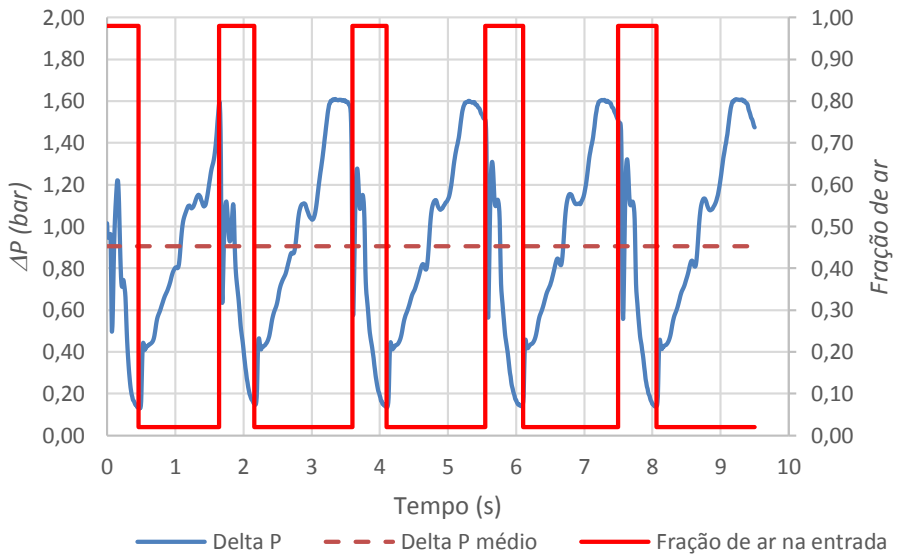

Figura 5.10 – Diferencial de pressão durante a simulação de golfadas para a configuração 3 e U_m = 1,4m/s

Na Figura 5.11 estão representados, para a configuração 3, as distribuições dos grupos de bolhas na saída do misturador ao final da passagem de uma bolha de ar. Da mesma forma que ocorreu para a configuração 1, somente são apresentados os 4 primeiros grupos de bolhas, já que os demais grupos não foram identificados em nenhum momento na saída do misturador durante as golfadas.

Pode-se verificar que, assim como visto para a configuração 1, mesmo com a fração volumétrica média de ar estando em 70%, não existem bolhas maiores que 5 mm na saída do misturador. Porém, neste caso as bolhas estão mais

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

homogeneamente distribuídas e há uma maior presença de bolhas dos grupos 2 e 3. Ou seja, neste caso extremo, esta configuração conseguiu quebrar as bolhas mas gerou bolhas um pouco maiores que a configuração 1.

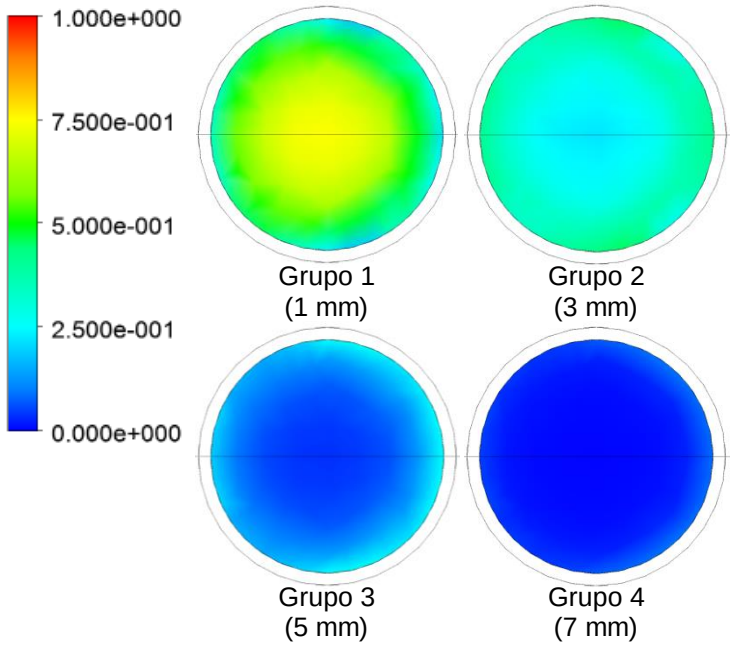

Figura 5.11 – Configuração 3, distribuição dos grupos de bolhas na saída ao final da passagem de uma bolha de ar (tempo = 6,08s)

A configuração 3 se mostrou mais eficiente que a configuração 1, pois apresentou, para praticamente as mesmas golfadas, diferenciais de pressão médios e máximos menores que a configuração 1, além de ter um comportamento mais suave nas variações de pressão. Outro ponto a favor desta, foi garantir uma fração volumétrica de ar mais homogênea na saída.

Um ponto que deve ser considerado é que a configuração 3, por ter furos maiores, pode gerar bolhas maiores na saída. Este efeito pode não ter sido capturado por esta simulação pois, como já comentado no capítulo 4, neste modelo não se considerou grupos de bolhas com diâmetro próximos a 2 mm, igual ao furo desta configuração.

5.1.1
Configurações 1 e 3 com 98% de gás na entrada do misturador

A seguir um novo teste foi realizado, visando verificar o comportamento do misturador em um caso extremo de operação, o qual corresponde a uma situação

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

com fração constante de 98% de ar na entrada. O objetivo foi verificar o tempo de sobrevida que seria possível manter um sistema de bombeamento, instalado à jusante do misturador, operando sem risco de dano. No início, ou seja, no tempo igual a zero, se está com a fração de ar estabilizada em 29%, na entrada e na saída, e Um = 1,4 m/s, a partir daí a fração de ar na entrada é instantaneamente elevada para 98% com U_m mantida constante.

A Figura 5.12 ilustra a variação com o tempo da fração de ar na entrada e na saída do misturador correspondendo a configuração 1 e a Figura 5.13 é referente a configuração 3. Observa-se que em ambos os casos que, em pouco menos de 0,5 segundos, a fração de ar na saída já atinge 70%. No entanto, a fração de ar na saída chega em 90% em 1,76 segundos com a configuração 1, enquanto que com a configuração 3, após ultrapassar os 70% a fração de ar na saída, esta fica oscilando abaixo de 81%, somente ultrapassando este patamar após 5,25 segundos. A configuração 1 ultrapassa este patamar em apenas 0,73 segundos. Este comportamento obtido com a configuração 3 pode ser vantajoso, pois aumenta a sobrevida do sistema de bombeio à jusante do misturador, caso o limite de GVF do equipamento seja superior aos 81%.

O comportamento da fração de ar na saída, com uma oscilação em torno de um patamar, ocorre devido ao espaçamento existente, nesta configuração, entre o furo mais acima e os demais furos localizados na parte inferior do cilindro interno.

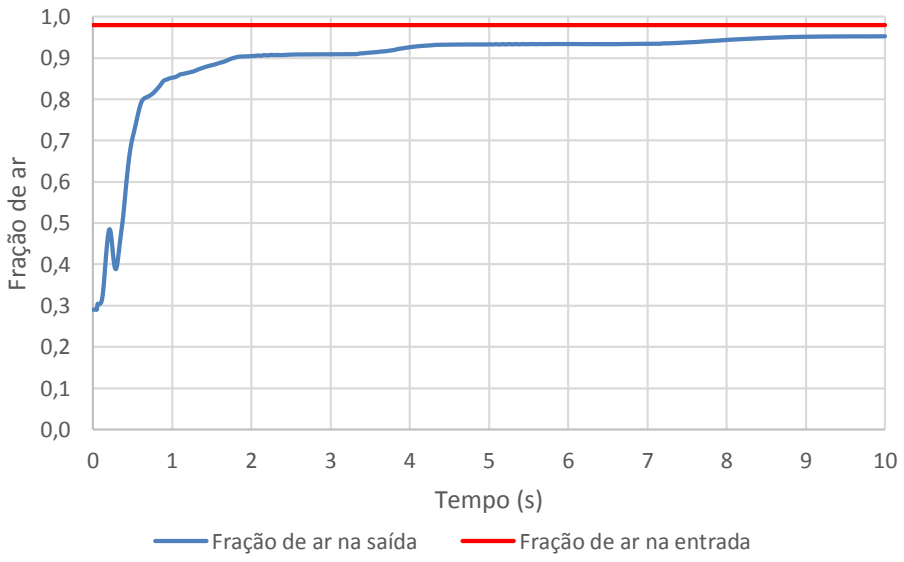

Figura 5.12 – Caso extremo, 98% de fração de ar na entrada, para a configuração 1 e U_m = 1,4m/s

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

Figura 5.13 – Caso extremo, 98% de fração de ar na entrada, para a configuração 3 e U_m = 1,4m/s

Com base nos resultados obtidos nas simulações de golfadas para configurações 1 e 3, buscou-se uma nova configuração, que mantendo-se a mesma área aberta ao fluxo das configurações analisadas, apresentasse melhores resultados frente à presença de golfadas. Este estudo é apresentado na próxima seção.

5.2
Proposta de Nova Geometria

Como mostrado na seção anterior, a configuração 1 conseguiu absorver comprimentos um pouco maiores de bolhas de gás e de pistões de líquido do que a configuração 3, quando se limitou a injeção de ar a 98% até que na saída a fração de ar atingisse 70%. Porém no teste de extremo, onde a injeção de ar a 98% foi mantida por mais tempo, a configuração 3, por não ter os furos uniformemente distribuídos ao longo do cilindro interno, conseguiu manter por um tempo muito maior a fração de ar na saída abaixo de 81%.

Na configuração proposta, se manteve os mesmos 36 furos de 1 mm da configuração 1, porém com uma distribuição similar à da configuração 3, isto é, se colocou um único furo na porção superior do cilindro interno e os demais 35 furos foram posicionado na parte inferior do cilindro interno. Além disso, com a intenção de aumentar a distância entre o furo superior e os inferiores, posicionou-se os furos mais próximos da base do cilindro externo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

Na figura abaixo é possível comparar os detalhes da configuração proposta (Figura 5.14a) com as configurações 1 e 3 (Figura 5.14 b e c).

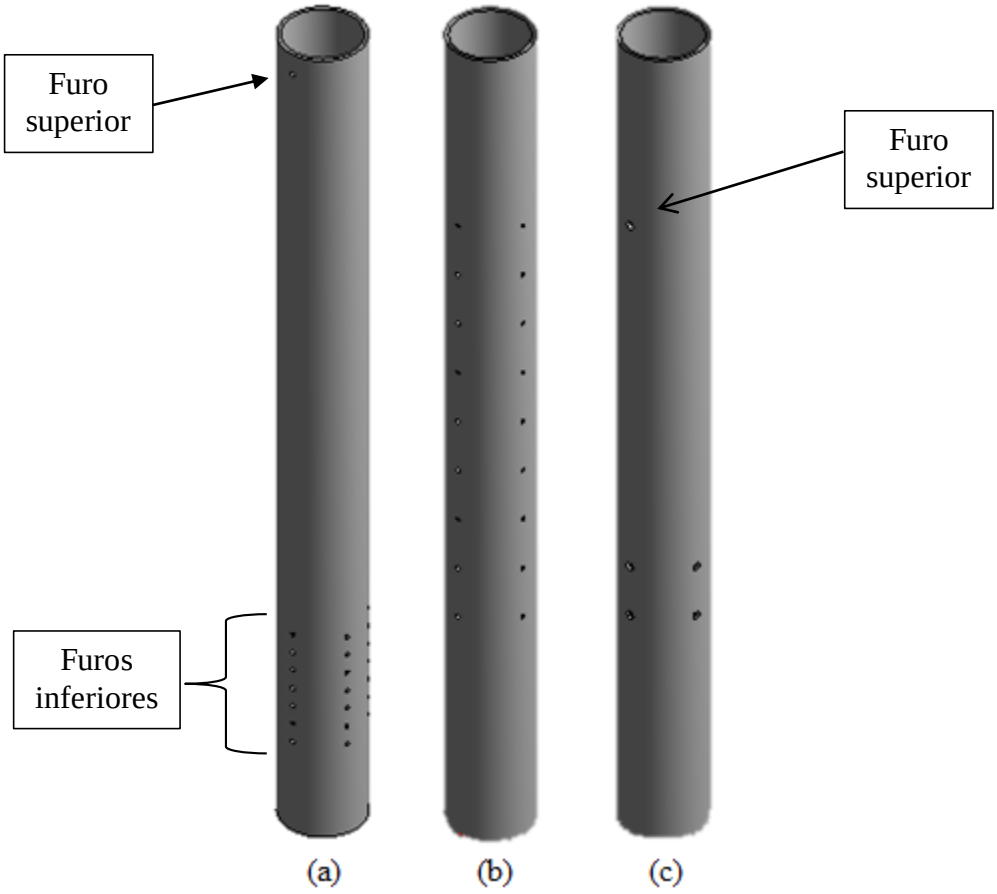

Figura 5.14 – Configuração proposta (a), configuração 1 (b) e configuração 3 (c)

Para avaliar a eficiência desta nova configuração, esta foi submetida às mesmas condições de golfadas usadas na configuração 3. Os resultados referentes a fração de ar na saída podem ser observados na Figura 5.15, onde a fração de ar imposta na entrada também é apresentada. Note que, para a mesma sequência de golfadas da configuração 3, gerada de forma a manter, naquela configuração, a fração de ar na saída até 70 %, na configuração proposta a fração de ar na saída não chega a ultrapassar 46 %. Ou seja, esta nova configuração se mostrou mais eficiente no amortecimento destas golfadas. Além disso, com esta configuração, para a mesma simulação de golfadas realizada para as configurações 1 e 3, a fração de ar na saída ficou mais uniforme, com uma amplitude de variação menor que nos casos anteriores. Outra diferença é que, nesta configuração, há uma defasagem entre a fração de ar na entrada e na saída.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

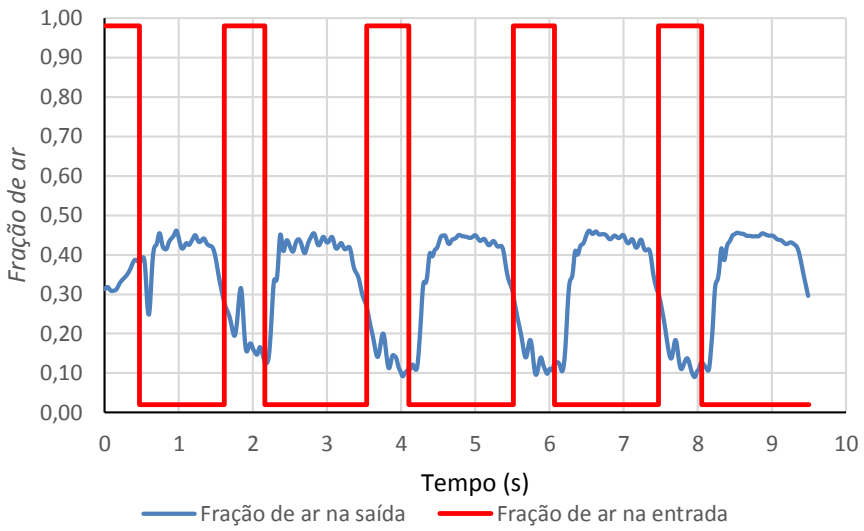

Figura 5.15 – Simulação de golfadas para a configuração proposta

A Figura 5.16 mostra, para esta sequência de golfadas, o comportamento do diferencial de pressão no misturador com a nova configuração. O valor médio do diferencial de pressão foi de 0,807 bar, significativamente menor do que os observados para as configurações 1 e 3, 1,223 e 0,906 bar, respectivamente.

Pode-se observar ainda que, diferentemente das configurações 1 e 3, nesta nova configuração a queda no diferencial de pressão não ocorre imediatamente após o início da entrada de somente ar no misturador. Antes mesmo do início da entrada de ar o diferencial de pressão começa a subir e se mantem alto durante a passagem da bolha de ar. E a redução no diferencial de pressão começa a ocorrer um pouco depois do início da golfada de água.

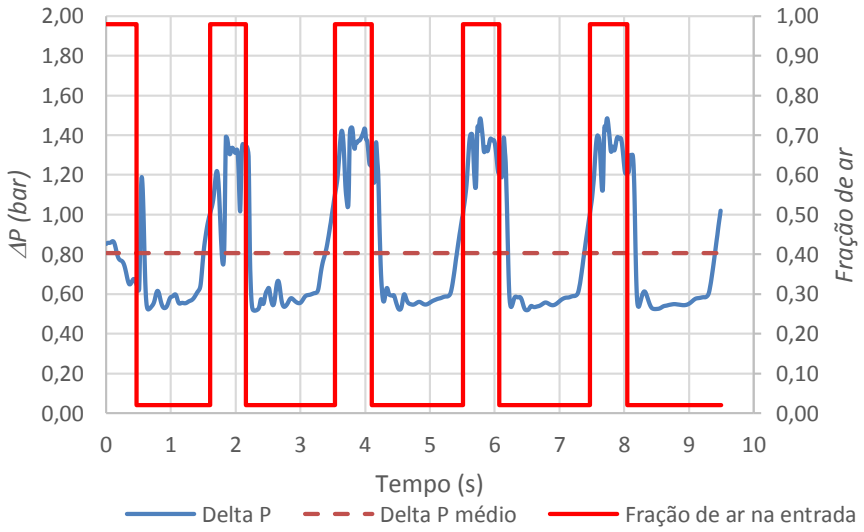

Figura 5.16 – Diferencial de pressão durante a simulação de golfadas para a configuração proposta

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

De forma análoga ao utilizado para avaliar as configurações 1 e 3, apresenta-se a seguir, o comportamento da fração de ar no interior do misturador, com a configuração proposta, durante a passagem de uma golfada. O tempo escolhido para esta análise foi de 5,51s a 7,47s, por já ser um período onde há estabilidade no tamanho da golfada.

No início da bolha de ar, tempo igual a 5,51s, observa-se que o espaço anular entre os cilindros interno e externo está praticamente todo preenchido com água, restando uma pequena porção de ar próxima ao topo, na região do furo superior. O cilindro interno está com ar, do topo até o início dos furos inferiores. Com a continuação da entrada de ar, o nível de água no espaço anular vai caindo, porém a distribuição de ar no cilindro interno pouco varia, na região entre o topo e o início dos furos inferiores, havendo alguma mudança na região dos furos inferiores. A indicação é que o furo superior não é grande o suficiente para deixar todo o ar que entra no misturador passar para o cilindro interno, fazendo ar se acumular no misturador, forçando a água a passar pelos furos inferiores e, consequentemente, fazendo o nível de água no espaço anular cair. Isto explica o motivo de haver uma queda na fração de ar na saída durante o tempo em que há entrada de ar e, por isso, há um descasamento entre a fração de ar na entrada e na saída observado na Figura 5.15.

Essa restrição imposta pelo furo superior à passagem do ar, também justifica o comportamento observado na Figura 5.16, onde há, diferentemente do observado para as configurações 1 e 3, um aumento no diferencial de pressão com a passagem da bolha de ar.

No tempo igual a 6,07s, inicia-se uma nova golfada de água. A água, ao entrar no misturador, rapidamente consegue voltar a fazer o nível no espaço anular entre os cilindros aumentar. Isto faz com que rapidamente o bolsão de ar, criado durante a entrada de ar, seja expulso para dentro do cilindro interno. Isto faz com que a fração de ar na saída rapidamente aumente e se mantenha praticamente constante até o final da golfada de água.

Como a condição de contorno na saída é de pressão constante, este aumento no nível de água do espaço anular, faz aumentar a pressão hidrostática no interior do espaço anular e, para manter o equilíbrio com a pressão na saída, ocorre uma queda na pressão na entrada do misturador. Nas outras configurações a variação no

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

nível de água no espaço anular era muito pequena, por isso este efeito não foi significativo.

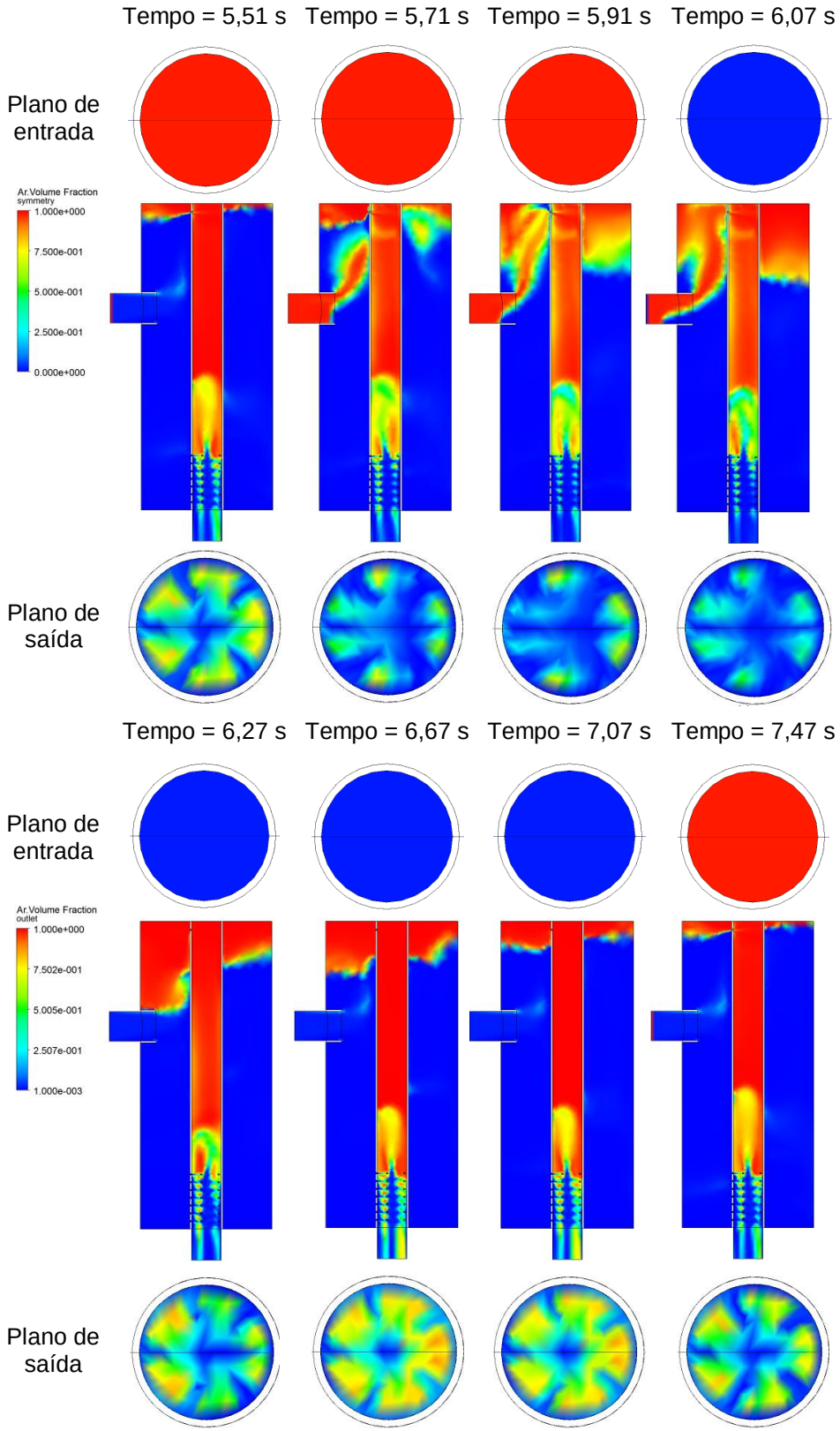

Figura 5.17 – Configuração proposta, comportamento da fração volumétrica de ar no interior do misturador com a passagem de uma golfada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

Na Figura 5.18 estão representados, para a configuração proposta, as distribuições dos grupos de bolhas na saída do misturador durante o pico de fração de ar na saída do misturador. Da mesma forma que ocorreu para as demais configurações, somente são apresentados os 4 primeiros grupos de bolhas, porém, neste caso só foram identificados os grupos 1 e 2. Os demais grupos não foram identificados em nenhum momento na saída do misturador durante as golfadas.

Pode-se verificar que, mesmo com a fração volumétrica média de ar estando alta, próxima a 46%, não existem bolhas maiores que 3 mm na saída do misturador. Ou seja, esta configuração conseguiu, além de uma fração menor de ar, quebrar as bolhas em bolhas menores que as outras configurações.

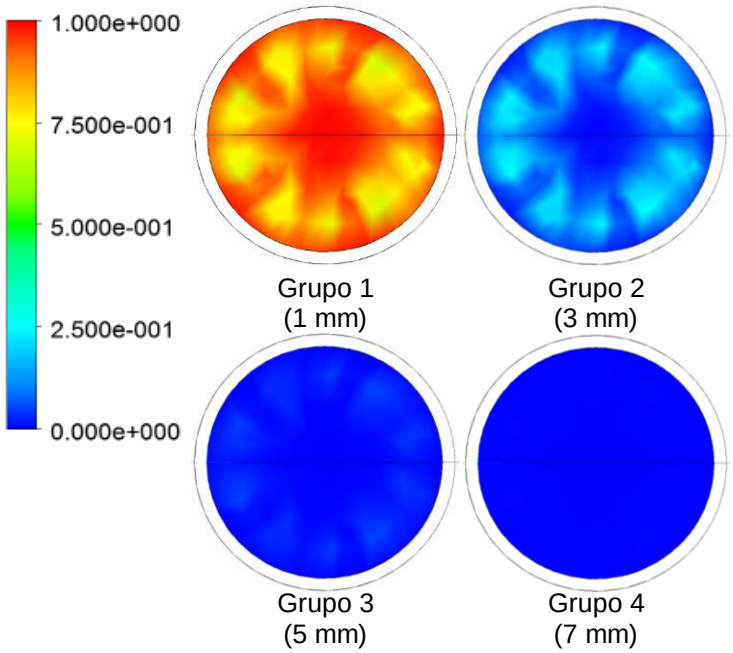

Figura 5.18 - Configuração proposta, distribuição dos grupos de bolhas na saída no pico de fração de ar na saída (tempo = 6,67s)

5.2.1
Configuração proposta com 98% de gás na entrada do misturador

Assim como feito para as outras configurações, buscou-se verificar o comportamento desta nova configuração no caso extremo de se ter na entrada uma fração constante de 98% de ar. No início, ou seja, no tempo igual a zero, se está com a fração de ar estabilizada em 29%, na entrada e na saída, e U_m = 1,4 m/s, a partir daí a fração de ar na entrada é instantaneamente elevada para 98% com U_m mantida constante. A Figura 5.19 mostra o comportamento da fração de ar na saída do misturador. Diferentemente do que ocorreu nas duas outras configurações

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

analisadas, o tempo para se atingir os 70% de fração de ar na saída foi muito maior, 3,45 segundos. Assim, nesta configuração, seria possível absorver uma bolha de gás com até 483 cm de comprimento (*L/D*= 254,2), ou seja, bolhas até seis vezes maiores que as configurações 1 e 3 conseguem.

Além disso, até os 3,33 segundos a fração de ar na saída fica praticamente constante, oscilando abaixo de 50 %. Ou seja, caso as bolhas de ar tivessem comprimentos de até 466 cm (*L/D*= 245,3), um sistema de bombeamento como o instalado pela Petrobras na Bacia de Campos (GVF limite de 70%), colocado à jusante deste misturador, não teria qualquer problema em continuar operando.

Figura 5.19 – Caso extremo, configuração proposta, 98% de fração de ar na entrada e U_m = 1,4m/s

As figuras a seguir mostram o comportamento da fração de ar no interior do misturador, com a configuração proposta, enquanto se mantêm a injeção de ar com fração de 98%.

A Figura 5.20 apresenta a distribuição da fração de ar (lado esquerdo) e do diâmetro representativo das bolhas de ar (lado direito) no início da injeção de ar, com fração de 98%, com bolhas com 20 mm de diâmetro (do tamanho do duto de entrada no misturado). Apresenta-se o plano de simetria e em baixo, o plano de saída do duto do misturador. Como 98% de ar só foi introduzido após uma injeção continua de 29% de fração de ar, a fração volumétrica do ar na entrada corresponde a este valor. Pode-se observar bolhas grandes de gás no topo da região anular. Parte do gás migra para o duto interno e é quebrado em bolhas de pequeno diâmetro com a entrada de líquido pelos orifícios inferiores. A fração de ar na saída é

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

aproximadamente igual a fração de gás na entrada de 29%, porém as bolhas apresentam pequeno diâmetro.

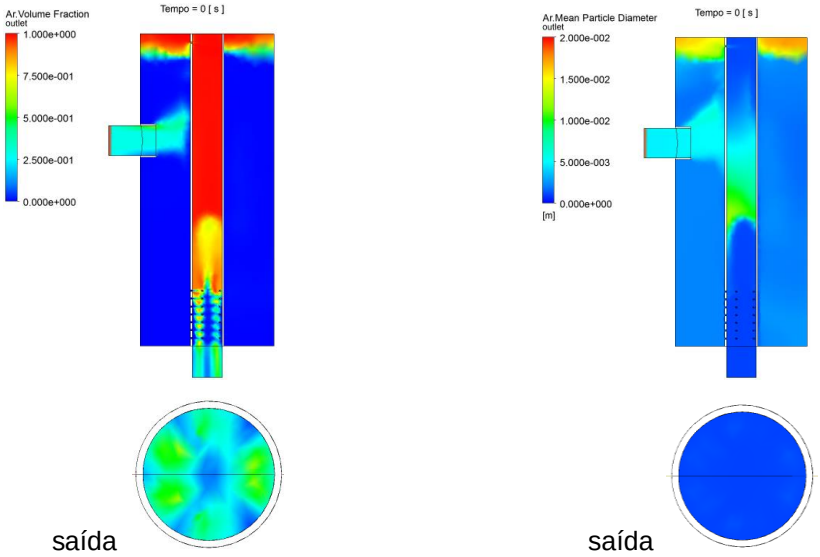

Figura 5.20 – Fração de ar e diâmetro representativo das bolhas de ar, configuração proposta, injeção de somente ar (fração de 98 %), tempo = 0,0s

A Figura 5.21 apresenta a distribuição da fração de ar e do diâmetro representativo das bolhas de ar durante o patamar observado na Figura 5.19, que foi de 1 a 3s. Foram relacionados três instantes de tempo. As figuras superiores correspondem a fração de ar, enquanto as inferiores ilustram a distribuição dos diâmetros das bolhas. Para cada caso, apresenta-se o plano de simetria e em baixo, o plano de saída do misturador. Pode-se perceber que, durante o patamar de fração de ar na saída, dentro do misturador o que acontece é uma redução no nível de líquido presente no espaço anular entre os cilindros interno e externo. Não há alterações nas frações e nos diâmetros das bolhas de ar na saída.

As distribuições da fração de ar e do diâmetro representativo das bolhas de ar, no momento em que o ar entra na primeira linha dos furos localizados na porção inferior do cilindro interno, são apresentados lado a lado na Figura 5.22. Este é o momento em que na Figura 5.19, após o patamar, começa a ocorrer um aumento abrupto na fração de ar na saída. Até este momento, verifica-se que não existem mudanças significativas nas frações e nos diâmetros das bolhas de ar na saída. Nota-se um aumento do diâmetro das bolhas na parte superior do duto interno

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

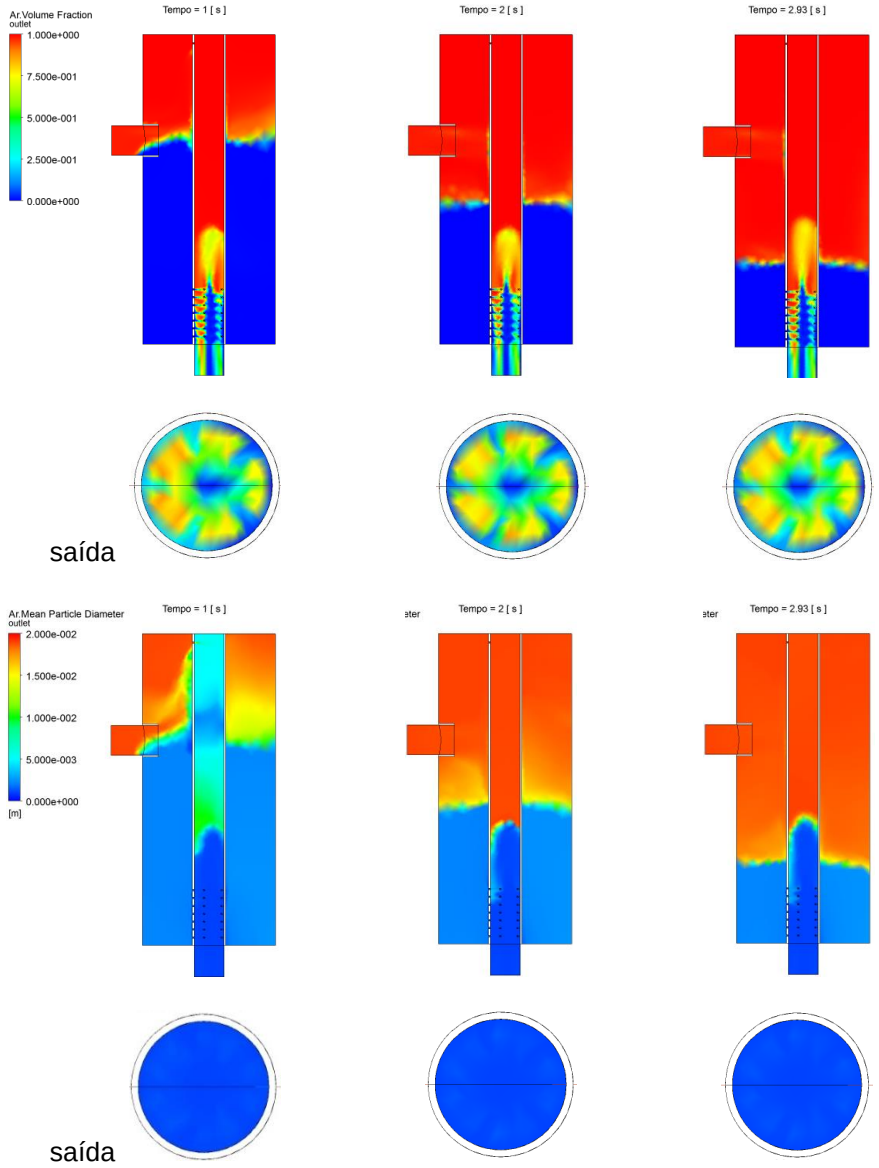

Figura 5.21 – Fração de ar e Diâmetro representativo das bolhas de ar na configuração proposta, injeção de somente ar (fração de 98 %), tempo = 1,00s; 2,00 s e 2,93s

Finalmente, na Figura 5.23 apresenta-se em cima e em baixo, a distribuição da fração de ar e diâmetro representativo das bolhas de ar, para dois instantes de tempo, após o momento em que o ar entra na primeira linha dos furos localizados na porção inferior do cilindro interno. Neste período, com o gradativo aumento na quantidade de furos expostos, é observado um aumento na fração de ar observada na saída do misturador. Porém, até o tempo de 3,93 segundos, o diâmetro representativo das bolhas ainda é próximo a 1 mm, mesmo com a fração de ar média na saída chegando a 90%. A partir dos 4 segundos a fração de ar na saída aumenta mais lentamente, porém o diâmetro representativo das bolhas começa a aumentar rapidamente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

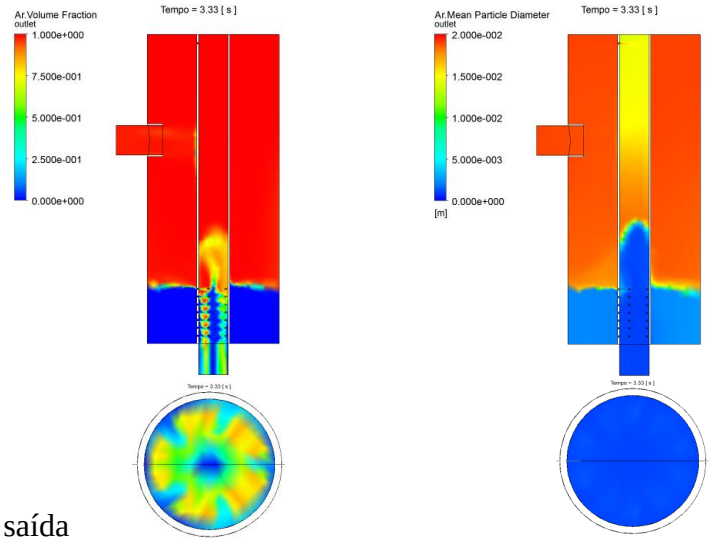

Figura 5.22 – Fração de ar e diâmetro representativo das bolhas de ar na configuração proposta, injeção de somente ar (fração de 98 %), tempo = 3,33s

Os objetivos almejados para esta nova configuração foram alcançados. Com esta configuração, comparando-se com as configurações 1 e 3, foi possível atenuar, consideravelmente, as golfadas impostas, reduzindo a amplitude de fração de ar na saída do misturador para a mesma frequência e tamanho de golfada. Isso foi feito ainda com redução no diferencial médio de pressão.

Esta configuração tomou como base a configuração 3, que se mostrou melhor que a 1 nos testes realizados. Uma alteração foi na razão entre áreas abertas ao fluxo preferencial de ar, no topo (furo superior), e na área aberta ao fluxo preferencial de água, demais furo. Na configuração 3 a relação foi de 1/8 e nesta configuração foi de 1/35, isto restringiu a passagem de ar e aumentou o fluxo de água, forçando parte deste ar, durante a passagem de uma bolha, a se acumular no misturador antes de sair.

Outra modificação foi o maior espaçamento entre o furo superior e os demais furos. Isso aumentou o volume de água que poderia ser acumulado no misturador e, desta forma, permitiu aumentar, em até seis vezes, o tempo que o misturador conseguiria resistir a uma bolha de ar. Aumentando, assim, a segurança para um equipamento de bombeio instalado à jusante deste misturador.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA

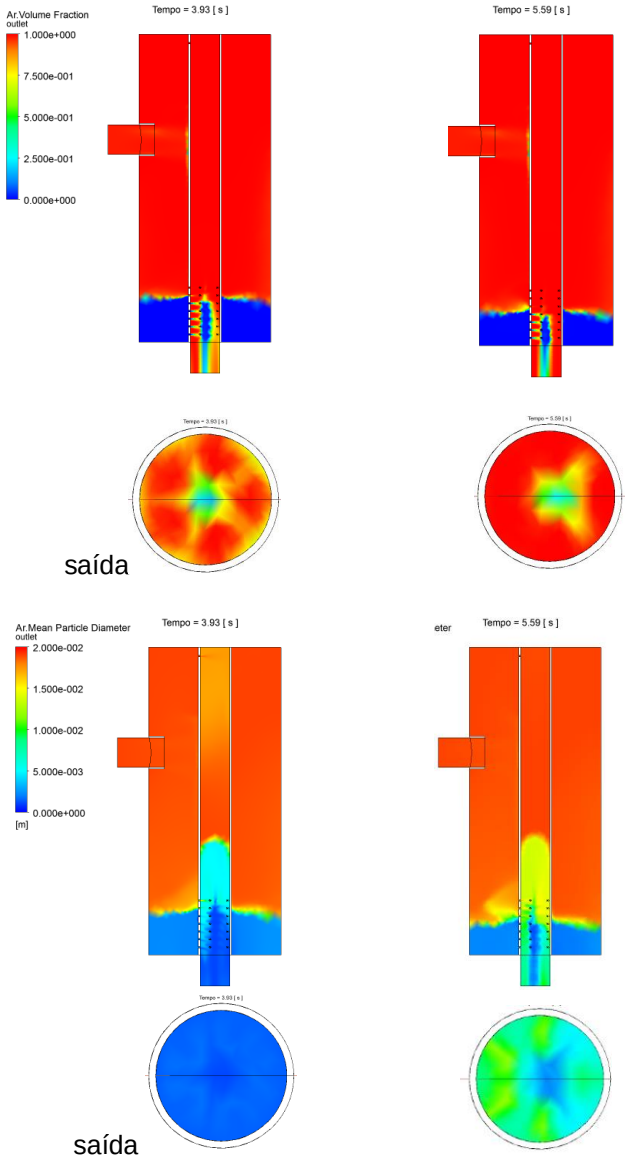

Figura 5.23 - Fração de ar e diâmetro representativo das bolhas de ar na configuração proposta, injeção de somente ar (fração de 98 %), tempo = 3,93s e = 5,59s

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121454/CA