

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE USO DO VENTURI NO PROCESSO DE GERAÇÃO DE MICROBOLHAS NO SISTEMA FAD

Marcellus Fontenelle*
Jean Carlos Meine de Almeida

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo principal a análise preliminar da viabilidade de utilização do efeito Venturi em conjunto com uma bomba centrífuga multiestágios na geração de microbolhas destinadas ao sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD), que utiliza o método de saturação do ar a partir da compressão do reciclo de parte do efluente clarificado. Este estudo, realizado em uma empresa fabricante de equipamentos para tratamento de efluentes do Meio-Oeste catarinense, incidiu sobre a possibilidade de substituição das bombas multifásicas atualmente empregadas na geração das microbolhas, em razão de seu alto custo de aquisição. No sistema FAD, as microbolhas são as responsáveis por promover a ascensão das partículas até a superfície para serem removidas por mecanismos específicos. A eficiência desse processo está relacionada ao tamanho e à concentração das microbolhas: quanto menor o diâmetro da bolha e maior a concentração, maior será a probabilidade de flotação. Visando avaliar os resultados do sistema proposto, foi construído um tubo Venturi conforme a literatura estudada, para então realizar um ensaio prático, em que a eficiência desse sistema foi determinada por meio de uma análise comparativa e qualitativa entre as microbolhas geradas pela bomba multifásica e as oriundas do tubo Venturi, em conjunto com a bomba centrífuga multiestágios. Os resultados mostraram que é possível gerar microbolhas com o sistema proposto, no entanto, foi observada uma concentração muito inferior em relação ao método atual, fato que pode estar relacionado à utilização da bomba centrífuga com rotores fechados, visto que as bombas multifásicas são dotadas de rotores abertos. Quanto ao diâmetro médio das microbolhas geradas, somente por meio de técnicas específicas para captura de imagens pode-se afirmar se elas atendem ao sistema FAD. Contudo, cabe reavaliar o método proposto a partir de ensaios futuros.

Palavras-chave: Flotação. Microbolhas. Venturi. Bomba multifásica.

1 INTRODUÇÃO

Em meio às diversas técnicas aplicadas no tratamento de efluentes industriais, o sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) tem se mostrado muito eficiente, alcançando uma ótima relação custo/benefício. Esse sistema faz uso de microbolhas de ar para a remoção dos sólidos em suspensão; no entanto, o valor de aquisição da bomba multifásica, responsável pela geração das microbolhas, chega a atingir 40% do custo total do equipamento, incluindo as taxas de importação, visto que ela não possui fabricante nacional. Diante desse elevado custo de aquisição, foi proposta neste trabalho a utilização de um sistema que utiliza o efeito Venturi aliado a uma bomba centrífuga multiestágios, com o objetivo de apresentar uma alternativa que substitua a utilização das bombas multifásicas com um menor valor de fabricação e a mesma eficiência.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD)

De acordo com Reali (1991 apud PIOLTINE, 2011, p. 167), a flotação é um processo de separação de partículas sólidas ou líquidas de uma fase líquida com o auxílio de bolhas de gás (normalmente o ar). Essas bolhas, ao

* Mestrando em Energia na Agricultura na Universidade do Oeste do Paraná; Especialista em Fontes Alternativas de Energia pela Universidade Federal de Lavras; Engenheiro Mecânico pela Universidade do Estado de Santa Catarina; Professor titular e Coordenador do Curso de Engenharia Bioenergética da Universidade do Oeste de Santa Catarina; Professor do Curso de Engenharia de Produção Mecânica; marcellus.fontenelle@unoesc.edu.br

** Engenheiro de Produção Mecânica, graduado pela UNOESC em 2012-2

aderirem à superfície das partículas, aumentam seu empuxo e provocam sua ascensão em direção à superfície da fase líquida.

No sistema FAD, o ar é dissolvido a uma pressão entre 300 e 600 kPa dentro de um vaso saturador, gerando bolhas de dimensões que variam entre 10 e 100 μm , com valor médio de 50 μm (LÉDO, 2008, p. 19). Quando a água saturada é injetada por meio de uma válvula agulha no tanque de flotação, à pressão atmosférica, o ar é liberado em forma de microbolhas que fornecem uma aparência leitosa na água (água branca), as quais aderem às partículas suspensas, promovendo sua flotação; uma camada de lodo é formada na superfície, sendo removida periodicamente por mecanismos específicos. Entre as principais vantagens do sistema FAD, a elevada quantidade e o pequeno tamanho das bolhas são o diferencial, possibilitando, dessa forma, a remoção de partículas de baixa densidade.

2.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS DO SISTEMA FAD

2.2.1 Taxa de recirculação do efluente clarificado

De acordo com Richter (2001 apud LÉDO, 2008, p. 21), a taxa de recirculação (R) é a relação entre a vazão de recirculação (q) encaminhada ao tanque de flotação e a vazão total de efluente (Q_{ef}), e é expressa em porcentagem:

$$R = \left(\frac{q}{Q_{ef}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Atualmente, a taxa de recirculação admite valores entre 20 e 50%, conforme descrito por Alkhatib e Thiem (1991 apud RODRIGUES, 2004, p. 24), necessitando, dessa forma, um tanque de flotação (ou célula de flotação) de maior capacidade.

2.2.2 Pressão de saturação de parte do efluente clarificado (Reciclo)

Quanto maior a pressão de saturação, menor é o diâmetro médio das bolhas, no entanto, essa redução no tamanho das bolhas vai ficando menos acentuada à medida que a pressão se eleva, estudos mostram que pressões acima de 500 kPa pouco influenciam no tamanho das bolhas. Segundo Pádua (2001, p. 101), pressões de saturação maiores que 550 kPa resultam no aumento da taxa de aglutinação das microbolhas no momento da despressurização, diminuindo, dessa forma, a produção efetiva de bolhas adequadas à flotação. Para minimizar a taxa de aglutinação e alcançar uma liberação eficaz do ar, a pressão deve ser reduzida bruscamente com elevados níveis de turbulência no dispositivo de despressurização, e deve ocorrer próximo ao fluxo da água floculada; entretanto, a velocidade do fluxo que sai do dispositivo deve ser baixa o suficiente para não promover quebra excessiva dos flocos.

2.2.3 Relação Ar/Sólidos

Pioltine (2009, p. 73) define a relação ar/sólidos a partir da seguinte equação:

$$\frac{A}{S} = C_{ar} \cdot \frac{q}{SST \cdot Q_{ef}} \quad (2)$$

Em que:

- A/S – relação ar/sólidos ($\text{mg}_{ar}/\text{mg}_s$);
- C_{ar} – concentração de ar na recirculação pressurizada (mg/L);
- q – vazão de recirculação (m^3/h);
- SST – sólidos suspensos totais (mg/L);
- Q_{ef} – vazão de efluente (m^3/h).

A concentração de ar fornecida à recirculação pressurizada é calculada por:

$$C_{ar} = \frac{Q_{ar}}{q} \cdot \rho_{ar} \cdot 1000 \quad (3)$$

Em que:

C_{ar}	–	concentração de ar na recirculação pressurizada (mg/L);
Q_{ar}	–	vazão de ar fornecida ao sistema (L/h);
q	–	vazão de recirculação (L/h);
ρ_{ar}	–	massa específica do ar (g/L).

2.3 PARÂMETROS DA GERAÇÃO DE MICROBOLHAS

2.3.1 Solubilidade do ar

Diferentemente de solutos líquidos e sólidos, a solubilidade de gases em água é reduzida com o aumento da temperatura. Quanto maior a pressão exercida por um gás, maior será o número e a força das colisões de suas moléculas com a água. Se essas colisões tornam-se mais fortes e frequentes, mais moléculas conseguirão penetrar no líquido. A elevação da temperatura tem relação direta com o aumento da entropia das moléculas, ou seja, com o grau de agitação molecular. Quando o líquido está quente, todas as suas moléculas, inclusive as dos gases dissolvidos, estão mais agitadas, assim fica mais fácil elas escaparem do líquido e, conseqüentemente, mais difícil dissolver um gás dentro dele. Outro fator de influência é a agitação da superfície do líquido; quanto maior a agitação, maior será a facilidade de entrada ou saída das moléculas do gás (troca gasosa), pois mais fácil será de romper a tensão superficial. O processo de flotação por ar dissolvido é basicamente a dissolução de uma fase gasosa em uma fase líquida e a posterior precipitação desse gás do líquido.

Richter (2001 apud LÉDO, 2008, p. 26) define que a concentração de gás dissolvido na água para uma determinada pressão é definida pela Lei de Henry, conforme alguns conceitos: a solubilidade de um gás em um líquido é diretamente proporcional à pressão parcial do gás exercida sobre o líquido, desde que não haja reação química entre o gás e o líquido; o gás em liberdade e à mesma pressão ocupa o mesmo volume que quando dissolvido; e, com a redução de pressão, o gás se desprende.

2.3.2 Tamanho das microbolhas

Entre os fatores que determinam o sucesso do sistema FAD, o tamanho das bolhas é um dos principais aspectos que devem ser considerados. Conforme citado anteriormente, a dimensão média das microbolhas destinadas ao tratamento de efluentes industriais é de 50 μm , valor obtido por meio de experimentos com diferentes tipos de águas residuais. Pádua (2001, p. 2-3) enfatiza que tais bolhas são mais adequadas, pois elas deslocam menos líquido da superfície das partículas às quais se aderem, apresentando maior facilidade de adesão floco-bolha, além de apresentar menor velocidade ascensional, resultando em um maior tempo de detenção e, conseqüentemente, maior probabilidade de contato com as partículas a serem removidas. Outra vantagem é que para uma mesma quantidade de ar dissolvido, bolhas menores produzem uma maior concentração, apresentando, dessa forma, uma maior superfície específica de contato.

2.4 TUBO VENTURI

Segundo Delmée (2003, p. 109), os Venturis são indicados quando se requer pouca perda de carga, aliada a uma apreciável pressão diferencial. O formato geral clássico dos tubos Venturi é baseado na norma ISO 5167 e apresenta as seguintes características:

- uma parte cilíndrica a montante, onde situam-se as tomadas de alta pressão;

- b) cone convergente, formado por um ângulo de $21^\circ \pm 1^\circ$;
- c) garganta cilíndrica, onde situam-se as tomadas de baixa pressão;
- d) cone divergente a jusante, com ângulo de 7° a 15° .

Delmée (1982 apud IBARS, 2004, p. 10) afirma ainda que é recomendado adotar para o cilindro de entrada um comprimento mínimo igual ao diâmetro da tubulação. Já o cone convergente deverá ter comprimento de, aproximadamente, 2,7 vezes a diferença entre o diâmetro da tubulação principal e o diâmetro da garganta. A garganta deverá possuir um diâmetro de 0,4 a 0,75 do diâmetro principal e comprimento mínimo igual ao diâmetro. De acordo com Leopoldo e Souza (1979 apud IBARS, 2004, p. 10), os diâmetros das seções a montante e a jusante do tubo Venturi devem ser iguais ao diâmetro da tubulação em que será instalado. Azevedo Netto et al. (1998 apud IBARS, 2004, p. 11) mencionam a existência de dois tipos de Venturi: o *longo (Hershel)*, com comprimento entre 5 e 12 vezes o diâmetro da tubulação; e o *curto (Orivent)*, cujo comprimento total encontra-se entre 3,5 e 7 vezes o diâmetro da tubulação.

3 METODOLOGIA

A metodologia de estudo para a realização deste trabalho pode ser dividida, basicamente, nas seguintes etapas:

- a) Primeira etapa: compreendeu o levantamento dos dados do equipamento de flotação, bem como as características das microbolhas geradas pelas bombas multifásicas;
- b) Segunda etapa: compreendeu a fundamentação teórica baseada em livros e trabalhos existentes sobre flotação e geração de microbolhas;
- c) Terceira etapa: buscou-se mostrar os resultados obtidos com a instalação do tubo Venturi em conjunto com a bomba centrífuga multiestágios, focando as características das microbolhas geradas em comparação com as formadas pelas bombas multifásicas;
- d) Quarta etapa: desenvolvimento das conclusões e considerações finais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ATUAL DE FLOTAÇÃO

O modelo do Flotador estudado é aplicado para uma vazão nominal de até $12 \text{ m}^3/\text{h}$ de efluentes de abate-douro avícola, cuja concentração de sólidos em suspensão chega a 984 mg/L (MAGNAN, 2010, p. 15). Esse equipamento opera com taxa de recirculação de 33,33%. A vazão de recirculação necessária para suprir a vazão nominal do Flotador foi calculada a partir da Equação 1, resultando em $4 \text{ m}^3/\text{h}$. As características da bomba multifásica atualmente empregada estão descritas na Tabela 1:

Tabela 1 – Características principais da bomba multifásica

Marca	EDUR
Modelo	EB15u
Faixa de aplicação	1 a $7,0 \text{ m}^3/\text{h}$
Potência nominal	4 cv
Número de estágios	3
Rotor	Aberto
Pressão máxima de trabalho	15 bar
Velocidade de rotação	5 (60 Hz)

Fonte: os autores.

A concentração de ar necessária para suprir a vazão nominal do Flotador foi baseada nos ensaios realizados por Metcalf e Eddy (1979 apud COUTINHO, 2007, p. 12), os quais obtiveram valores entre 0,005 e 0,06 kg de ar/kg de sólidos para espessamento de lodos. Considerou-se, então, 0,03 kg de ar/kg de sólidos na Equação 2, resultando em 88,56 mg/L.

A partir da densidade do ar à pressão atmosférica e temperatura de 20° (Fox et al., 2010, p. 668), foi calculada a vazão de ar necessária para suprir a vazão nominal do Flotador (conforme Equação 3), resultando em 0,293 m³/h.

A pressão existente na entrada da bomba ocorre em razão do acúmulo de água dentro da célula de flotação. No momento em que a célula de flotação está completamente cheia, a coluna d'água formada até a linha de centro da bomba geradora de microbolhas atinge 1,21 m. A tubulação de sucção da bomba multifásica em estudo é confeccionada em aço carbono 1" SCH 40 (diâmetro interno 26,64 mm); apresenta 780 mm de comprimento dos trechos retos; possui duas curvas de raio longo e uma válvula do tipo globo, totalizando um comprimento equivalente de 8,8 metros. A velocidade calculada para essa tubulação foi de 1,99 m/s. A partir do cálculo do Número de Reynolds, considerando-se a viscosidade dinâmica da água a 20 °C, conforme Fox et al., (2010, p. 667), constatou-se tratar de um regime turbulento, situação em que se pode obter o fator de atrito a partir da equação de Nikuradse (ANDRADE; CARVALHO, 2000, p. 554). Admitindo-se rugosidade média de tubos novos de 0,00005 m (Manual de Treinamento KSB, 2003, p. 35), o fator de atrito calculado foi de 0,0230. Considerando-se a célula de flotação completamente cheia, a densidade da água a 20 °C, e as perdas de carga em razão dos tubos e conexões, foi determinada a pressão manométrica de -6467 Pa na entrada da bomba, calculada por meio da Equação de Conservação da Energia e das perdas de carga a partir da equação de Darcy.

4.2 CARACTERÍSTICAS DAS MICROBOLHAS GERADAS PELO SISTEMA ATUAL

A Fotografia 1 mostra as microbolhas geradas pela bomba multifásica dentro da célula de flotação. Pode-se observar a aparência leitosa da água (água branca) em razão da alta concentração de ar dissolvido:

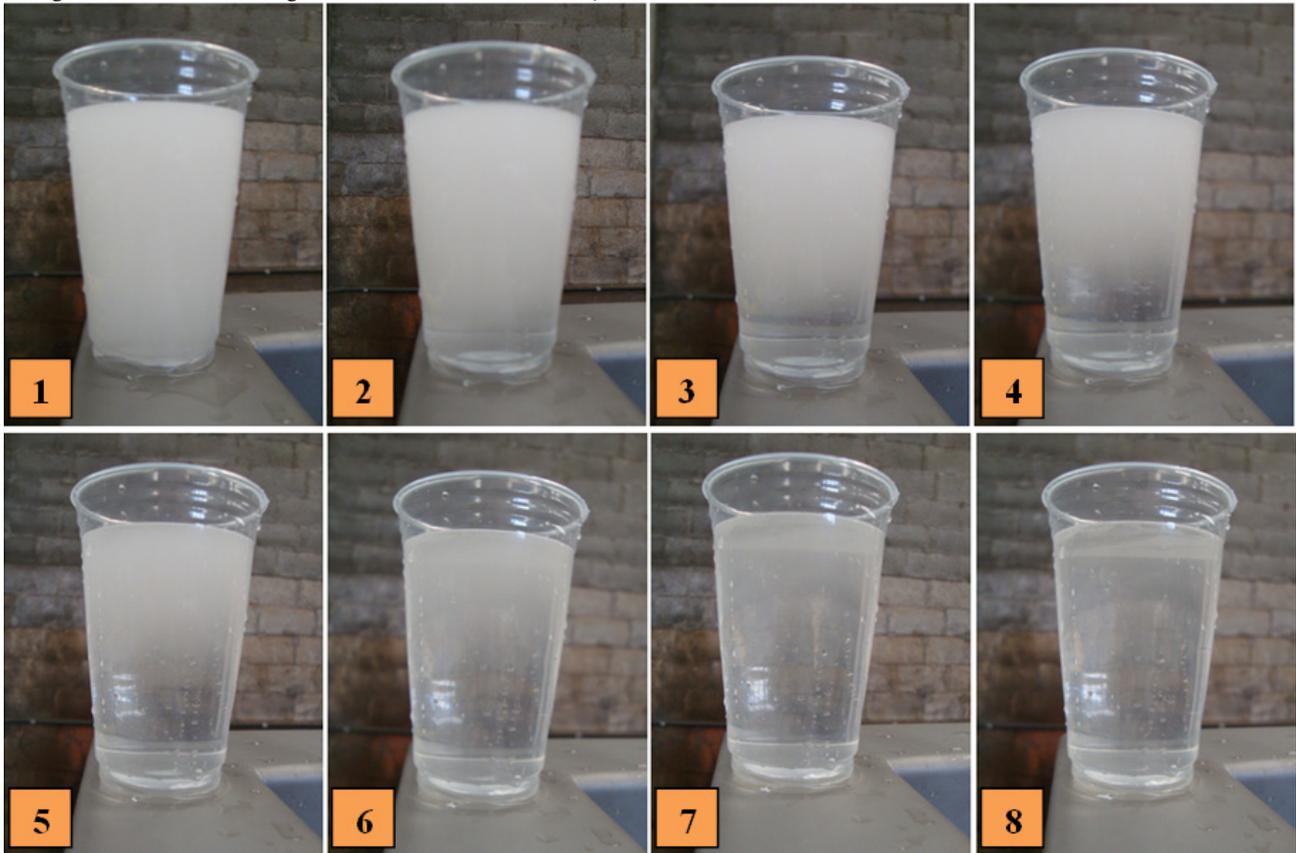
Fotografia 1 – Água saturada dentro da célula de flotação (utilização de bomba multifásica)



Fonte: os autores.

A Fotografia 2 mostra a sequência de fotos de uma amostra de água saturada retirada de dentro da célula de flotação, em um intervalo de 1,5 minutos.

Fotografia 2 – Amostra de água saturada no intervalo de 1,5 minutos



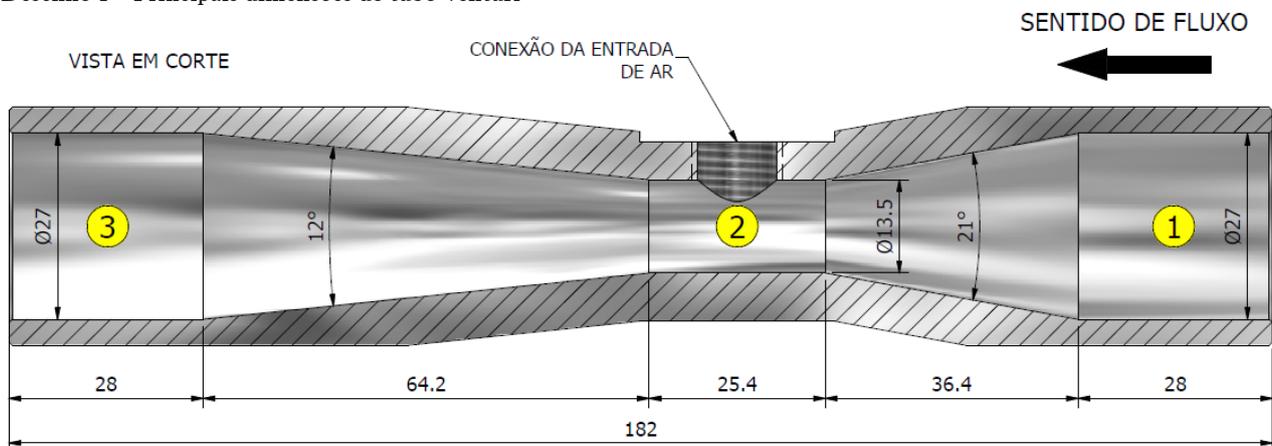
Fonte: os autores.

Embora seja impossível avaliar o tamanho das microbolhas sem o auxílio de técnicas específicas, pode-se afirmar que há uma grande concentração de bolhas muito pequenas, pois mesmo à pressão atmosférica, elas levam um tempo considerável para se desprender da água.

4.3 CARACTERÍSTICAS DO TUBO VENTURI

O tubo Venturi foi fabricado de acordo com as recomendações para o tubo Venturi universal curto. O Desenho 1 mostra a vista em corte dele e suas principais dimensões:

Desenho 1 – Principais dimensões do tubo Venturi



Fonte: os autores.

A pressão manométrica disponível na entrada do tubo Venturi (Ponto 1) foi considerada a mesma da entrada na bomba multifásica do sistema atual (-6467 Pa), visto que a tubulação de sucção e a coluna d'água serão mantidas conforme a instalação anterior.

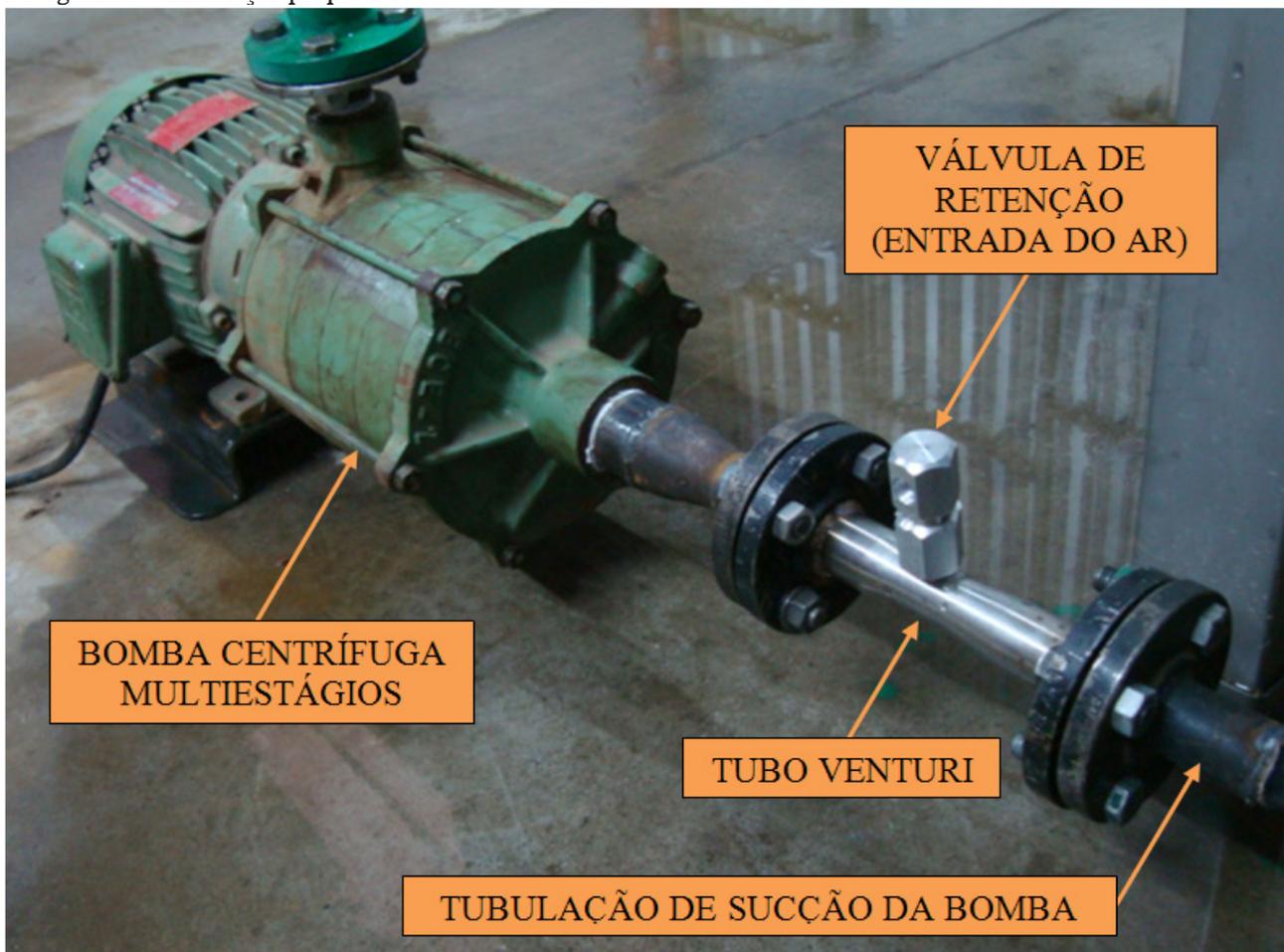
Por apresentar pouca perda de carga, as pressões internas no tubo Venturi foram calculadas a partir da equação de Bernoulli. A velocidade calculada para a garganta do Venturi foi de 7,76 m/s. Foi considerada apenas a densidade da água a 20 °C, visto que a quantidade de ar é muito pequena se comparada ao volume de água. Com isso, a pressão manométrica calculada na garganta do tubo Venturi (Ponto 2) foi de -34539 Pa.

Desconsiderando a variação da vazão em razão do fluxo de ar existente, a pressão manométrica disponível a jusante do tubo Venturi (Ponto 3) é igual à encontrada no Ponto 1.

4.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto consiste na substituição da bomba multifásica por uma bomba centrífuga multiestágios, em conjunto com o tubo Venturi acoplado diretamente na entrada da bomba (conforme Fotografia 3). As condições de operação para realização dos testes com o sistema proposto foram mantidas de acordo com o sistema atual, que utiliza as bombas multifásicas: pressão de saturação de 5,5 kgf/cm² e vazão de reciclo de 4 m³/h.

Fotografia 3 – Instalação proposta



Fonte: os autores.

Os dados da bomba centrífuga multiestágios estão descritos na Tabela 2:

Tabela 2 – Características principais da bomba centrífuga multiestágios

Marca	Schneider
Modelo	ME-2450
Faixa de aplicação	5,2 m ³ /h em 10 bar
Potência nominal	5 CV
Número de estágios	4
Rotor	Fechado
Pressão máxima de trabalho	10,7 bar
Velocidade de rotação	3500 RPM (60 Hz)

Fonte: os autores.

4.4.1 Características das microbolhas geradas pelo sistema proposto

A Fotografia 4 mostra a água saturada dentro da célula de flotação e uma imagem aproximada de uma amostra retirada:

Fotografia 4 – Microbolhas geradas pelo sistema proposto

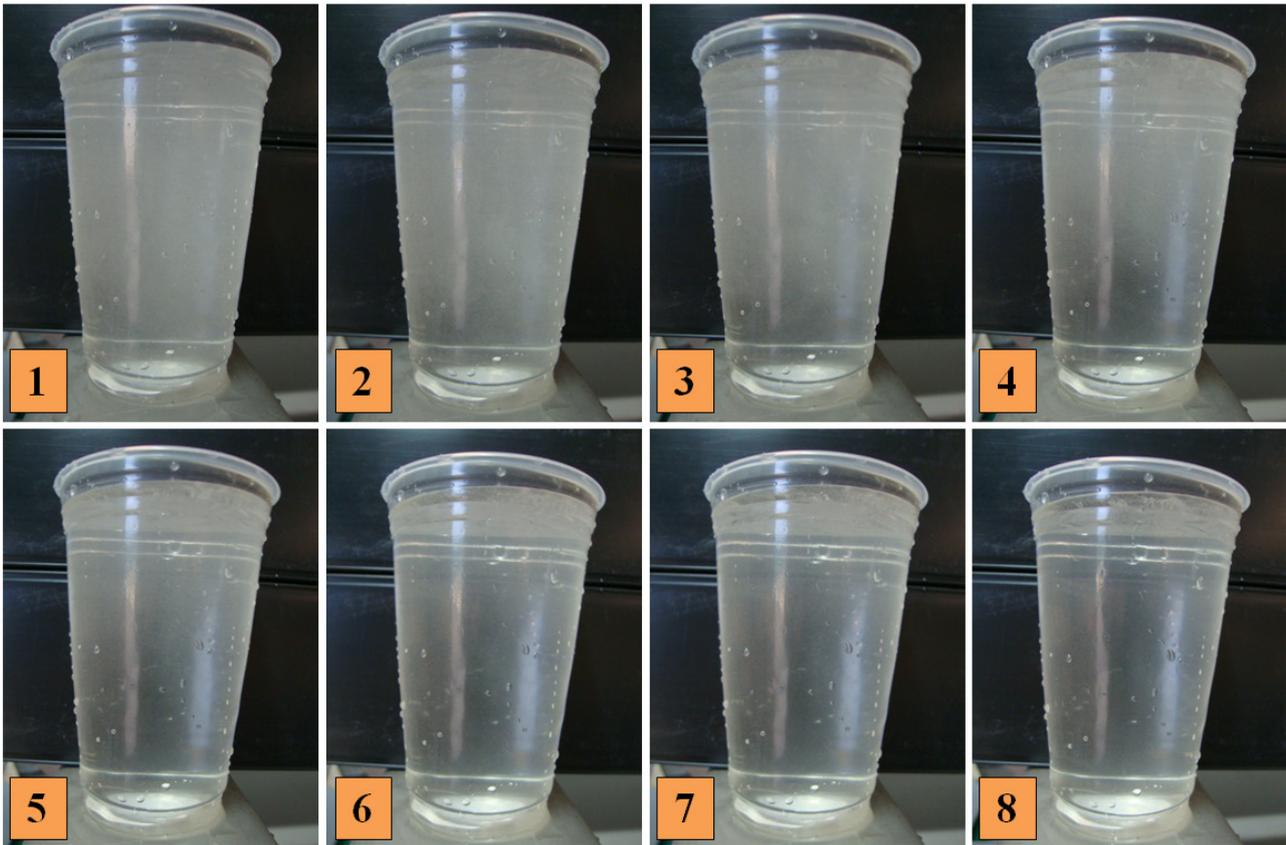


Fonte: os autores.

Observou-se que não se faz presente a aparência leitosa intensa e uniforme na água anteriormente percebida com a utilização da bomba multifásica. É atribuído a isso, o fato de haver uma quantidade menor de ar dissolvido (pouca concentração), ou até mesmo apresentar um diâmetro médio das bolhas maior que aquele alcançado pelo sistema atual.

Da mesma forma, observou-se um desprendimento mais acelerado das bolhas quando retirada a amostra da água saturada. A Fotografia 5 mostra a sequência de fotos em um intervalo de 40 segundos. A análise das imagens demonstra que praticamente todas as bolhas se desprenderam da água em um curto espaço de tempo, demonstrando uma dissolução abaixo do esperado, quando comparado ao sistema que utiliza a bomba multifásica.

Fotografia 5 – Amostra de água saturada no intervalo de 40 segundos



Fonte: os autores.

5 CONCLUSÃO

Ao término deste trabalho, conclui-se que há a possibilidade de geração de microbolhas utilizando um tubo Venturi em conjunto com uma bomba centrífuga multiestágios; entretanto, baseando-se somente neste estudo preliminar, não se pode substituir a atual bomba multifásica, em razão da baixa concentração apresentada e da dúvida em relação ao diâmetro médio das bolhas, pela impossibilidade de medição do diâmetro médio destas, fato que exige uma técnica específica de captura de imagens. No entanto, não se pode descartar a possibilidade futura de utilização desse sistema, visto que alguns fatores podem ter influenciado para que o resultado não tenha sido eficiente, como, por exemplo, o tipo de rotor empregado, visto que as bombas multifásicas são dotadas de rotores abertos, enquanto a bomba centrífuga utilizada possui rotores fechados. Portanto, a utilização do sistema proposto deve ser reavaliada a partir de ensaios futuros, buscando-se a utilização de uma bomba centrífuga de rotor aberto e o emprego de uma técnica de medição do diâmetro médio das microbolhas, além de um estudo mais aprofundado sobre as características recomendadas para o tubo Venturi destinado à injeção de aditivos em uma rede hidráulica.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, L.; CARVALHO, J. de A. Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas, v. 5, n. 3, p. 554-557, 2001.
- COUTINHO, W. **Emprego da flotação a ar dissolvido no tratamento de cursos d'água**. 2007. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)–Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. São Paulo: Blücher Ltda, 2003.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GEANKOPLIS, C. J. **Processos de transporte y operaciones unitarias**. 3. ed. México: Continental, 1998.

IBARS, R. A. F. **Desenvolvimento e avaliação de tubos venturi para medição de vazão**. 2004. 77 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LÉDO, P. G. da S. **Flotação por ar dissolvido na clarificação de águas com baixa turbidez utilizando sulfato de alumínio e sementes de moringa oleifera como coagulantes**. 2008. 105 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)–Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

LENGSFELD, F. L.; DUARTE, R.; ALTIERI, C. **Manual de Treinamento KSB**: seleção e aplicação de bombas centrífugas. 2003. Disponível em: <http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/segundo2008/manual_de_treinamento.pdf>. Acesso em: 29 out. 2012.

MAGMAN, R. B. **Análise da viabilidade técnica e financeira da substituição do coagulante cloreto férrico por policloreto de alumínio durante o processo físico-químico no tratamento de efluente de abatedouro avícola**. 2010. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental)–Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010.

PÁDUA, V. L. de. **Tratamento de águas de abastecimento**. Belo Horizonte, 2001. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAArZQAK/tratamento-aguas-abastecimento>>. Acesso em: 05 out. 2011.

PIOLTINE, A. **Emprego de bomba multifásica como unidade geradora de microbolhas de ar em sistema de flotação aplicado ao pré-tratamento de efluente têxtil**. 2009. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PIOLTINE, A.; REALI, M. A. P. **Emprego de bomba multifásica como unidade geradora de microbolhas de ar em sistema de flotação aplicado ao pré-tratamento de efluente têxtil**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v16n2/v16n2a10.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2011.

RODRIGUES, R. T. **Desenvolvimento da técnica LTM-BSIZER para a caracterização de bolhas e avaliação de parâmetros no processo de flotação**. 2004. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.