

ANÁLISE DE CONFIGURAÇÃO DE IMPELIDOR DE INDUÇÃO GASOSA QUANTO AO K_{LA} E TEMPO DE MISTURA

V. T. MAZZIERO¹, M. SCONTRI¹ e M. O. CERRI¹

¹ Universidade Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’, Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia

RESUMO – Os testes foram realizados utilizando duas configurações de impelidores, uma com o impelidor indutor de gás (*gas-inducing impeller*), impresso em impressora 3D, baseado visualmente no impelidor EKATO® Gasjet, juntamente com o impelidor Rushton (RT+IIG) e outra com dois impelidores Rushton (RT2x). Foram realizadas correlações para determinação da vazão de gás induzida (Q) e k_{LA} para cada rotação (N) na configuração RT+IIG utilizando modelos encontrados na literatura para impelidor de geometria semelhante. Os testes de determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (k_{LA}) foram realizados com a configuração RT2x nas vazões de 1,0 e 0,5 vvm e rotações de 200-1000 rpm e com a configuração de RT+IIG nas rotações de 400-1000 rpm sem aeração do meio. Os resultados demonstraram um aumento de k_{LA} nas rotações testadas para a configuração RT+IIG devido a vazão variável de gás induzida, enquanto que a configuração RT2x, com vazão de ar de 1,0 vvm, uma região sem variação é observada entre 800 e 1000 rpm devido a vazão fixa de ar aplicada. Para o tempo de mistura, os efeitos da indução de gás foram observados em 400 rpm na configuração RT+IIG, em que o tempo foi igual a configuração RT2x, embora nas outras rotações tenha se mostrado inferior na homogeneização. O material (PLA) provou-se resistente aos testes realizados e a impressão 3D mostrou-se viável para a construção de protótipos.

1. INTRODUÇÃO

Impelidores de indução gasosa (IIG) têm sido usados amplamente em reatores de flotação, em reações como hidrogenação, alquilação e ozonização, no tratamento biológico de águas residuais e fermentação, como na produção de vinagre e de leveduras, devido a sua capacidade de aumentar a eficiência do processo ao reutilizar o gás do espaço livre acima do líquido do reator sem a necessidade de um compressor (Ye *et al.*, 2016; Patwardhan e Joshi, 1999). Por meio de uma abertura no eixo acima da superfície do líquido, ocorre a passagem do gás até o orifício do impelidor. A uma certa rotação, chamada de rotação crítica (N_c), a redução de pressão no orifício do impelidor é suficiente para superar a pressão do fluido existente acima do orifício, induzindo a vazão de gás (Evans *et al.*, 1992).

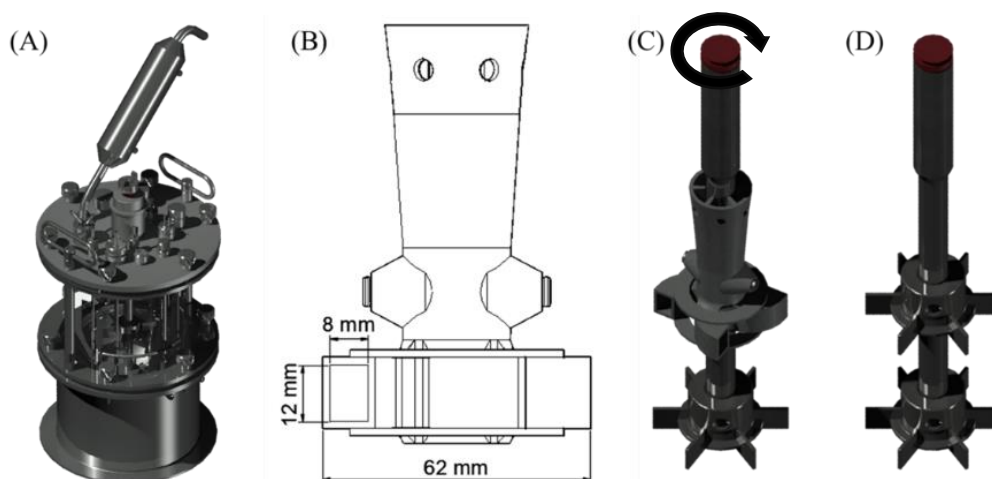
Em processos químicos e biotecnológicos a determinação de parâmetros como coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (k_{LA}) e o tempo de mistura (T_m) são importantes no escalonamento e otimização. Muitos fatores podem influenciar esses parâmetros, tais como a

agitação, vazão de ar aplicada, geometria e características reológicas do fluido (Özbek e Gayik, 2001).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O biorreator de agitação mecânica utilizado para os testes foi o TECNAL[®] TEC-BIO 7,5 VI, que foi adquirido juntamente com os impelidores Rushton e o sensor polarográfico Mettler Toledo[®] InPro 6900 de concentração de oxigênio. O impelidor indutor de gás foi modelado em 3D no *software* Autodesk[®] AutoCAD baseado visualmente no impelidor EKATO[®] Gasjet e impresso em PLA pela impressora MakerBot[®] Replicator+. A Figura 1 apresenta a renderização do biorreator (A) e das configurações de impelidores utilizadas, uma com o impelidor indutor de gás (B) e o Rushton (RT+IIG) (C) e outra com dois impelidores Rushton (RT2x) (D). Tais configurações foram padronizadas em relação a distância entre impelidores (7,6 cm) e distância do impelidor inferior à extremidade do eixo (1 cm).

Figura 1 – Renderização feita no *software* Autodesk[®] AutoCAD de: (A)- biorreator TECNAL[®] TEC-BIO 7,5 VI; (B)- impelidor indutor de gás impresso em PLA com cotas; (C)- configuração de impelidores RT+IIG e (D)- configuração de impelidores RT2x



Foram empregados 4 litros de água deionizada à temperatura de 25°C em todos os testes para evitar variações das propriedades reológicas que possam influenciar os resultados de k_{LA} e padronizar a profundidade de 0,05 m do orifício do impelidor indutor de gás. Para a determinação do k_{LA} , foram utilizados os métodos descritos em Wise (1951) e Cerri *et al.* (2016) para a aquisição dos dados da variação de concentração de oxigênio em triplicata e tratamento de dados para obtenção do k_{LA} , respectivamente. Para a configuração RT2x foram utilizadas as rotações de 200-1000 rpm em 0,5 e 1,0 vvm de ar e para a configuração RT+IIG as rotações de 400-1000 rpm sem aeração. A fim de determinar a vazão de ar na configuração RT+IIG e o alcance de rotação utilizado nos testes de k_{LA} para RT+IIG, foi realizada a determinação empírica da rotação crítica para posterior ajuste de um modelo.

Os tempos de mistura foram realizados em quintuplicata e determinados visualmente utilizando 4 gotas fenolftaleína, neutralizando com pulsos de 1,0 mL de solução de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH) 5,0 molL⁻¹ para cada configuração de impelidores nas rotações de 200-1000 rpm sem aeração do meio.

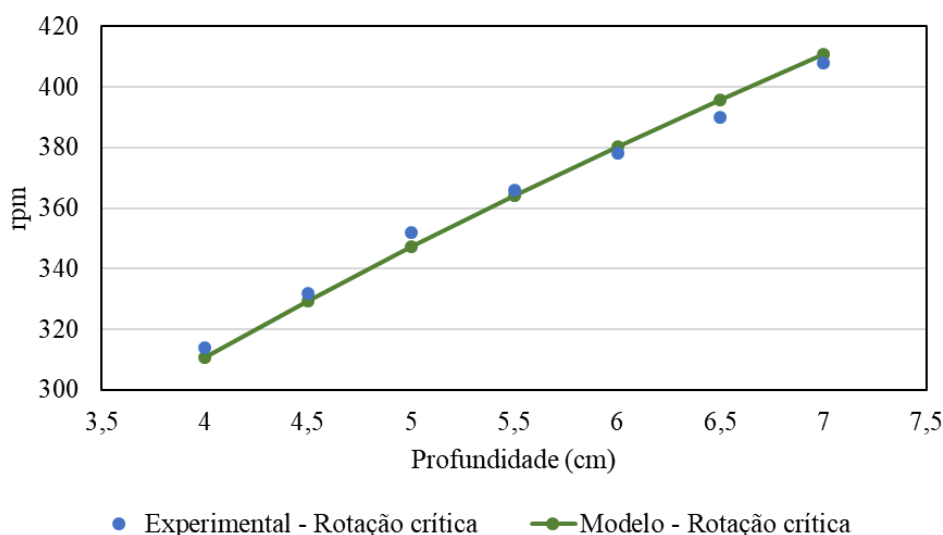
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Modelo para determinação da rotação crítica (N_c) para RT+IIG

Para determinar a rotação crítica em função da profundidade do orifício (h), foram variadas as localizações do impelidor indutor de gás no eixo para alternar a profundidade de 0,04 m a 0,07 m e aplicadas diversas rotações até que a indução de gás fosse identificada, caracterizando a rotação crítica. Após serem obtidos os dados de rotação crítica, foi ajustado o modelo baseado na modificação da constante k , que considera não-idealidades do fluido, na Equação 1 (White e de Villiers, 1977), em que g é a aceleração da gravidade local (m/s^2), D o diâmetro do impelidor (m), h a profundidade do orifício (m) e N_c a rotação crítica em rps. Para melhor visualização, os valores de N_c e h foram convertidos para rpm e cm, respectivamente, no gráfico da Figura 2. Segundo o modelo, N_c para tal impelidor é de 347,2 rpm à 5 cm de profundidade e, de acordo com Patwardhan e Joshi (1999), o valor da constante k é de $0,21 \pm 0,04$, bem próximo ao valor de 0,2625 encontrado pela ferramenta Solver do Microsoft® Excel para essa configuração de impelidores.

$$N_c = \sqrt{\left(\frac{1}{k}\right)gh} \quad (1)$$

Figura 2 – Gráfico dos dados experimentais de rotação crítica (N_c - rpm) pela profundidade do orifício (cm), em que ● são os dados obtidos de 4 a 7 cm e — o modelo previsto pela Equação 1 .



3.2. Modelo para determinação da vazão de gás (Q) e k_La para RT+IIG

Para a determinação de um modelo da vazão de gás em função da rotação foram utilizados os valores de rotação crítica previstos pela Equação 1. A Equação 2, determinada para o impelidor utilizado em células de flotação Denver® Flotation Machine (Patwardhan e Joshi, 1999), foi utilizada assumindo sua utilização na temperatura de 25°C e pressão de 1 atm, uma vez que o equipamento para o qual foi determinada não necessita de pressurização e opera em temperatura ambiente, em que Q é a vazão de gás (m^3/s) e N a rotação (rps).

$$Q = 0,0021(N^2 - N_c^2)^{0,75} D^3 \quad (2)$$

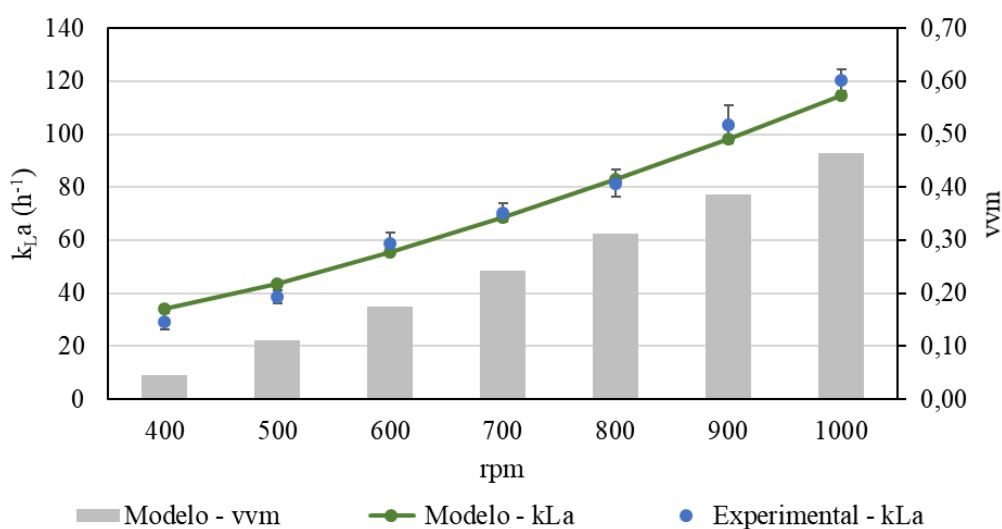
Utilizando as vazões de ar obtidas pela Equação 2, pôde ser determinado o k_{La} a partir de um modelo que depende do consumo de potência em sistemas aerados (P_g), sendo expresso pela Equação 3 (Patwardhan e Joshi, 1999). Tal modelo foi ajustado para a Equação 4 (Patwardhan e Joshi, 1999) conforme os dados experimentais de k_{La} pela ferramenta Solver do Microsoft® Excel, retornando valor de número de potência (n_p) de 0,1298 na Equação 3. Em que d , o diâmetro do orifício (m), foi aproximado para o diâmetro de um círculo de mesma área transversal da geometria real do orifício e V o volume de fluido utilizado nos testes (m^3).

$$\left(\frac{P_g}{V}\right) = 0,62 N^{0,44} \left(\frac{Q}{V}\right)^{-0,31} \left(\frac{d}{D}\right)^{4,48} n_p^{1,07} \quad (3)$$

$$k_{La} = 0,0195 \left(\frac{P_g}{V}\right)^{0,5} \quad (4)$$

Os resultados de k_{La} (h^{-1}) obtidos experimentalmente, juntamente com o modelo da vazão de ar (convertida para vvm) e o modelo do k_{La} (h^{-1}) em relação à rotação, estão apresentados na Figura 3. Pode-se observar que o k_{La} aumenta tanto com a rotação quanto com a vazão de ar devido a mútua dependência de variáveis no sistema. Tais resultados serviram de base para comparação entre as configurações de impelidores.

Figura 3 – Gráfico de k_{La} (h^{-1}) no eixo primário e vvm no eixo secundário em relação rpm, em que ● são os dados experimentais obtidos de 400 a 1000 rpm para a configuração RT+IIG, — o modelo previsto pela Equação 4 para o k_{La} e ■ o modelo previsto pela Equação 2 para a vazão de gás (Q) convertida para vvm.

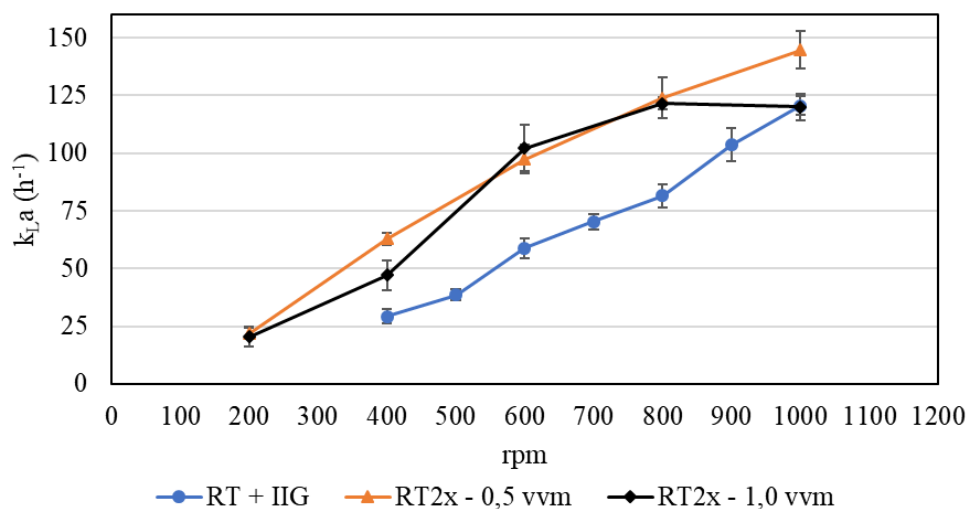


3.3. Comparação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (k_{La}) entre as configurações de impelidores

A Figura 4 apresenta os resultados de k_{La} para as configurações RT2x a 0,5 vvm e 1,0 vvm e para a configuração RT+IIG. O fato do k_{La} para RT+IIG ser menor que RT2x pode ser explicado pelo fato da vazão induzida chegar a um máximo de 0,46 vvm em 1000 rpm. No

entanto, é tão eficiente na dispersão gasosa quanto RT2x a 1,0 vvm nessa rotação. A partir dos dados obtidos pode-se afirmar que RT+IIG possui menor k_{La} que a configuração RT2x a 0,5 vvm em todas as rotações. Mais testes deverão ser realizados para obter o modelo de predição da vazão de ar máxima de RT+IIG em rotações maiores para determinar se há rotações em que o k_{La} de RT+IIG é superior aos valores obtidos de RT2x a 0,5 vvm.

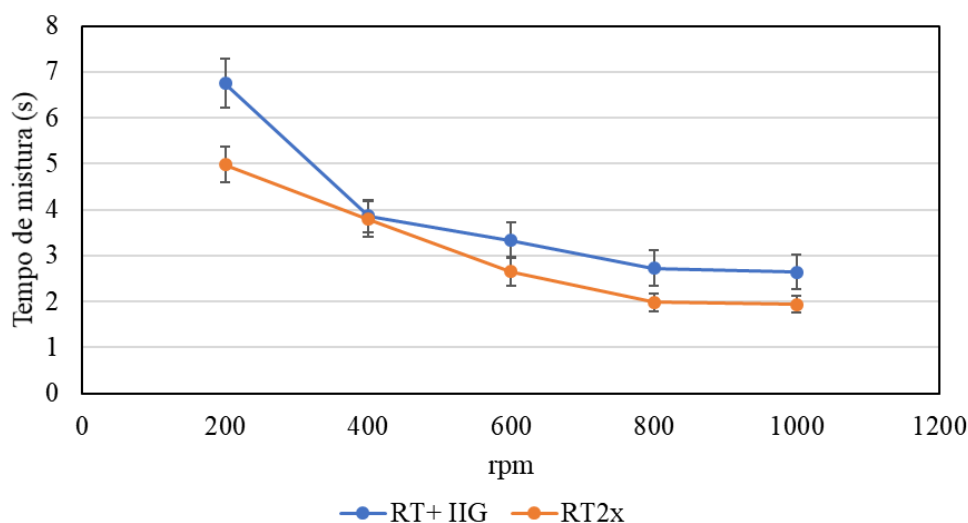
Figura 4 – Gráfico dos dados experimentais de k_{La} (h^{-1}) pelo rpm, em que \bullet são os dados obtidos de 400 a 1000 rpm para RT + IIG, \blacktriangle e \blacklozenge são para RT2x nas rotações de 200 a 1000 rpm com vazão de ar de 1,0 e 0,5 vvm respectivamente

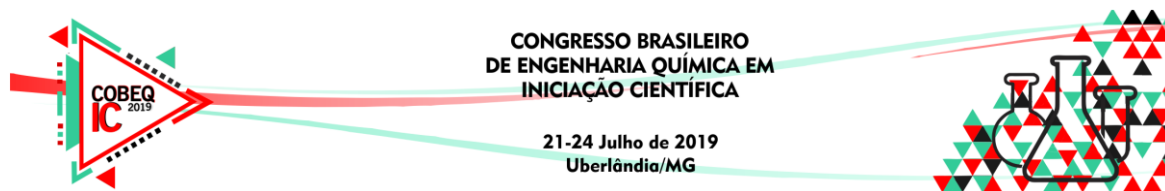


3.4. Análise do tempo de mistura (T_m)

A Figura 5 apresenta os resultados experimentais obtidos para o tempo de mistura pelo rpm para RT2x e RT+IIG nas rotações de 200-1000 rpm.

Figura 5 – Gráfico dos dados experimentais dos Tempos de mistura (s) pelo rpm em que \bullet é referente à RT+IIG e \blacktriangle à RT2x.





Os resultados do tempo de mistura demonstram a influência da aeração confirmada por Hadjiev *et al* (2006). Para a rotação de 400 rpm, maior que a rotação crítica, a vazão induzida de ar de 0,045 vvm já foi suficiente para igualar o tempo de mistura com RT2x. Apesar disso, o aumento de vazão não foi suficiente para igualar os tempos de mistura nas rotações subsequentes, indicando que RT2x possui maior capacidade de homogeneização do meio.

4. CONCLUSÃO

A impressão 3D se mostrou viável como meio de produção de protótipos para testes envolvendo impelidores, uma vez que a partir dela foi possível adaptar as dimensões para utilização de um biorreator já adquirido e material no qual foi impresso (PLA) se mostrou capaz de suportar os estresses relacionados à velocidade de rotação. As correlações utilizadas se mostraram eficientes para a determinação da rotação crítica e k_{LA} por se assemelharem aos valores obtidos experimentalmente no alcance de rotações realizado nos testes. Quanto aos resultados obtidos, pode-se afirmar que, nas rotações testadas, a configuração RT+IIG apresentou valores de k_{LA} abaixo da RT2x, mas devido à vazão de ar variável manteve-se o aumento de k_{LA} , chegando a ser equivalente a RT2x com 1,0 vvm em 1000 rpm. Com relação ao tempo de mistura, RT+IIG se mostrou menos eficiente na homogeneização do meio, mas foi possível observar uma região equivalente em 400 rpm em que a vazão de ar induzido favorece a mistura do meio. Uma possível explicação para os resultados obtidos é a utilização da distância ótima entre os impelidores para a configuração RT2x, favorecendo sua hidrodinâmica e possibilitando a obtenção de valores altos de k_{LA} e baixo tempo de mistura para tal configuração, enquanto que para RT+IIG tal distância não pode ser favorável para a hidrodinâmica do sistema.

5. REFERÊNCIAS

- CERRI, M. O., ESPERANÇA, N. M., BADINO, A. C., RIBEIRO, P. A. M. A new approach for k_{La} determination by gassing-out method in pneumatic bioreactors. *Society of Chemical Industry*, v. 91, p. 3061-3069, 2016.
- EVANS, G. M.; RIELLY, C. D.; DAVIDSON, J. F.; CARPENTER, K. J. Hydrodynamic characteristics of a gas-inducing impeller. *Fluid Mechan. Mix.*, v. 10, p. 153-161, 1992.
- HADJIEV, D.; SABIRI, N. E.; ZANATI, A. Mixing time in bioreactors under aerated conditions. *Biochem. Eng. J.*, v. 27, p. 323-330, 2006.
- ÖZBEK B.; GAYIK, S. The studies on the oxygen mass transfer coefficient in a bioreactor. *Process Biochemistry*, v. 36, p. 729-741, 2001.
- PATWARDHAN, A. W.; JOSHI, J. B. Design of Gas-Inducing Reactors. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 38, p. 49-80, 1999.
- WHITE, D. A.; DE VILLIERS, J. U. Rates of Induced Aeration in Agitated Vessels. *Chem. Eng. J.*, v. 14, p. 113-118, 1977.
- WISE, W. S. The Measurement of the Aeration of Culture Media. *J. gen. Microbiol.*, v. 5, p. 167-177, 1951.
- YE, Q.; LI, Z.; WU, H. Principle and Performance of Gas Self-inducing Reactors and Applications to Biotechnology. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, v. 152, p. 1-33, 2016.