

ANÁLISE DO CONSUMO DE POTÊNCIA E DA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO EM TANQUE AGITADO COM DIFERENTES ASSOCIAÇÕES DE IMPELIDORES UTILIZANDO FLUÍDO PSEUDOPLÁSTICO

M. M. BUFFO^{1*}, L. J. CORRÊA¹, A. J. G. CRUZ¹, C. S. FARINAS^{1,2}, A. C. BADINO¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

²Embrapa Instrumentação

*e-mail: marianembuffo@gmail.com

RESUMO

A transferência de oxigênio e o consumo de potência são parâmetros importantes na avaliação de biorreatores e bioprocessos. No presente trabalho foram avaliados o coeficiente de transferência de oxigênio (k_{ia}) e o consumo de potência em biorreator convencional tipo tanque agitado com diferentes associações de impelidores tipo turbina de 6 pás planas ou turbina de rushton (RT) e impelidores orelha de elefante de escoamentos ascendente e descendente (EEUP e EEDP), sob diferentes condições de agitação (600 à 1000 rpm) e de aeração (0,4 à 1,0 vvm). Solução de goma xantana foi utilizada como fase líquida no intuito de simular reologicamente caldos de fermentação não-newtonianos. O intuito do trabalho foi buscar associações com alta eficiência de transferência de oxigênio (transferência/consumo de energia), visto que os impelidores RT são conhecidos pelo alto consumo de potência, e também geram alto cisalhamento às células. Os resultados obtidos utilizando planejamento fatorial mostraram que as configurações EEDP-EEUP, RT-EEDP e EEDP-RT foram as que apresentaram melhores resultados com eficiência até 87% maior que a associação RT-RT.

1 INTRODUÇÃO

Em biorreatores convencionais, que são ainda os mais utilizados para a maioria dos processos bioquímicos e de fermentação, os impelidores são peças fundamentais e podem determinar um bom andamento do processo. A geometria do impelidor influencia a hidrodinâmica do caldo de fermentação, o consumo de potência, a transferência de oxigênio, o cisalhamento e morfologia de células filamentosas (fungos e bactérias) e, portanto, a biossíntese do produto de interesse. Vários tipos de impelidores vêm sendo projetados para diferentes aplicações nas mais diferentes áreas. A seleção de um impelidor adequado para um processo requer informações precisas sobre as propriedades do

fluido, condições do processo e peculiaridades do mesmo (GHOTLI, et al, 2013).

O impelidor mais tradicionalmente utilizado em biorreatores é o tipo turbina de seis pás planas ou turbina de Rushton (RT), que proporciona um escoamento radial ao caldo. Ele possui uma adequada transferência de oxigênio, porém apresenta alguns problemas, levando a misturas não uniformes com elevado cisalhamento nas pontas das pás e bem mais ameno nas periferias do biorreator, além de um alto consumo de potência (PASTEL et al., 2009). Alternativamente, um tipo de impelidor conhecido como "orelha de elefante" ou "Elephant ear" (EE) pelo formato e posicionamento de suas lâminas, tornou-se

amplamente utilizado na indústria bioquímica, devido às suas características de “baixo cisalhamento” e adequada transferência de oxigênio, sendo utilizado em bioprocessos que envolvem culturas altamente viscosas e sensíveis ao cisalhamento, tais como às de células (animais e vegetais), bactérias e fungos filamentosos (MIRRO e VOLL, 2009; BUSTAMANTE, 2013).

Os EE apresentam 3 pás planas inclinadas e produzem um escoamento misto (axial e radial) ao fluido agitado, o que proporciona um escoamento diferenciado e uma melhor mistura global, gerando maiores velocidades de transferência de oxigênio (k_{La}) em comparação, por exemplo, às lâminas unidirecionais dos impelidores tipo hélice marinha (marine-blade impeller). Devido à característica de escoamento axial os EEs podem proporcionar um escoamento ascendente (EEUP) ou descendente (EEDP) dependendo da orientação do impelidor e do sentido de rotação do eixo (horário ou anti-horário) (MIRRO; VOLL, 2009).

Apesar de indícios em relação ao bom funcionamento dos impelidores EE para cultivos de microrganismos, existem poucos estudos que comprovam essa eficiência, principalmente quando se trata da associação desses impelidores. Dessa forma, o presente trabalho objetivou avaliar e comparar diferentes associações de impelidores utilizando a turbina de Rushton (TR) e os impelidores EEUP e EEDP em termos de dois importantes parâmetros hidrodinâmicos, a transferência de oxigênio, avaliada através do coeficiente de transferência de massa (k_{La}), e o consumo de potência. Como fluido de trabalho foi utilizado solução de goma xantana, fluido pseudoplástico que simula o comportamento reológico de um caldo fermentativo.

Frequentemente na literatura o k_{La} é correlacionado com o consumo de potência (LABIK et al., 2014). No presente trabalho utilizou-se a razão entre os dois parâmetros,

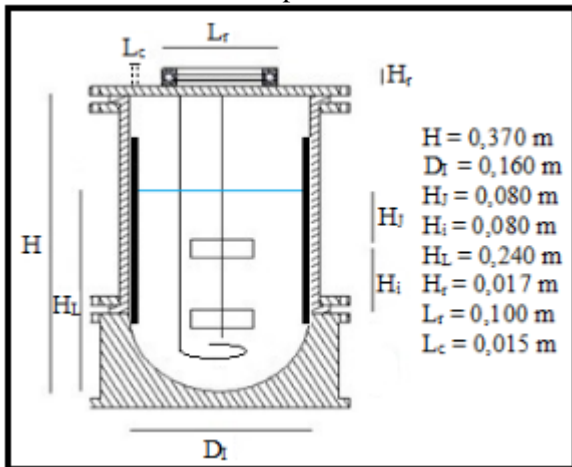
aqui definida como eficiência de transferência de oxigênio, como forma de estabelecer um critério extra de avaliação, que considera os dois parâmetros conjuntamente, sendo possível assim estabelecer qual associação de impelidor transfere maior quantidade de oxigênio por unidade de potência.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Biorreator e Impelidores

Os testes de consumo de potência foram realizados em uma unidade experimental proposta por Corrêa et al. (2014) e adaptada para o presente trabalho que consiste num reator tipo tanque agitado e aerado com volume total de 5 litros e volume de trabalho de 4 L, provido de um motor de indução (Voges, modelo ARB71A6 - E2260) acoplado em um rolamento situado na tampa do reator e um inversor de frequência (Siemens, modelo Micro Master MM420) para ajustar a frequência de rotação. A temperatura do reator foi controlada em 32°C por um banho ultratermostático (Ethik Technology, modelo 521-2D). Para cálculo do consumo de potência a partir do torque foi medida a força aplicada a um braço utilizando um dinamômetro digital (Lutron, modelo FG 6005SD) e para o controle da vazão de alimentação de ar um fluxômetro (COLE-PARMER, modelo 33116-22 na faixa de 0 a 5 L.min⁻¹). As principais dimensões desse sistema são mostradas na Figura 1.

Figura 1 – Dimensões do sistema utilizado para medidas de consumo de potência.

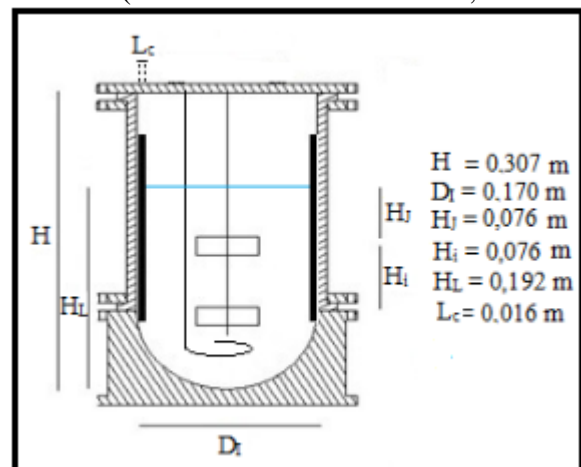


Fonte: Autor (2015).

Os experimentos para determinação de k_{LA} foram realizados em biorreator de bancada tipo tanque agitado e aerado e modelo Bioflo II (New Brunswick Scientific, USA). A capacidade total do reator é de 5 L com volume útil de 4 L. A vazão de alimentação de ar foi controlada por fluxômetro e a temperatura mantida a 32°C. As principais dimensões do biorreator são mostradas na Figura 2.

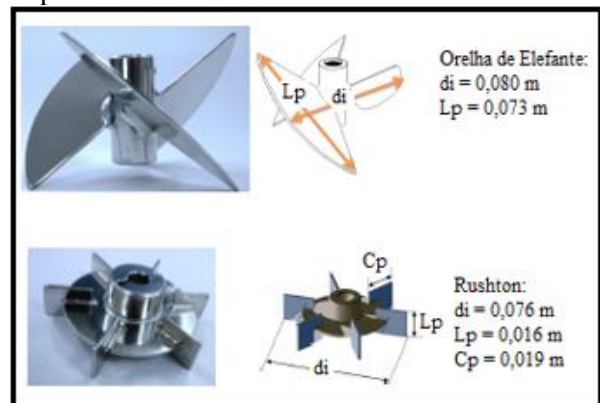
Os impelidores utilizados foram a turbina de seis pás planas ou de Rushton (RT) e o impelidor tipo orelha de elefante (EE) com três lâminas planas inclinadas (45°), sendo que este pode ser operado no modo de escoamento ascendente (up-pumping - EEUP) e no modo descendente (down-pumping - EEDP) (New Brunswick Scientific, USA). As geometrias dos impelidores e suas respectivas dimensões são mostradas na Figura 3.

Figura 2 – Dimensões do biorreator modelo Bioflo II (New Brunswick Scientific, USA).



Fonte: Autor (2015).

Figura 3 – Ilustração e dimensões dos impelidores.



Fonte: Adaptado de Bustamante (2013).

2.2 Metodologia Experimental

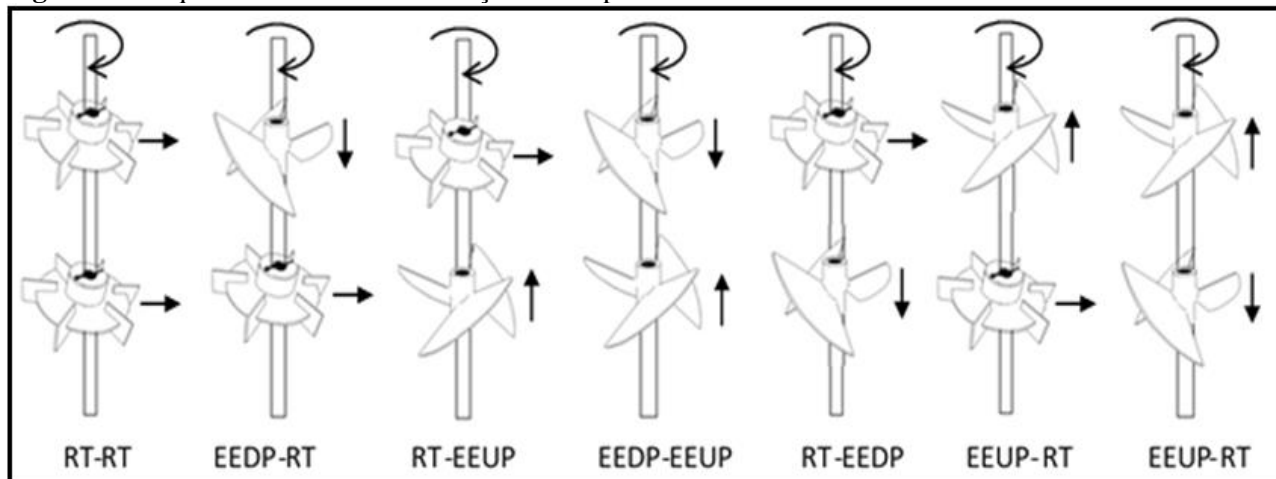
Tanto para as medidas de k_{LA} como para o consumo de potência cada associação de impelidores foi testada sob diferentes condições de agitação e aeração. Para tal foi empregado um planejamento experimental fatorial 2^2 , sendo testadas as frequências de rotação (N) de 600; 800 e 1000 rpm e vazão específica de alimentação de ar (ϕ) de 0,4; 0,8 e 1,2 vvm. Como fase líquida foi utilizada solução de goma xantana (Grinsted ULTRA 80, Danisco Brasil Ltda) de 2,5 kg.m⁻³ com densidade de 996 kg.m⁻³, sendo os parâmetros reológicos K e n à 32°C, respectivamente iguais a 1,04 Pa.sⁿ e 0,26, o

que caracteriza um comportamento reológico pseudoplástico.

As diferentes associações testadas, formadas pelos impelidores Rushton (RT) e

pelos impelidores orelha de elefante de fluxo descendente (EEDP) e ascendente (EEUP), são mostradas na Figura 4.

Figura 4 – Esquema de todas as associações de impelidores testadas.



Fonte: Adaptado Corrêa (2014).

2.3 Medidas do consumo de potência e do coeficiente de transferência de oxigênio (k_La).

O consumo de potência foi determinado experimentalmente como descrito no trabalho de Badino, Barboza e Hokka (1994), sendo a potência (P) calculada como produto entre o torque (T) requerido para a agitação do fluido e a velocidade angular (ω). O comprimento do braço (br) utilizado foi de 0,175 m e a força (F) foi medida por um dinamômetro.

O valor do coeficiente de transferência de massa foi determinado através de software desenvolvido por Jesus et al. (2007). O software utiliza medidas experimentais da concentração de oxigênio dissolvida com o tempo, obtidas através de ensaio degrau pelo método dinâmico da pressão (BLAŽEJ et al, 2004) e o método de Levenberg-Marquardt como algoritmo de otimização.

Além disso o trabalho correlacionou esses dois parâmetros através da Equação 1, que expressa a eficiência energética da transferência de oxigênio das associações, ou seja, qual associação transfere mais oxigênio por unidade de consumo de potência.

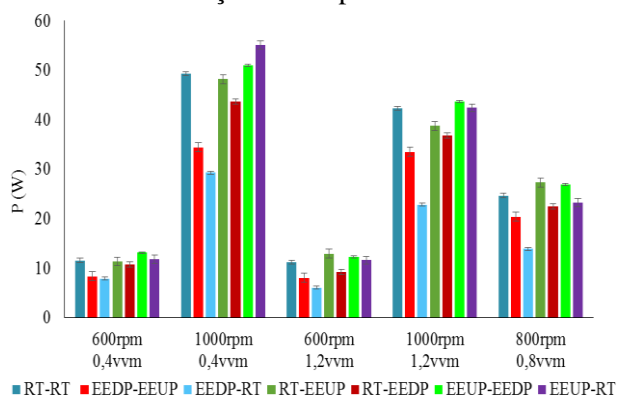
$$\varepsilon = \frac{k_L a}{P} \quad (1)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a faixa de frequência de rotação utilizada no estudo, medidas de k_La e de consumo de potência foram obtidas em regime turbulento de agitação, com número de Reynolds modificado superior a 10^4 em toda a faixa de trabalho. Os erros experimentais foram calculados através de triplicata no ponto central.

Os resultados de consumo de potência para todas as associações testadas e para todos os pontos do planejamento experimental são mostrados na Figura 5.

Figura 5 – Consumo de potência para as diferentes associações de impelidores.

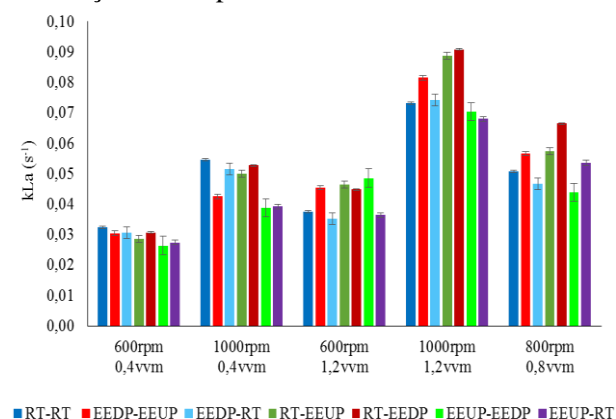


Fonte: Autor (2015).

Pode-se verificar através da Figura 5 que as associações de impelidores que apresentaram os menores consumos de potência foram as EEDP-RT e EEDP-EEUP, apresentando reduções de 45 e 30% respectivamente, quando comparadas ao sistema com o sistema padrão composto por duas turbinas Rushton (RT-RT). Esse resultado está de acordo com o observado por Bustamante (2013) e Zhu et al. (2009), que utilizando impelidores EEs, porém individualmente, constataram um menor número de potência para o modelo EEDP.

Os valores de k_{LA} para todas as associações nos pontos do planejamento experimental são mostrados na Figura 6.

Figura 6 – Valores de k_{LA} para as diferentes associações de impelidores.



Fonte: Autor (2015).

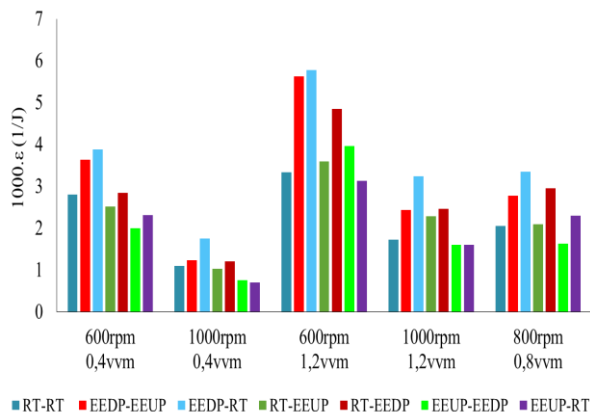
Com relação à transferência de oxigênio, pode-se observar bons resultados para todas as associações testadas, sendo que nos pontos do planejamento com maior aeração o k_{LA} foi maior nas associações que continham algum dos impelidores EE. Na condição de 800 rpm e 0,8 vvm, a associação RT-EEDP apresentou valor de k_{LA} 31% maior quando comparado à associação RT-RT. Tal fato pode ser atribuído a um escoamento diferenciado produzido pelo escoamento axial do impelidor EEDP em conjunto com o escoamento radial do impelidor RT.

Druzinec et al. (2015) em estudo realizado com aspersor de microbolhas constatou que o impelidor EEDP apresentou valores mais elevados de k_{LA} que a turbina Rushton. Tal fato foi atribuído a uma maior retenção gasosa devido as microbolhas seguirem um caminho circular no escoamento axial causado pelo impelidor.

Outra análise que pode ser feita para explicar a razão da associação de impelidores RT-EEDP apresentar melhores resultados de k_{LA} é o fato do impelidor RT gerar uma maior área interfacial de troca de massa (a), pois a geometria desse impelidor favorece a fragmentação das bolhas e do impelidor EEDP definir um padrão de escoamento que favorece a retenção de bolhas no sistemas, aumentando retenção gasosa.

Por fim, consumo de potência e k_{LA} foram avaliados em conjunto através da eficiência, dada pela Equação 1. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 7.

Figura 7 –Eficiência energética da transferência de oxigênio para as diferentes associações de impelidores.



Fonte: Autor (2015).

Pela análise da eficiência energética de transferência de oxigênio é possível verificar que as associações EEDP-RT, EEDP-EEUP e RT-EEDP foram as melhores, sendo que a vantagem da associação EEDP-RT deveu-se a seu menor consumo de potência e a vantagem da associação RT-EEDP a sua maior transferência de oxigênio.

Em termos de eficiência energética de transferência de oxigênio as vantagens das associações EEDP-RT, EEDP-EEUP e RT-EEDP chegam a ser, respectivamente, 87, 68 e 45% em relação ao sistema com duas turbinas Rushton (RT-RT).

Também foi possível analisar as influências exercidas pelos dois parâmetros estudados (N e ϕ) e a interação entre eles sobre o k_{La} e o consumo de potência. Essa análise foi feita através de um software estatístico e com base no planejamento experimental realizado. O efeito de cada parâmetro, bem como a informação se ele é significativo ou não, podem ser visualizados na Tabela 1 para o consumo de potência e na Tabela 2 para o k_{La} .

Tabela 1 - Análise dos efeitos das variáveis independentes frequência de rotação (N) e vazão específica de alimentação de ar (ϕ) na variável dependente consumo de potência.

Associações	N	Φ	N e Φ
EEDP-RT	19,1*	-4,1*	-2,3*
EEDP-EEUP	25,7*	-0,6	-0,3
RT-EEDP	30,2*	-4,2*	-2,6*
RT-EEUP	31,3*	-4	-5,5*
RT-RT	34,4*	-3,3*	-3,3*
EEUP-RT	37,0*	-6,5*	-6,2*
EEUP-EEDP	34,7*	-4,1*	-3,2*

Fonte: Autor (2015). *indica que o efeito é significativo em relação a variável resposta.

Tabela 2 - Análise dos efeitos das variáveis independentes frequência de rotação (N) e vazão específica de alimentação de ar (ϕ) na variável dependente k_{La} .

Associações	N	Φ	N e Φ
EEDP-RT	0,030*	0,014*	0,009*
EEDP-EEUP	0,024*	0,027*	0,012*
RT-EEDP	0,034*	0,026*	0,012*
RT-EEUP	0,032*	0,028*	0,010*
RT-RT	0,029*	0,012*	0,007*
EEUP-RT	0,022*	0,019*	0,010*
EEUP-EEDP	0,017*	0,027*	0,005

Fonte: Autor (2015). *indica que o efeito é significativo em relação a variável resposta.

Pela Tabela 1 pode-se verificar que para todas as associações de impelidores estudadas, o parâmetro que mais exerce influência no consumo de potência é a frequência de agitação, sendo essa influência positiva. A influência da aeração é negativa para todos os casos ou insignificante para algumas configurações, como é o caso da associação EEDP-EEUP e RT-EEUP. Com relação ao k_{La} (Tabela 2), as influências da agitação e da aeração são similares quando um dos impelidores EE encontra-se na base do reator, distanciando-se quando o impelidor Rushton encontra-se na base. Para as

associações EEDP-EEUP e EEUP-EEDP, a influência da aeração (ϕ) no k_{LA} foi maior do que a da agitação (N).

Estes resultados indicam que os impelidores EE sofrem maior influência da aeração que os impelidores Rushton para a variável k_{LA} , o que pode ser um resultando interessante dependendo do processo em que os impelidores sejam utilizados.

4 CONCLUSÕES

Através do presente estudo foi possível concluir, levando em consideração o consumo de potência e a transferência de oxigênio, que a melhor associação de impelidor testada foi a EEDP-RT, apresentando eficiência até 87% maior que à associação convencional RT-RT, porém tal associação não apresentou os maiores valores de k_{LA} , sendo esses apresentados pela associação RT-EEDP, com valores até 31% maiores que a associação RT-RT. De forma geral os impelidores EEs se mostraram satisfatório em relação a transferência de oxigênio e o consumo de potência, o que mostra que tais impelidores possuem um bom potencial para serem utilizados em bioprocessos envolvendo microrganismos filamentosos aeróbios.

NOMENCLATURA

RT: Impelidor Rushton.

EE: Impelidor orelha de elefante.

EEUP: Impelidor orelha de elefante de escoamento ascendente.

EEDP: Impelidor orelha de elefante de escoamento descendente.

k_{LA} : coeficiente de transferência de oxigênio (s^{-1}).

N: Frequência de rotação (rpm).

Φ : Vazão específica de alimentação de ar (vvm).

K: Índice de consistência ($Pa.s^n$).

n: Índice de comportamento de escoamento.

P: Potência consumida (W).

T: Torque.

ω : Velocidade angular ($rad.s^{-1}$).

br: Comprimento braço/distância entre o motor e o dinamômetro (m).

F: Força (N).

ϵ : Eficiência (1/J).

REFERÊNCIAS

Badino, A.C., Barboza, M., Hokka, C.O., 1994. Power input and oxygen transfer in fed-batch penicillin productions process. **Advances in Bioprocess Engineering**. 157-162.

Blažej, M.; Juraščík, M.; Annus, J.; Markoš, J., 2004. Measurement of mass transfer coefficient in an airlift reactor. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**. 79, 1405-1411.

Bustamante, M. C. C. **Transferência de oxigênio e Cisalhamento em Biorreator Convencional com Impelidores EE**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

Corrêa, L.J., Badino, A.C. Cruz, A.J.G., 2014. Avaliação de configurações de impelidores na hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Florianópolis.

Druzinec, D., Salzig, D., Kraume, M., Cermak, P., 2015. Micro-bubble aeration in turbulent stirred bioreactors. **Chemical Engineering Science**. 126, 160-168.

Ghotli, R.A., Aziz, A.R.A., Ibrahim, S., Baroutian, S., Arami-Niya, A., 2013. Study of various curved-blade impeller geometries on power consumption in stirred vessel. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 44, 192-201.

Labik, L., Vostal, R., Moucha, T., Rejl, F., Kordac, M., 2014. Volumetric mass transfer coefficient in multiple-impeller gas-liquid contactors. **Chemical Engineering Journal**. 240, 55-61.

Mirro, R., Voll, K., 2009. A Guide to Impeller Selection for Stirred-Tank Bioreactors. **BioProcess International**. 7, 52-57.

Patel, N., Choy, V., Malouf, P., Thibault, J., 2009. Growth of *Trichoderma reesei* RUT C-30 in stirred tank and reciprocating plate bioreactors. **Process Biochemistry**. 44, 1164-1171.

Zhu, H., Nienow, A.W., Bujalski, W., Simmons, M.J.H., 2009. Mixing studies in aerated bioreactor with an up- or a down-pumping 'Elephant Ear' agitator. **Chemical Engineering Research and Design**. 87, 307-317.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, PPGEQ-UFSCar e à Embrapa Instrumentação pelos apoios.