

**Avaliação de parâmetros de desempenho em reator convencional: aplicação em processos industriais**

**Evaluation of performance parameters in conventional reactor: application in industrial processes**

**Evaluación de parámetros de rendimiento en reactor convencional: aplicación en procesos industriales**

**Carlos Cesar Costa Júnior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4609-3524>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: [carlo94costa@gmail.com](mailto:carlo94costa@gmail.com)

**Luciano Jacob Corrêa**

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: [luciano.correa@deg.ufla.br](mailto:luciano.correa@deg.ufla.br)

Recebido: 12/11/2018 | Revisado: 03/12/2018 | Aceito: 22/12/2018 | Publicado: 28/12/2018

**Resumo**

Agitação e mistura são operações unitárias essenciais na maioria dos processos industriais e têm por objetivo a obtenção de matérias primas ou produtos uniformes. Quando um sistema de agitação e mistura não está corretamente projetado e controlado obtém-se misturas indesejáveis, o que pode acarretar em perdas de produto e aumento no custo do processo. Portanto, o objetivo deste estudo é avaliar um sistema de agitação e mistura que possa gerar dados experimentais para o auxílio de pesquisadores e projetistas de impelidores industriais. Este sistema foi avaliado utilizando quatro diferentes configurações de impelidores (Rushton-Rushton; Rushton-Smith; Smith-Rushton e Smith-Smith) com base em dois parâmetros de desempenho fundamentais do sistema de agitação: tempo de mistura e consumo de energia. O tempo de mistura foi determinado pelo método de pulso de temperatura e o cálculo do consumo de potência foi obtido através de equações da literatura. Avaliou-se os parâmetros de desempenho em três diferentes frequências de rotação: 300, 500 e 700 rpm. A configuração (4) apresentou uma redução no tempo de mistura de 36% (300 rpm), 63% (500 rpm) e 79% (700 rpm) quando comparada com a configuração padrão (1). A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que a configuração (4), obteve os menores tempo de mistura e menor

consumo de energia de todas as configurações avaliadas. Além disso, pode-se determinar que a frequência de agitação de 500 rpm foi a mais adequada para este estudo.

**Palavras-chave:** Agitação e mistura; Impelidores; Tempo de mistura; Consumo de energia; Aumento de escala.

### **Abstract**

When a stirring and mixing system is not correctly designed and controlled, undesirable mixtures are obtained, which can lead to product losses and increased process costs. Therefore, the objective of this study is to evaluate a system of agitation and mixing that can generate experimental data for the aid of researchers and designers of industrial impellers. This system was evaluated using four different configurations of impellers (Rushton-Rushton; Rushton-Smith; Smith-Rushton and Smith-Smith) based on two fundamental performance parameters of the stirring system: mixing time and energy consumption. The mixing time was determined by temperature pulse method and the calculation of the power consumption was obtained from the literature equations. The performance parameters were evaluated in three different rotation frequencies: 300, 500 and 700 rpm. The configuration (4) showed a reduction in the mixing time of 36% (300 rpm), 63% (500 rpm) and 79% (700 rpm) when compared to the standard configuration (1). From the obtained results, it was possible to conclude that the configuration (4), obtained the lowest mixing time and lower power consumption of all the configurations evaluated. In addition, it can be determined that the stirring frequency of 500 rpm was the most adequate for this study.

**Keywords:** Agitation and mixing; Impellers; Mixing time; Energy consumption; Scale-up.

### **Resumen**

Agitación y mezcla son operaciones unitarias esenciales en la mayoría de los procesos industriales y tienen como objetivo la obtención de materias primas o productos uniformes. Cuando un sistema de agitación y mezcla no está correctamente proyectado y controlado se obtiene mezclas indeseables, lo que puede acarrear en pérdidas de producto y aumento en el costo del proceso. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es evaluar un sistema de agitación y mezcla que pueda generar datos experimentales para el auxilio de investigadores y proyectistas de impulsores industriales. Este sistema se ha evaluado utilizando cuatro diferentes configuraciones de impulsores (Rushton-Rushton, Rushton-Smith, Smith-Rushton y Smith-Smith) basados en dos parámetros de rendimiento fundamentales del sistema de agitación: tiempo de mezcla y consumo de energía. El tiempo de mezcla fue determinado por

el método de pulso de temperatura y el cálculo del consumo de potencia fue obtenido a través de ecuaciones de la literatura. Se evaluaron los parámetros de rendimiento en tres diferentes frecuencias de rotación: 300, 500 y 700 rpm. La configuración (4) disminuyó el tiempo de 36% de mezcla (300 rpm), 63% (500 rpm) y 79% (700 rpm) en comparación con el valor predeterminado (1). A partir de los resultados obtenidos, fue posible concluir que la configuración (4), obtuvo los menores tiempo de mezcla y menor consumo de energía de todas las configuraciones evaluadas. Además, se puede determinar que la frecuencia de agitación de 500 rpm fue la más adecuada para este estudio.

**Palabras clave:** Agitación y mezcla; impulsores; Tiempo de mezcla; Consumo de energía; Aumento de escala.

## 1. Introdução

As operações unitárias de agitação e mistura são essenciais na maioria dos processos industriais, tais como na área de alimentos, petroquímica, farmacêutica, entre outros e têm por finalidade a obtenção de matérias primas e/ou produtos uniformes destinados ao mercado de uma maneira geral. A necessidade de processos cada vez mais inteligentes, eficientes, rápidos e controlados vem propiciando aos pesquisadores desta área grandes oportunidades na geração de trabalhos científicos, em função do volume de produtos e processos disponíveis para estudos, além do grande número de variáveis a serem observadas nas operações de agitação e mistura (SOUZA, 2011). Uma revisão da literatura sobre o tema revela a existência de um grande potencial, ainda pouco explorado, para a otimização de processos industriais submetidos à agitação, cujos resultados técnicos-econômicos podem permitir a indústria significativos ganhos de qualidade e de produtividade, bem como a diminuição de custos do processo.

O desempenho do processo depende fortemente do grau de homogeneidade obtido durante a etapa de agitação e mistura. Quando o sistema de agitação e mistura não está corretamente projetado e controlado, obtêm-se misturas com flutuações significativas nas suas características físicas e/ou químicas que são indesejáveis e acarretam perdas de lotes inteiros na produção, aumentando o custo e o impacto ambiental do processo em questão (GARAVITO, 2013).

Devido a isto, o tipo e a geometria dos impelidores são determinantes no processo de agitação e mistura, devendo ser avaliado e adequadamente projetado para cada tipo de processo. Segundo Souza (2011), uma das maneiras de avaliar um projeto de agitador é relacionar a eficiência de mistura do impelidor (que leva a minimizar os tempos de processos)

com o consumo de potência que o(s) impelidor(es) gera(am). De acordo com Joaquim Júnior et al. (2012), a escolha da concepção mais adequada do sistema, do ponto de vista técnico-econômico, deve basear-se nos seguintes fatores: investimento inicial, consumo de potência, tempo de processo e uniformidade da mistura. Nem sempre é possível que todos esses fatores sejam otimizados e a importância de cada um deles deve ser ponderada ao se levar em consideração a peculiaridade de cada processo industrial.

A importância da correta seleção e aplicação de um sistema de agitação pode ser exemplificada por estudos de casos encontrados na literatura. Joaquim Júnior et al. (2012) descreveram um estudo de caso ocorrido em indústrias de processamentos de suco concentrado, onde os tradicionais impelidores tipo âncora, de fluxo tangencial, foram gradativamente substituídos por impelidores de fluxo axial. Posteriormente à etapa de concentração, o suco é transferido para tanques refrigerados dotados de sistemas de agitação, onde os diferentes lotes processados são homogeneizados. A utilização dos impelidores tipo âncora nestes equipamentos tornou-se muito comum, uma vez que os mesmos promovem a movimentação lenta do fluido, com baixa tendência à formação de vórtices ou turbulências, o que diminui a geração de espuma ou aeração do produto e sua consequente oxidação.

Devido à sua simplicidade e às características de geração de fluxo axial, o uso de impelidores de quatro pás retas inclinadas a 45° permitiu a obtenção de inúmeras vantagens quando comparadas aos impelidores tipo âncora. Notou-se neste estudo de caso, que o consumo de energia do impelidor tipo âncora foi 90% maior do que a configuração de impelidores de pás retas. Além da influência direta da menor potência instalada do impelidor tipo pás retas inclinadas a 45°, o consumo de energia foi bastante reduzido quando o tempo de processamento ou homogeneização do suco foi levado em consideração, uma vez que o mesmo foi cinco vezes menor com o uso de impelidores de pás retas do que com o uso do impelidor tipo âncora.

Corrêa et al. (2016) investigaram quatro configurações de impelidores (formadas por impelidores do tipo turbina Rushton (RT) e do tipo Elephant Ear de fluxo ascendente (EEUP) e Elephant Ear de fluxo descendente (EEDP)) durante a etapa de hidrólise na produção de etanol de segunda geração (E2G), etapa esta que é o principal gargalo do processo para tornar a produção de E2G economicamente viável. Os autores mostraram que a utilização da configuração formada pelos impelidores EEDP-EEUP resultou em uma redução no consumo de energia de 135% quando comparada com a configuração padrão, formada pelos impelidores RT-RT. Ao comparar o parâmetro tempo de mistura, novamente, a utilização dos impelidores EEDP-EEUP mostrou-se bastante satisfatória. Obteve-se uma redução no tempo

de mistura de aproximadamente onze vezes em comparação a configuração RT-RT com a mesma carga de sólidos e a mesma frequência de rotação.

Os resultados obtidos nos estudos anteriormente descritos reforçam a importância da correta seleção e dimensionamento de sistemas de agitação e mistura. Uma escolha inadequada pode resultar em um maior investimento inicial, o qual ainda pode ser associado a um maior consumo de energia e à ineficiência do processo. Vale destacar que, em processos que envolvam produtos com alto valor agregado, torna-se secundária a importância do investimento inicial e do consumo de energia diante da importância do atendimento dos requisitos de processo.

Diante da grande importância que as operações de agitação e mistura apresentam nos processos industriais, este estudo teve como objetivo avaliar um sistema de agitação e mistura e gerar dados experimentais, cuja análise e interpretação tivessem como finalidade a obtenção de resultados que auxiliem pesquisadores e projetistas de impelidores industriais. As informações sobre o desempenho dos impelidores são de grande importância para concepção e o escalonamento de projetos de plantas industriais.

Dessa forma, neste estudo são analisados os parâmetros fundamentais do sistema de agitação, em diferentes frequências de agitação, para fluidos Newtonianos, com o intuito de obter informações relacionadas ao tempo de mistura e consumo de energia das configurações de impelidores analisadas neste trabalho.

## **2. Metodologia**

Para a realização dos experimentos utilizou-se um fluido newtoniano, a água ( $\mu=0,000891 \text{ kg/m.s}$  e  $\rho=997,0 \text{ kg/m}^3$ ). Este fluido foi escolhido por ser de fácil acesso e também por simular adequadamente a reologia de diversos fluidos usados na indústria.

Para a execução deste projeto de pesquisa foram realizadas pequenas adaptações no biorreator (TE-2003/3.0 EI, TECNAL) disponível no Laboratório de Bioquímica Industrial em Bioprocessos (IRN/UNIFEI), a fim de que pudesse ser realizada as medidas de tempo de mistura. O Biorreator em questão apresentava 125 mm de diâmetro e a altura do líquido (HL) analisado foi de 125 mm. Na Figura 1, tem-se a foto da unidade experimental e de todos os aparatos utilizados.

**Figura 1:** Representação esquemática da unidade experimental.



**Fonte:** Elaboração própria

Foram utilizados dois tipos de impelidores: turbina do tipo Rushton ( $D_i=40\text{mm}$ ) e turbina do tipo Smith de pás côncavas ( $D_i = 40 \text{ mm}$ ). Com esses dois tipos de impelidores, foi possível analisar quatro diferentes configurações, conforme mostra a Figura 2.

**Figura 2:** Configurações utilizadas no biorreator.



**Fonte:** Elaboração própria.

Vale ressaltar que utilizou-se configurações que englobam dois tipos de impelidores no mesmo eixo árvore. Sendo assim, com estes dois tipos de impelidores foi possível a avaliação de quatro diferentes configurações, foram elas: Configuração 1: Rushton – Rushton; Configuração 2: Rushton – Smith; Configuração 3: Smith - Rushton e; Configuração 4: Smith – Smith.

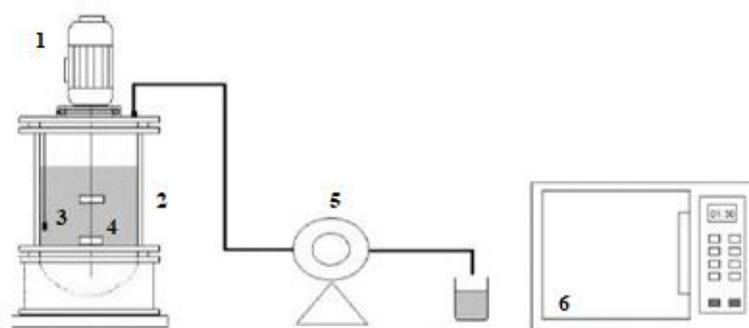
No sistema de agitação proposto, avaliou-se dois dos principais parâmetros de um sistema de agitação e mistura: o tempo de mistura e o consumo de energia. O volume de líquido avaliado foi de 1,6 litros, onde fez-se o uso de três faixas de frequência de rotação dos impelidores: 300, 500 e 700 rpm.

O tempo de mistura ( $t_m$ ) foi determinado pelo método de pulso de temperatura. Este método foi escolhido pela sua simplicidade e precisão na obtenção dos dados. Retirou-se em torno de 10% do volume (160 mL) de fluido do interior do reator que então foi aquecida em um forno de micro-ondas por 90 segundos (CORRÊA et al., 2016). Após isto, o fluido foi novamente colocado para dentro do reator.

O  $t_m$  foi obtido como sendo o tempo necessário para que o valor da temperatura atingisse 95% do seu valor final (TAN et al., 2011). A medida da temperatura foi realizada com o auxílio de um termopar localizado próximo à parede do reator em uma altura  $Z = HL/2$  do fundo do reator.

Na Figura 3, tem-se o esquema detalhado para a obtenção do tempo de mistura pelo método de pulso de temperatura.

**Figura 3:** Representação esquemática do aparato experimental empregado para a determinação do tempo de mistura. (1) Motor; (2) Reator; (3) Termopar; (4) Impelidores (5) Bomba peristáltica; (6) Micro-ondas.



**Fonte:** Adaptado de Corrêa, 2016.

### 3. Resultados e Discussão

Para a escolha da melhor configuração e da rotação mais adequada a ser utilizada no processo, avaliou-se três frequências de agitação: 300, 500 e 700 rpm. A Tabela 1 apresenta os valores experimentais de tempo de mistura obtidos neste estudo. Estes experimentos foram obtidos em duplicata.

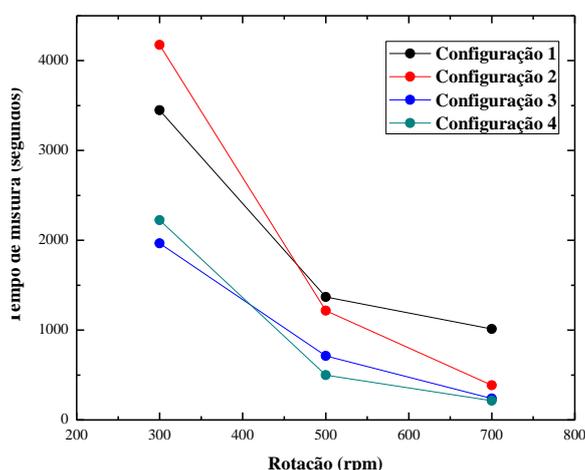
**Tabela 1:** Tempo de mistura ( $t_{m95\%}$ ) médio para cada rotação, utilizando a água como fluido.

Tempo de mistura (segundos)			
Configuração	300 rpm	500 rpm	700 rpm
Configuração 1	3468,6	1368,0	1011,6
Configuração 2	4175,4	1215,6	384,6
Configuração 3	1930,8	712,8	237,6
Configuração 4	2223,0	498,6	213,6

Configuração 1: Rushton-Rushton; Configuração 2: Rushton-Smith; Configuração 3: Smith-Rushton; Configuração 4: Smith-Smith.

A Figura 4 apresenta o tempo de mistura para as diferentes configurações de impelidores e rotações utilizadas neste estudo.

**Figura 4:** Tempo de mistura obtidos para as configurações estudadas.



Como esperado, à medida que aumenta a frequência de agitação dos impelidores, diminui o tempo de mistura. Pelos dados apresentados na Tabela 1 bem como na Figura 4, a configuração (3), apresentou uma redução no tempo de mistura de 44% (300 rpm), 48% (500 rpm) e 76% (700 rpm) quando comparada com a Configuração (1) (Padrão), formada pelos impelidores Rushton – Rushton. A configuração (4) apresentou uma redução no tempo de mistura de 36% (300 rpm), 63% (500 rpm) e 79% (700 rpm). Por outro lado, a configuração (2), não apresentou resultados tão satisfatórios. Na rotação de 300 rpm apresentou um aumento de 20%. Já na rotação de 500 rpm houve uma redução de apenas 11% e na rotação de 700 rpm apresentou diminuição de 62% no tempo de mistura.

Pelos dados apresentados, pode-se observar que apenas a troca de posição entre os impelidores (Rushton e Smith) gerou uma diferença significativa no tempo de mistura do processo. A configuração 3 (Smith – Rushton) apresentou uma redução no tempo de mistura

( $t_m$ ) de 53,7% para 300 rpm, de 41,4% para 500 rpm e 38,2% para 700 rpm, quando comparada a configuração 2 (Rushton – Smith). Isso demonstra a importância de se avaliar não apenas os melhores impelidores disponíveis, mas também a melhor configuração possível formada por estes agitadores.

A configuração (1) obteve os piores resultados, apresentando tempo de mistura muito superiores as demais configurações. Isso demonstra que o Rushton, apesar de ser um impelidor clássico e muito utilizado em diferentes processos, é ineficiente na operação de agitação e mistura quando avalia-se o tempo de mistura.

As configurações 2, 3 e 4 estavam com ao menos um impelidor Smith, desta maneira, foi possível notar que o impelidor Smith reduziu o tempo de mistura de maneira significativa quando o mesmo estava acoplado na parte superior do eixo. Isso provavelmente ocorre devido as características de fluxo provocadas pelas pás côncavas deste impelidor.

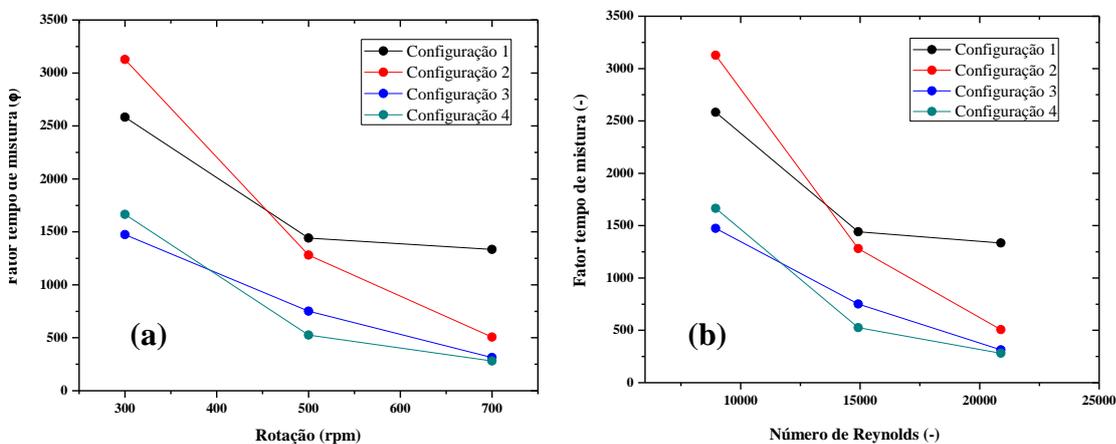
Este fator é proporcional ao tempo de mistura e a rotação do impelidor. Assim como no tempo de mistura, o objetivo dos processos industriais é a obtenção do menor fator tempo de mistura possível durante o processo.

O fator tempo de mistura ( $\Phi$ ) foi determinado pela Equação (1), proposta por Norwood e Metzner (1960):

$$\Phi = \frac{t_m (N \cdot D_i^2)^{2/3} \cdot g^{1/6} \cdot D_i^{1/2}}{H_L^{1/2} \cdot D_T^{3/2}} \quad (\text{equação 1})$$

Na Figura 5 pode observar o fator tempo de mistura para as diferentes configurações avaliadas.

**Figura 5:** Fator tempo de mistura ( $\Phi$ ) para as configurações avaliadas. (a) Fator tempo de mistura *versus* rotação. (b) Fator tempo de mistura *versus* número de Reynolds.



O fator tempo de mistura é utilizado como um parâmetro para a realização de “*scale-up*” de um sistema de agitação. Nota-se na Figura 5(b), que o fator tempo de mistura começou a se estabilizar, devido ao sistema estar no regime turbulento ( $>1 \times 10^4$ ). Este comportamento foi descrito por Bailey e Ollis (1986) e Corrêa (2016).

Uma consideração importante no projeto de um sistema de agitação é a potência transferida do impelidor para o fluido.

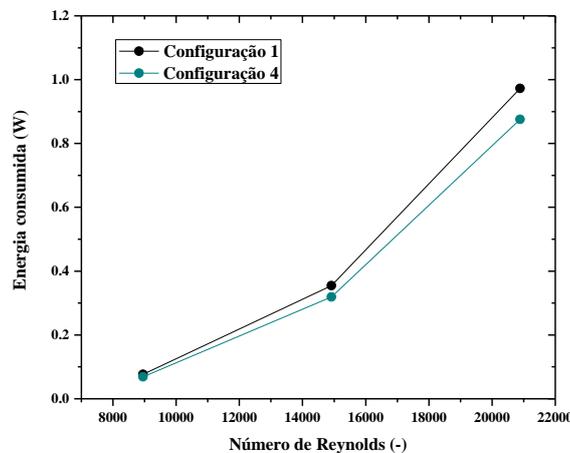
A potência consumida pelos impelidores foi obtida com auxílio da Equação 2, onde se encontrou o número de Reynolds. Então, com o número de Reynolds encontrou-se o número de potência ( $N_p$ ) por intermédio dos diagramas de Número de potência *versus* número de Reynolds encontrados na literatura para os tipos de impelidores avaliados. Por fim, o número de potência encontrado foi utilizado na Equação 3 para o cálculo da potência de agitação do sistema em questão. Como havia dois impelidores no eixo, a potência foi multiplicada por dois, para se obter a potência total consumida.

$$Re = \frac{\rho \cdot N \cdot D_i^2}{\mu} \quad (\text{equação 2})$$

$$N_p = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D_i^5} \quad (\text{equação 3})$$

Os resultados obtidos para o consumo de potência das configurações (1) e (4) podem ser visualizados na Figura 6.

**Figura 6:** Consumo de potência para as configurações (1) e (4).



A Figura 6 mostra um comparativo do consumo de potência entre duas configurações analisadas: a configuração padrão (1), formada pelos impelidores turbina Rushton e a configuração 4, formada pelos impelidores turbina Smith.

A partir da Figura 6, é possível observar que ao aumentar a frequência de agitação (e consequentemente o número de Reynolds) a diferença no consumo de potência começa a ser mais acentuada entre as configurações.

Portanto, a partir dos dados obtidos fica evidente que a melhor configuração para operar um fluido com as características semelhantes a da água foi a configuração (4) devido a esta apresentar os menores tempos de mistura e o menor consumo de potência. Avaliando os dados da configuração (4), a frequência de agitação a ser escolhida foi de 500 rpm. Apesar da rotação mais alta (700 rpm) apresentar os tempos de mistura menores e, consequentemente, uma melhor mistura, estas rotações consomem mais energia, uma vez que o consumo de potência (P) é proporcional a  $N^3$  (Equação 3).

#### 4. Conclusões

Na literatura é possível encontrar uma grande variedade de agitadores, o que reforça a necessidade de se encontrar uma configuração de impelidores mais adequada para a aplicação desejada. Essa eficiência está relacionada com um menor tempo de mistura e um menor consumo de energia.

Não é apenas o tipo de impelidor que afeta a eficiência do processo de mistura. Como os dados mostraram, a simples troca de posição entre dois impelidores gerou uma redução no tempo de mistura.

A configuração 4 (Smith - Smith) se mostrou mais eficiente que as demais configurações avaliadas, uma vez que obteve os menores tempos de mistura bem como os menores valores de consumo de potência.

Portanto, este estudo objetivou a descrição de um protocolo para a escolha da melhor configuração (configuração 4) de impelidores bem como a melhor rotação (500 rpm) a ser utilizada no processo cujo o fluido é a água ou com características similares.

#### Referências

BAILEY, James, OLLIS, Davis. - **Biochemical Engineering Fundamentals**. 2ed., McGraw-Hill, New York, 1986.

CORRÊA, Luciano Jacob, BADINO, Alberto Colli, CRUZ, Antonio José Gonçalves. - Mixing design for enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse: methodology for selection of impeller configuration. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, 39:285–294, 2016.

GARAVITO, Ana Milena Torres - **Determinação experimental do consumo de potência para impelidores âncora e helicoidal usando fluidos pseudoplásticos de alta viscosidade**. UNICAMP, Dissertação de Mestrado, 81p, 2013.

JOAQUIM JUNIOR, Celso Fernandes, CEKINSKI, Efrain, NUNHEZ, José Roberto, URENHA, Luiz Carlos – **Agitação e mistura na indústria**. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2012.

MAGELLI, Franco, MONTANTE, Giuseppina, PINELLI, Davide, PAGLIANTI, Alessandro. - **Mixing time in high aspect ratio vessels stirred with multiple impellers**. Chemical Engineering Science, 101:712-720, 2013.

SOUZA, Edimilson - **Consumo de potência para impelidores rápidos aplicados em processos de agitação e mistura**. UNICAMP, Tese de Doutorado, 778p, 2011.

TAN, Rung-Kai., EBERHARD, Werner, BÜCHS, Jochen - **Measurement and characterization of mixing time in shake flasks**. Chemical Engineering Science, 66:440-447, 2011.

NORWOOD, K.W., METZNER, A.B. – **Flow patterns and mixing rates in agitated vessels**. A. I. Ch. E. J. 6:432-437, 1960.