

## 1) Resumo

Os tanques com agitação e mistura são equipamentos que podem ser utilizados em diversos processos químicos e petroquímicos. O consumo de potência pelo impulsor mecânico é o principal parâmetro de projeto dessas unidades, o qual depende da geometria do tanque, da reologia e propriedades físicas do fluido e da presença de chicanas. Particularmente, as chicanas são úteis para eliminação de vórtices, melhorando a qualidade da mistura, de modo que são colocadas 4 placas verticais de forma diametralmente opostas entre si. Não foi encontrado estudos no que concerne a inserção de orifícios ao longo do comprimento vertical da chicana e a sua influência sobre o consumo de potência e na eficiência da mistura. Logo, o presente estudo visou analisar o consumo de potência na agitação de fluidos newtonianos em tanque com impulsor mecânico equipado com uma chicana padrão e uma chicana modificada com orifícios. A unidade experimental foi constituída de um tanque de acrílico com volume útil de 10 litros, um impulsor axial com 4 pás inclinadas a 45°, um impulsor radial tipo turbina com 6 pás planas, um motor elétrico com potência de 1 hp em balanço sobre rolamentos, um conjunto de quatro chicanas padrão e um conjunto de chicanas modificada com orifícios. Os fluidos utilizados foram água, solução de sacarose a 20% e solução de sacarose a 50%, ambas na base mássica. Cada fluido foi submetido a uma faixa de rotação entre 100 rpm e 1000 rpm em função do tipo de impulsor mecânico e do tipo de chicana, totalizando 180 experimentos. Os resultados obtidos foram tratados matematicamente calculando-se o número de potência e o número de Reynolds em cada experimento. A avaliação dos resultados foi realizada graficamente através da plotagem do número de potência em função do número de Reynolds. Pode-se concluir que não houve diferença significativa no consumo de potência entre os impulsores com a chicana padrão e com a chicana modificada. No entanto notou-se que o impulsor axial consome aproximadamente 50% a menos de potência quando comparado com o impulsor radial. Desse modo, a melhor situação de projeto ocorre com o uso das chicanas modificadas com menor massa e com o impulsor axial.

## 2) Introdução

Diversas operações nas indústrias químicas e petroquímicas, como destilação, extração, troca de calor, flotação e diluição, empregam tanques com impulsores mecânicos. Pode-se dizer, que após as bombas de deslocamento de fluido e as tubulações, os tanques são os equipamentos mais presentes nas plantas industriais (Rosa, 2017). O projeto de um tanque com agitação envolve diversos parâmetros, mas os principais, comuns a quase todos os processos supracitados, são o consumo de potência pelo impulsor mecânico e o tempo de mistura. Em uma situação ideal, a melhor situação seria obter o menor tempo de mistura possível (sem degradar as substâncias em agitação) com o menor consumo de potência (Haque, Mahmud e Roberts, 2006).

No entanto, tal situação é muito difícil de ocorrer pelo seguinte fato: tempos de mistura muito rápidos, inferiores a 10 segundos, necessitam de uma agitação vigorosa do impulsor mecânico, de forma que isso irá impactar diretamente o consumo de potência, principalmente, se o fluido possuir uma elevada massa específica e uma grande viscosidade dinâmica (Paul e Atiemo-Ubeng, 2004). Em relação a geometria do sistema de agitação, as chicanas tem um papel fundamental pois reduzem os vórtices e melhoram a qualidade da mistura. As chicanas são placas verticais em geral (quatro) colocadas de forma diametralmente opostas entre si na parede interna do tanque. A desvantagem do uso desses acessórios está no aumento da resistência do fluido ao movimento, necessitando um gasto maior de energia, porém, ganha-se na qualidade da mistura (Chiara e Brunazzi, 2008).

Um dos grandes problemas em tanques industriais é concernente ao peso dessas unidades que podem chegar a milhares de toneladas, o que causa problemas estruturais e um elevado custo de material. Em percentual, 70% dessa massa é correspondente ao fluido e os 30% restante ao material do tanque, envolvendo o corpo do mesmo, chicanas, impulsor mecânico e motor elétrico. Uma possível modificação no projeto dessas unidades pode ser em relação a configuração estrutural das chicanas, de modo a inserir orifícios ao longo do corpo vertical da placa. Foi pesquisado na literatura a ocorrência de algum estudo similar, porém, nada foi encontrado. Desse modo, almeja-se como justificativa do presente trabalho uma chicana com uma quantidade máxima de orifícios (de modo que durante a agitação, a

chicana não fracture), que implica em uma menor massa e, portanto, um melhor custo benefício do projeto.

### 3) Objetivos

O presente estudo visou analisar o consumo de potência na agitação de fluidos newtonianos em um tanque com volume de 10 litros equipado com um impulsor axial com 4 pás inclinadas a  $45^\circ$  e um impulsor radial tipo turbina com 6 pás planas. A unidade também foi dotada de um conjunto de quatro chicanas padrão e um conjunto de quatro chicanas modificadas com orifícios.

### 4) Metodologia

Na Figura 1 está apresentada a unidade experimental utilizada no presente estudo, a qual se localiza no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília, em Santos, São Paulo.

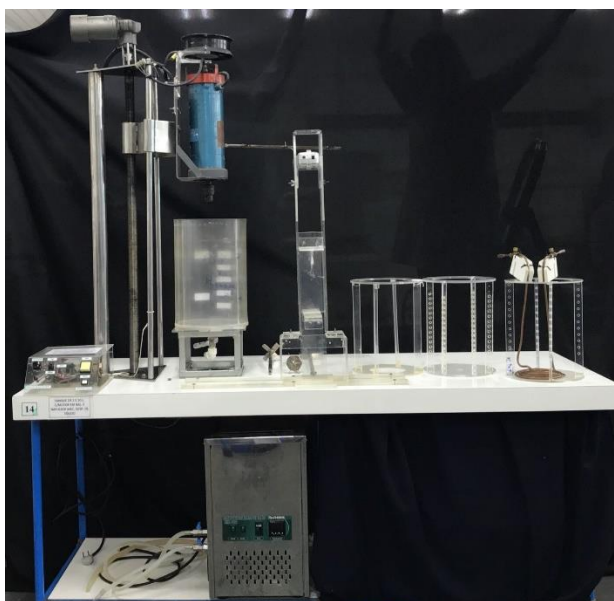
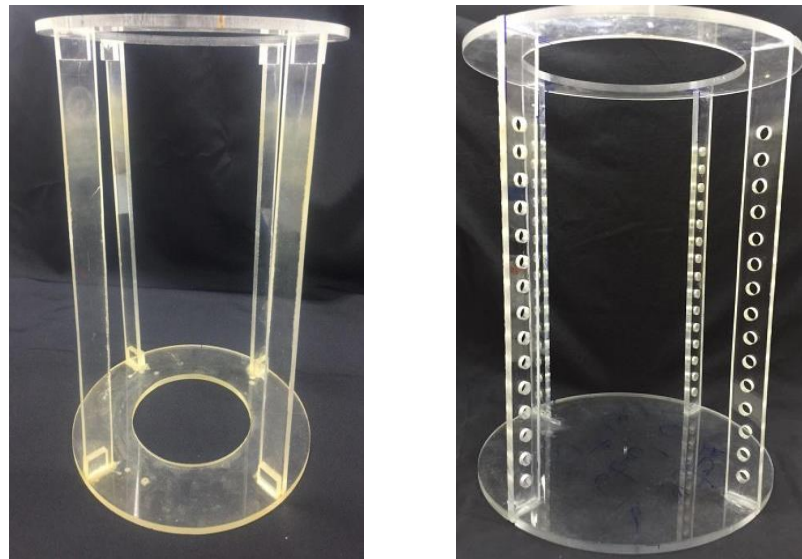


Figura 1 – Unidade experimental

A unidade experimental foi constituída por um tanque em acrílico com volume útil de 10 litros, um conjunto de chicanas padrão (Figura 2a), um conjunto de chicanas modificada (Figura 2b), um impulsor axial com 4 pás inclinadas a  $45^\circ$  (Figura 3a), um impulsor radial tipo turbina com 6 pás planas (Figura 3b). O aparato experimental também foi equipado com um motor elétrico com potência nominal de 1 hp, uma serpentina em espiral para controle de temperatura nos ensaios, a qual estava acoplada a um banho termostático com controle PID.



(a)

(b)

Figura 2: (a) Chicanas padrão; (b) Chicanas modificada com 120 orifícios



(a)

(b)

Figura 3: (a) Impulsor axial; (b) Impulsor radial

As dimensões do tanque e dos seus periféricos foram determinadas a partir das recomendadas por Rushton, Costich e Everett (1950), de grande emprego nos dias atuais. As dimensões recomendadas ou padrão são baseadas nas relações descritas pelas Equações de 1 a 6.

$$S_1 = \frac{H}{D_t} = 1 \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (2)$$

$$S_3 = \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad (3)$$

$$S_4 = \frac{J}{D_t} = \frac{1}{10} \quad (4)$$

$$S_5 = \frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (5)$$

$$S_3 = \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad (6)$$

Em que  $D_t$  é o diâmetro interno do tanque,  $H$  é a altura do nível de líquido,  $D_a$  é o diâmetro do impulsor mecânico,  $W$  é a altura da pá do impulsor mecânico,  $L$  é a largura da pá do impulsor mecânico,  $E$  é a distância do impulsor até a base do tanque e  $J$  é a largura da chicana. O tanque em estudo possuía um diâmetro interno de 233,7 mm. Em relação as chicanas modificadas, por ser uma proposta inédita neste trabalho, não foi localizado na literatura nenhuma relação sobre o diâmetro, espaçamento e quantidade de orifícios. Desse modo, foram propostas algumas relações: a) diâmetro dos orifícios (Equação 7), b) Espaçamento entre orifícios (Equação 8) e c) Número de orifícios em cada chicana (Equação 9). Na Figura 4 está apresentado um esquema com as dimensões dos orifícios da chicana modificada.

$$S_7 = \frac{\phi}{J} = \frac{1}{3} \quad (7) \quad S_8 = \frac{N_o \phi}{D_t} = \frac{1}{2} \quad (8) \quad S_9 = \frac{D_o}{J} = \frac{2}{3} \quad (9)$$

Sendo  $\phi$  o diâmetro dos orifícios da chicana,  $N_o$  o número de orifícios e  $D_o$  o espaçamento entre cada orifício.

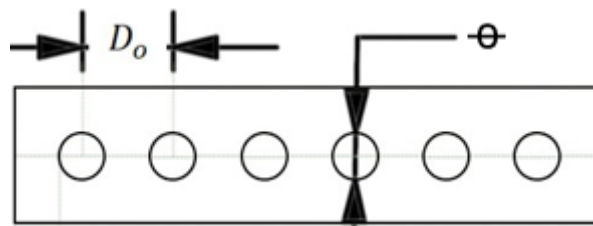


Figura 4 – Orifícios na chicana modificada

Os fluidos newtonianos utilizados foram água, solução de sacarose a 20% em massa e solução de sacarose 50% em massa. Cada fluido foi submetido a agitação com rotação no intervalo de 100 a 1000 rpm em função de cada impulsor mecânico e de cada tipo de chicana, totalizando 180 experimentos, uma vez que foram realizadas triplicatas. A potência consumida foi determinada através do uso de um dinamômetro. Como o motor elétrico foi colocado em balanço sobre rolamentos, foi possível medir a força gerada pelo torque do motor e relacioná-la com a rotação do impulsor mecânico e o braço, conforme apresentado na Equação 10.

$$P = 2\pi \cdot F \cdot N \cdot B \quad (10)$$

Em que  $F$  é a força medida em Newton,  $N$  é a rotação do impulsor mecânico em rps e  $B$  é o braço medido desde o centro do eixo do impulsor mecânico até uma distância arbitrária em metros e  $P$  é a potência consumida em Watts. Foram utilizados três braços com os seguintes valores: braço 1 de 125 mm, braço 2 de 275 mm e braço

3 de 425 mm. Com o dinamômetro mensurou-se três forças correspondentes a cada braço em função de cada rotação, de tal forma que foram calculadas três potências e posteriormente a potência média.

#### 5) Desenvolvimento

A potência dissipada no sistema de agitação é um parâmetro fundamental para uma análise energética do sistema, a qual depende do tipo do impulsor, da rotação, densidade, viscosidade, dimensões do tanque, geometria da superfície de transferência de calor, posição do impulsor, vórtice e forças gravitacionais. Existem diversas técnicas, diretas e indiretas, para estimar a potência consumida em um tanque com agitação, como por exemplo, a fluido dinâmica computacional (CFD), tenta estimar modelos a partir de dados experimentais realizados em unidades piloto e de bancada. Os modelos de previsão podem ser deduzidos de forma numérica a partir das equações de Navier-Stokes ou através da análise dimensional na unidade de agitação (Taghavi et. al., 2011). A análise dimensional é uma técnica que relaciona as variáveis independentes consideradas importantes na variável resposta em números adimensionais, o que traz a vantagem de reduzir o número de incógnitas. A Equação 11 apresenta a forma adimensional do cálculo da potência consumida em um tanque com agitação.

$$N_p = KRe^aFr^b \quad (11)$$

Em que  $N_p$  é o número de potência,  $Re$  é o número de Reynolds e  $Fr$  é o número de Froude. Em relação ao número de Froude, o mesmo só é considerado quando o tanque não possui chicanas ou quando o número de Reynolds é inferior a 300 (ocorrendo somente com fluidos com elevada viscosidade, o que não foi o caso nesse estudo). Logo a Equação 11 é simplificada para a forma apresentada na Equação 12.

$$N_p = KRe^a \quad (12)$$

A Equação 12 pode ser escrita em função das variáveis que compõe os adimensionais, número de potência e número de Reynolds (Equação 13).

$$\left(\frac{P}{\rho N^3 D_a^5}\right) = K \cdot \left(ND_a^2 \rho / \mu\right)^a \quad (13)$$

As constantes  $K$  e  $n$  da Equação 13 são determinadas experimentalmente em função da geometria do tanque utilizado, do tipo de impulsor, da presença de chicanas

e do tipo de fluido. Tradicionalmente, a Equação 13 é representada graficamente através das curvas do número de potência (Coker, 2007).

## 6) Resultados

Na Tabela 1, como exemplo, estão apresentados os valores da potência média, número de potência e número de Reynolds obtidos na agitação da água, com o impulsor axial e chicana modificada. Ressaltando que os resultados apresentados na Tabela 1 são referentes a apenas um das três replicações realizadas com a água na agitação com o impulsor axial e tanque com chicana modificada.

Tabela 1 – Resultados obtidos na agitação da água com o impulsor axial e chicana modificada

N(rpm)	P (W)	Np	Reynolds
205,5	0,977363	8,829699	22928,33
400,6	2,419159	2,950239	44696,3
604,4	5,437891	1,931002	67434,96
800,2	11,19385	1,712811	89281,03
1017	18,97475	1,414291	113470,1

Inicialmente, plotou-se o número de potência em função do número de Reynolds visando comparar o consumo de potência na agitação com a chicana padrão e chicana modificada, com o uso do impulsor axial, conforme apresentado na Figura 5.

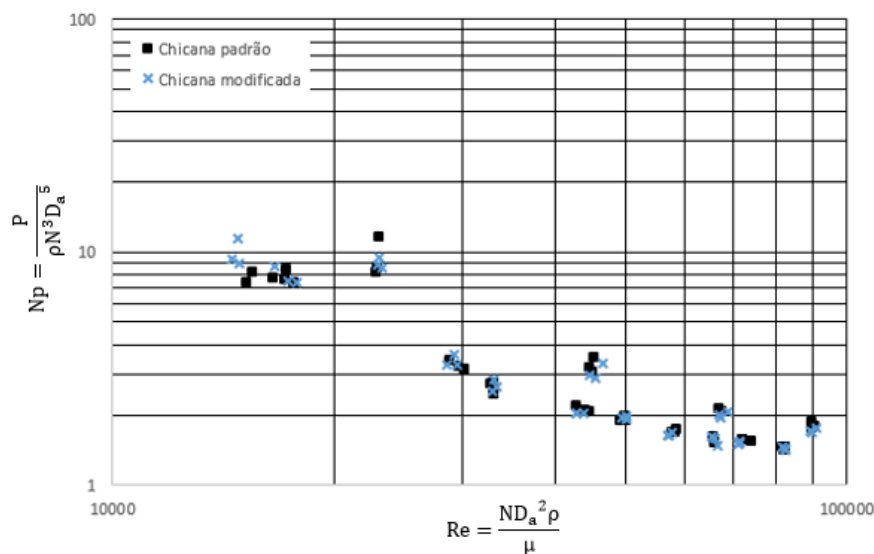


Figura 5 – Comparação entre as chicanas padrão e modificada – Impulsor axial

Analogamente, Na Figura 6 está apresentada a comparação entre as chicanas padrão e modificada, mas com o impulsor radial. Observa-se na Figura 5 que não houve uma diferença significativa em relação ao número de potência com a chicana padrão e com a chicana modificada com o uso do impulsor axial. O mesmo ocorreu com o impulsor radial, conforme visto na Figura 6.

Provavelmente isso ocorreu devido ao tamanho do diâmetro dos orifícios da chicana modificada. Como estes eram de 7,79 mm (ver relações das Equações de 1 a 9), eles praticamente ofereceram a mesma resistência ao movimento do fluido e com menor massa que a chicana padrão (sem orifícios).

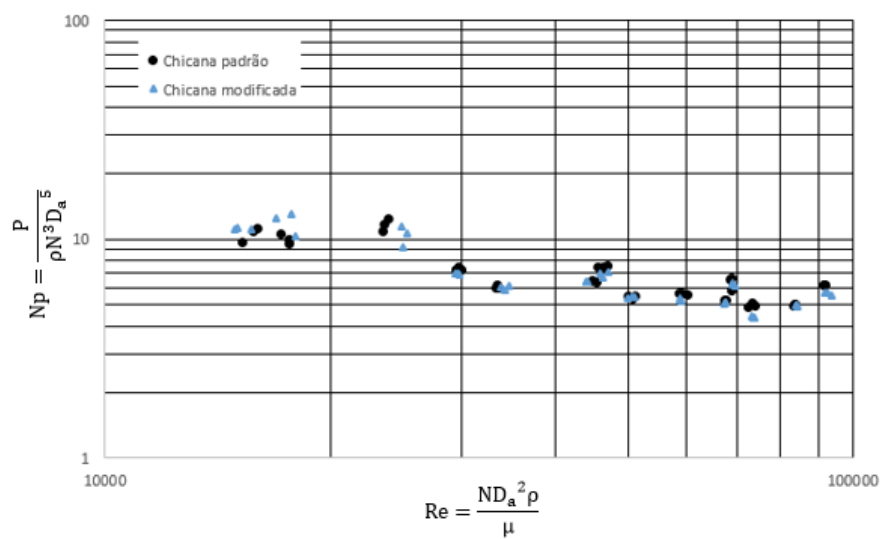


Figura 6 – Comparação entre as chicanas padrão e modificada – Impulsor radial

Na Figura 7 foi plotado o número de potência em função do número de Reynolds comparando os impulsores axial e radial com a chicana padrão. Analogamente, na Figura 8 foi realizada a comparação com a chicana modificada.

Foi observado que o consumo de potência com o impulsor axial é cerca de 30% menor que o consumo de potência com a utilização do impulsor radial. O mesmo pode ser observado na Figura 8, em relação a chicana padrão.

O impulsor axial por possuir pás inclinadas possui uma hidrodinâmica mais favorável ao escoamento, oferecendo menor resistência ao movimento das pás do impulsor mecânico e, portanto, um menor consumo de potência. No entanto, o impulsor radial, fornece quantidade de movimento ao fluido de forma totalmente desfavorável ao escoamento, pois o mesmo direciona o fluido a parede do tanque, o que causa um maior consumo de potência pelo impulsor mecânico.

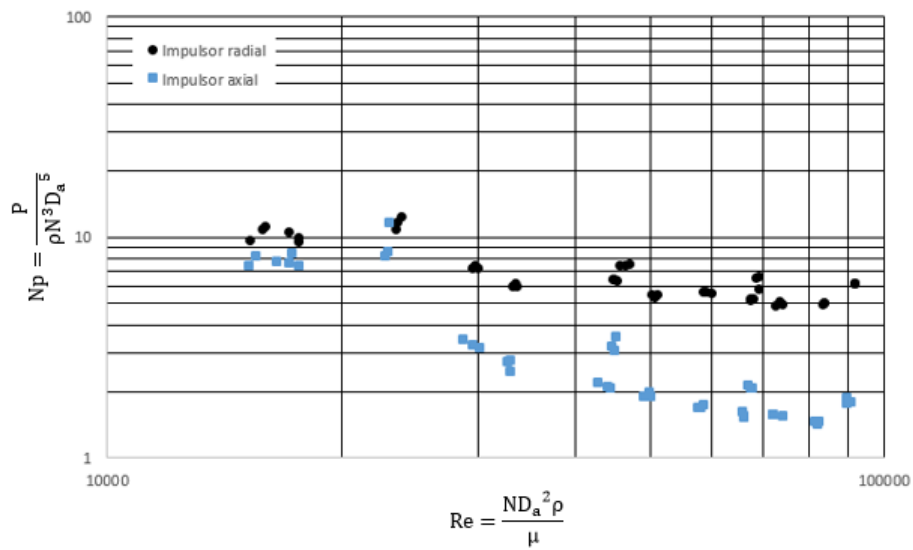


Figura 7 – Comparação entre os impulsos axial e radial – Chicana padrão

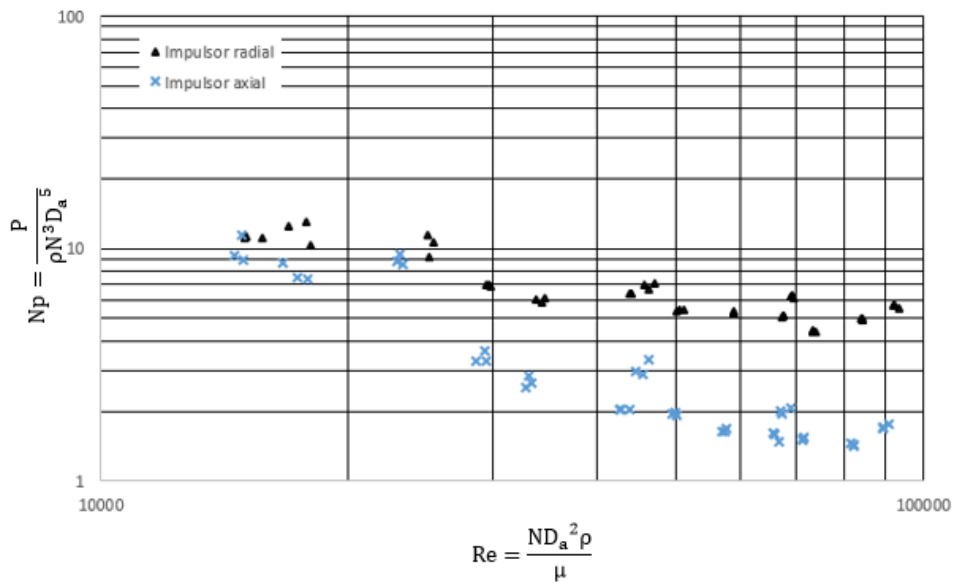


Figura 8 – Comparação entre os impulsos axial e radial – Chicana modificada

### 7) Considerações finais

Com os resultados do trabalho foi possível concluir:

- a) Não há diferença significativa entre o consumo de potência com o uso da chicana padrão ou chicana modificada independentemente do tipo de impulsor mecânico utilizado;
- b) O impulsor axial consome 30% da potência em relação ao impulsor radial com a chicana padrão e com a chicana modificada;

- c) Em termos de projeto, recomenda-se o uso da chicana modificada com o impulsor axial, pois desse modo haverá uma redução no peso da estrutura e um consumo de energia menor pelo impulsor mecânico, resultando em uma diminuição nos custos do projeto;

8) Fontes consultadas

Chiara G., Brunazzi, E., **On the Main flow features and Instabilities in an unbaffled vessel agitated with an eccentrically located impeller**. *Chemical Engineering Science*, 63, 18, p-4494-4505, 2008;

Coker, A. K., Ludwig's **Applied process design for chemical and petrochemical plants**, Vol. 1, 4ª Ed., Estados Unidos da América, Elsevier, 2007;

Haque, J. N., Mahmud, T., Roberts, K. J. **Modeling turbulent flows with free-surface in unbaffled agitated vessels**. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 45, p.2881-2891, 2006;

Paul, E. L., E Atiemo-Ubeng, S. M., **Handbook of mixing**, 1ª Ed., Wiley-Interscience, 2004;

Rosa, Vitor da Silva. **Transferência de calor e scale-up de tanques com impulsores mecânicos em operação com fluidos não-newtonianos** [doi:10.11606/T.3.2018.tde-12032018-141529]. São Paulo : Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2017. Tese de Doutorado em Engenharia Química;

Rushton, J. H.; Costich, E. W.; Everett, H. J. **Power characteristics of mixing impellers**. *Chemical Engineering Progress*, 46 (8), p. 395-404, 1950;

Taghavi, M., Zadghaffari, R., Moghaddass, J., Moghadass, Y., Experimental and CFD Investigation os Power Consumption in a Dual Rushton Turbine in Stirred Tank. **Chemical Engineering Research and Design**, 89, p. 280-290, 2011;