

*Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.*

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**LOQ4085 – OPERAÇÕES UNITÁRIAS I**

**PROF<sup>a</sup>: LÍVIA CHAGURI E CARVALHO**

## **Agitação e Mistura**

*Apostila elaborada pelo monitor da disciplina:*

*Victor Ferreira da M. L. Fonseca sob supervisão e*

*revisão da Prof<sup>a</sup>. Livia Chaguri.*

*Lorena, março de 2019*

## Sumário

1. Introdução .....	3
1.1. Agitação de Líquidos .....	3
1.2. Características e usos de impulsores .....	4
2. Projeto de Agitadores .....	9
2.1. Cálculo da potência requerida para agitar fluidos newtonianos.....	11
2.2. Cálculo da potência requerida para agitar fluidos não newtonianos .....	15
2.3. Fatores de correção dos cálculos de agitadores.....	20
3. Projeto por semelhança – ampliação de escala.....	20
3.1. Semelhança Geométrica.....	21
3.2. Semelhança Dinâmica .....	22
3.3. Igualdade de potência por unidade de volume .....	24
3.4. Igualdade na velocidade periférica do agitador.....	25
3.5. Tempo de mistura.....	26
3.6. Igualdade de transferência de calor .....	27

## **1. Introdução**

A agitação e a mistura de líquidos são duas operações unitárias bastante comuns nas indústrias de processamento químico, bioquímico ou de alimentos. Apesar de que consistem, em geral, na movimentação de líquidos, apresentam diferenças em relação ao padrão do movimento:

- Agitação é referida como aquela operação unitária que tem como objetivo induzir o movimento do fluido em uma direção específica, usualmente no interior de um tanque, por meio de impulsores giratórios, produzindo um perfil circulante;
- Mistura busca produzir uma distribuição aleatória e com certo grau de homogeneidade de uma ou mais fases ou substâncias, inicialmente separadas, dentro ou por meio de outra fase ou substância.

Um material homogêneo, por exemplo, como um tanque com água pode ser agitado, enquanto um material em pó pode ser misturado à água.

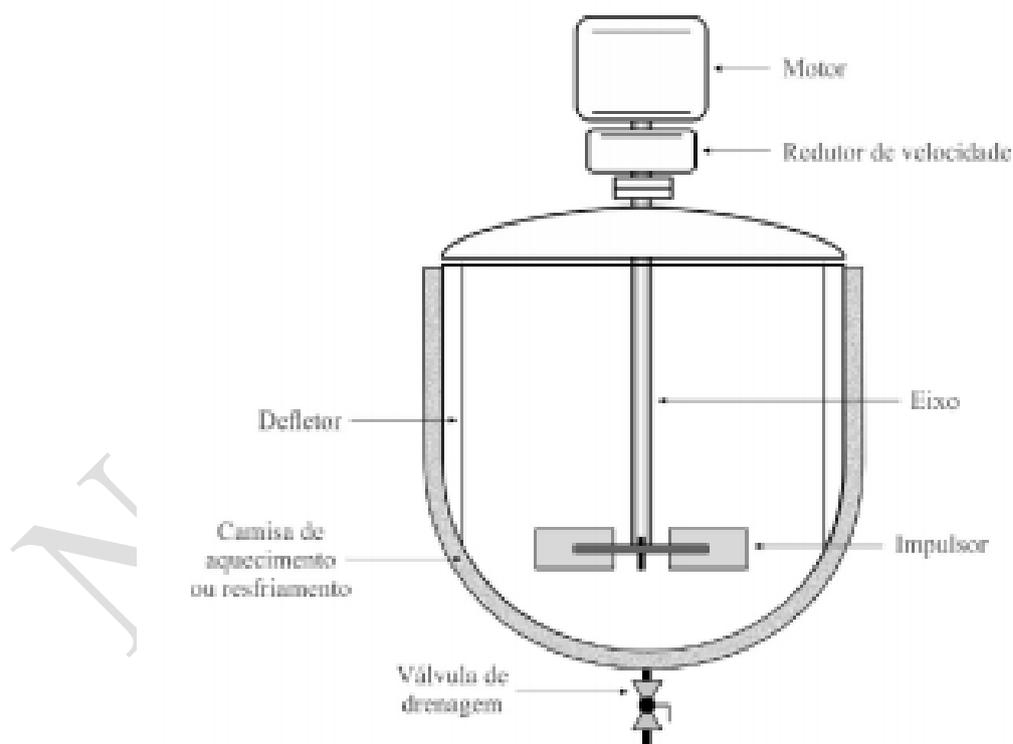
### **1.1. Agitação de Líquidos**

A agitação de líquidos é uma operação unitária utilizada para diversos propósitos: (i) acelerar as taxas de transferência de calor e massa; (ii) facilitar a ocorrência de reações químicas; (iii) suspender partículas sólidas em um meio líquido; (iv) misturar líquidos miscíveis; (v) dispersar gases em líquidos; (vi) dispersar um segundo líquido, imiscível com o primeiro, para formar uma emulsão.

Trata-se, portanto, de uma operação unitária muito empregada tanto em pequenas quanto em média e grandes instalações produtivas. Alguns exemplos de seu uso são: (i) dispersão de

hidrogênio em reatores de hidrogenação de gorduras; (ii) circulação de líquidos em tachos de fermentação; (iii) tanques com agitadores no tratamento térmico por batelada de leite; (iv) tanques de extração ou cozimento; (v) tanques de retenção de produto em processamento;

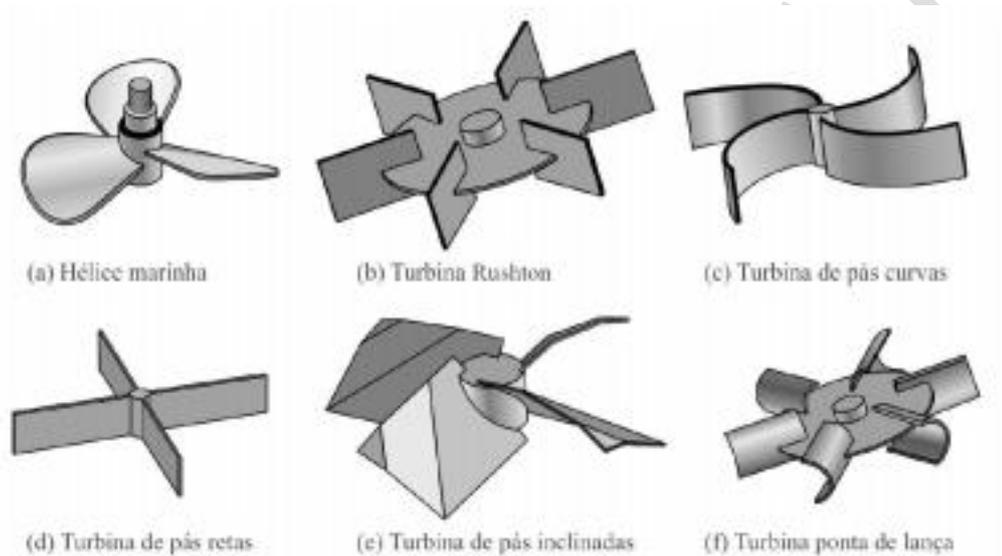
A agitação de líquidos normalmente ocorre em tanques ou vasos cilíndricos com agitador acoplado (Figura 1) formando um sistema constituído de: (i) um tanque ou reservatório com instalações auxiliares; (ii) um rotor ou impulsor instalado em um eixo e acionado por um sistema de motor e redutor de velocidades; e (iii) defletores (estes são opcionais, que são placas planas instaladas junto a parede do tanque com o objetivo de eliminar a formação do vórtice ao redor do eixo.



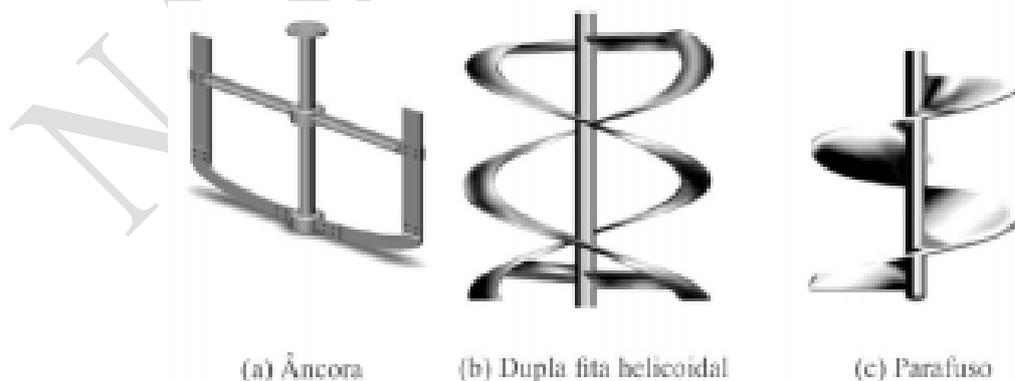
**Figura 1** – Configuração típica de um tanque cilíndrico com agitador acoplado<sup>1</sup>.

## 1.2. Características e usos de impulsores

Como pode ser observado é o impulsor ou mais popularmente chamado de agitador, o responsável pela circulação do líquido no tanque. Portanto, para atender as diferentes aplicações, existem vários tipos de impulsores; os mais comuns estão agrupados em duas categorias: (i) agitadores desenhados para líquidos de baixa a moderada viscosidade (alguns tipos mostrados na Figura 2); (ii) agitadores para líquidos viscosos (alguns tipos mostrados na Figura 3).



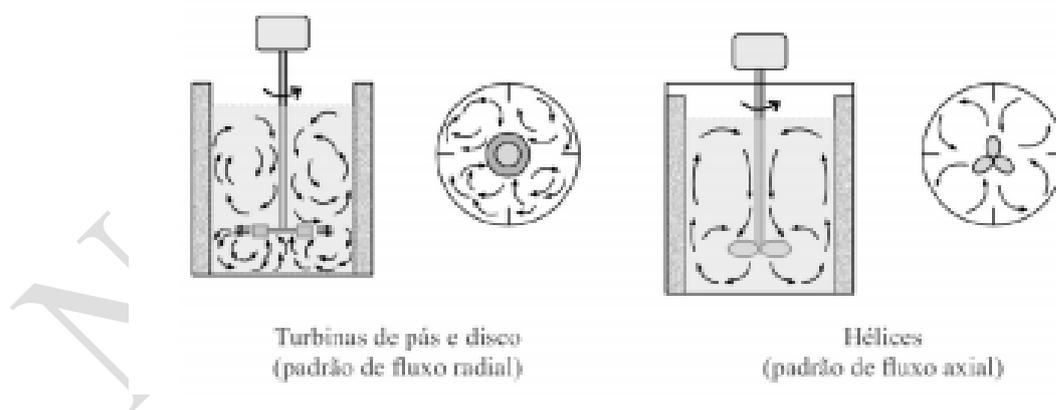
**Figura 2 – Impulsores empregados para líquidos de baixa e moderada viscosidade<sup>1</sup>**



**Figura 3 – Impulsores empregados para líquidos viscosos<sup>1</sup>**

A escolha do tipo de agitador mais apropriado não é uma tarefa trivial. Essa escolha se baseia em dados experimentais do uso dos mesmos, com um desempenho satisfatório para cumprir uma dada função ou objetivo. Os diferentes tipos de impulsores são classificados de acordo com o escoamento que produzem: aqueles que geram correntes paralelas ao seu eixo são chamados de impulsores de fluxo axial; enquanto aqueles que geram correntes em uma direção radial ou tangencial são chamados de impulsores de fluxo radial. Além disso, podem também ser classificados como impulsores que geram alto ou baixo cisalhamento, alta ou baixa turbulência.

Na figura 4 podem ser observados exemplos de padrões de escoamento gerados por impulsores em um tanque. Essas características definem a aplicabilidade dos mesmos para os diversos objetivos a serem atingidos. Uma das propriedades mais importantes para a sua seleção é a viscosidade aparente do meio. Na tabela 1 estão apresentadas, para cada tipo de impulsor, as faixas mais usuais de viscosidade aparente e do volume de líquidos a ser agitado.



**Figura 4** – Padrões de escoamento em função do tipo de impulsor<sup>1</sup>

Ainda em razão da grande aplicação de alguns tipos, seguem informações mais detalhadas:

- **Tipo hélice:** é utilizado geralmente para agitação de fluidos de baixa viscosidade ( $\mu < 5 \times 10^{-2}$  Pa.s), ainda que possa ser utilizado para líquidos com viscosidades maiores e apresente maior circulação (escoamento axial) do que uma turbina. Principais aplicações: suspensão de sólidos, agitação de fluidos miscíveis e aumento da taxa de transferência de calor. Não fornece tensão de cisalhamento. O diâmetro do agitador é menor que o diâmetro do tanque ( $D_a \ll D_t$ ) e é utilizado para uma ampla faixa de frequência rotacional (Figura 2a).
- **Tipo turbina:** são adequados para agitação tanto de fluidos pouco viscosos quanto para fluidos muito consistentes, para dispersão de gases em líquidos, dispersão de gases e para promover a transferência de calor. Operam com  $D_a \ll D_t$  e altas frequências rotacionais, geralmente em regime de escoamento de transição ou turbulento. Podem gerar escoamento radial e promovem alta-tensão de cisalhamento nas pontas do impulsor (Figura 4). Quando têm as pás inclinadas sobre o eixo (Figura 2e) geram escoamento axial e são úteis para suspensão de sólidos, enquanto os de pás retas (Figura 2d) são úteis para agitação de fluidos viscosos. O agitador de turbina de Rushton (Figura 2b) é um impulsor tradicionalmente utilizado para dispersão de gases em líquidos, já que sua geometria é responsável por uma zona de alta turbulência atrás de cada lâmina. O de turbina de pás retas (Figura 2d) fornece uma boa agitação, porém com alto consumo energético quando uma alta-tensão de cisalhamento é requerida. É utilizado para produzir emulsões líquido-líquido. Por outro lado, quando as pás são curvas, o impulsor é menos agressivo, sendo uma boa opção para fluidos sensíveis ao cisalhamento, gerando um bom escoamento radial (Figura 2c). Impulsores de fluxo duplo ou escoamento em contracorrente são utilizados para misturas especiais e fluidos que apresentam

comportamento pseudoplástico com altos valores de índice de consistência de (25 a 75) Pa.s<sup>n</sup> e com índice de escoamento variando entre 0,1 e 0,5.

- **Tipo pás:** O diâmetro do impulsor é aproximadamente igual ao diâmetro do tanque ( $D_a=D_t$ ) e operam com frequência rotacional baixa, sendo utilizados para agitação de fluidos com alta viscosidade aparente.
- **Formas diversas:** Utilizados para fluidos com alta viscosidade aparente parafusos (Figura 3c), de fita helicoidal (Figura 3b), que pode ser simples ou dupla, grades fixas e rotatórias, barras, âncoras (Figura 3a), entre outras. Em geral operam em baixas frequências rotacionais e o diâmetro desses impulsores abrange quase todo o diâmetro interno do tanque, de modo a permitir a raspagem da parede e agitar toda a massa de fluido.

**Tabela 1** – Faixas de volume de líquido agitado indicadas para cada tipo de impulsor em função da viscosidade do líquido<sup>1</sup>

TIPO DE IMPULSOR	$\mu_{ap}$ [Pa · s]	$V_L (\mu_{ap})$ [m <sup>3</sup> ] ([Pa · s])
Âncora	20 – 10 <sup>3</sup>	0,040 (1000) – 380 (1000)
Hélice (1750 rpm)	10 <sup>-3</sup> – 10	0,040 até 0,25 (10) – 380 (10 <sup>-3</sup> )
Hélice (1150 rpm)	10 <sup>-3</sup> – 10	0,227 (10) – 38 (10 <sup>-3</sup> )
Hélice (420 rpm)	10 <sup>-3</sup> – 10	0,75 (10) – 380 (10 <sup>-3</sup> )
Turbina de pás planas	10 <sup>-3</sup> – 30	0,040 – 380
Pás	0,1 – 30	0,040 (80) – 380 (10)
Grade	1 – 100	–
Parafuso helicoidal	3 – 300	–
Fita helicoidal	10 – 2000	0,040 (1000) – 380 (20 – 1000)

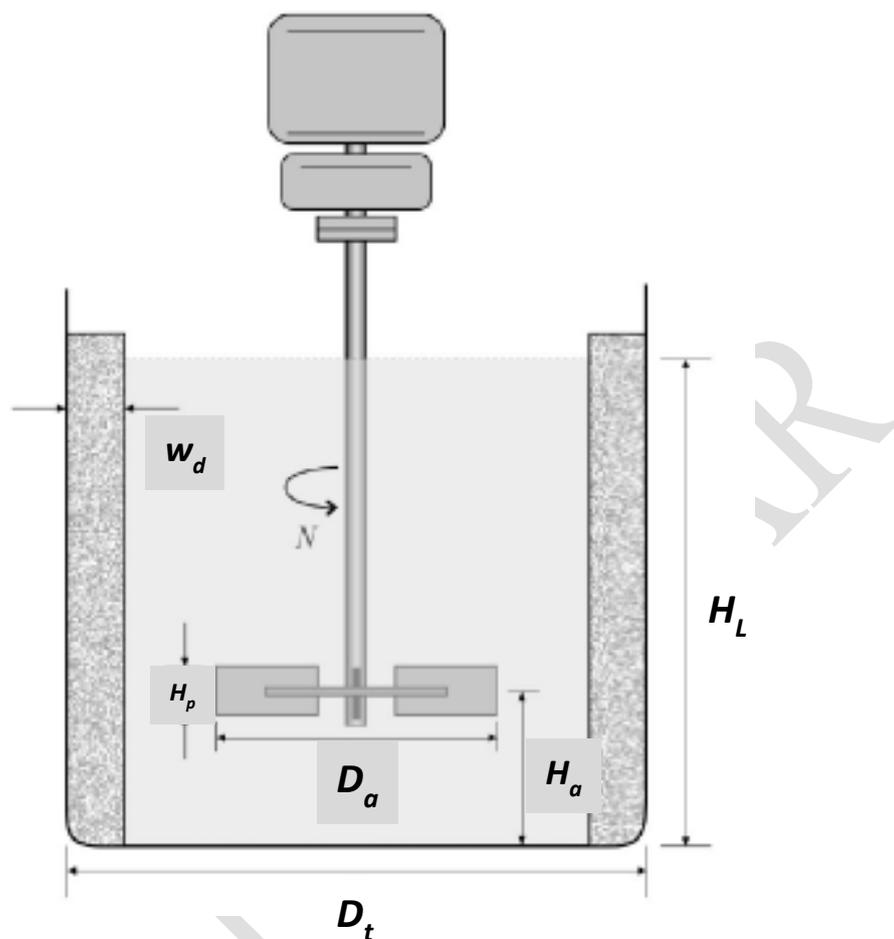
Fonte: Gupta (1979) e Penny (1970).

## **2. Projeto de Agitadores**

Dada a complexidade das operações de agitação e mistura, o projeto desses equipamentos se realiza basicamente utilizando o método de semelhança de sistemas, que se baseia na análise dimensional para obter critérios de mudança de escala e consiste nas seguintes etapas: (i) seleção do tipo de impulsor; (ii) cálculo das dimensões geométricas; (iii) cálculo da frequência rotacional do impulsor (depende em geral do critério de mudança de escala); (iv) cálculo da potência requerida.

Para realizar mudança de escala entre os resultados experimentais obtidos em um modelo de laboratório e um protótipo (escala maior), os padrões de escoamento devem ser iguais em ambas as escalas. Portanto, deve-se assegurar que exista semelhança geométrica, cinemática e dinâmica entre o modelo e o protótipo. A semelhança geométrica é essencial para garantir as semelhanças cinéticas e dinâmicas. Quando se estabelece uma semelhança completa entre os dois sistemas, podem ser estabelecidas relações simples entre as variáveis de projeto.

A semelhança geométrica existe se a relação entre as medidas nas duas escalas se mantém constante, enquanto a semelhança dinâmica exige que a relação de velocidades e a relação de forças entre os vários pontos do sistema sejam iguais no modelo e no protótipo. A análise dimensional fornece o número total de números adimensionais que relacionam as variáveis relevantes e que por sua vez influenciam a operação.



**Figura 5** – Características geométricas de um tanque cilíndrico com agitador acoplado<sup>1</sup>

As variáveis envolvidas na agitação de um líquido em um tanque estão mostradas na Figura 5. A potência fornecida pelo motor ( $P_0$ ) será função da densidade ( $\rho$ ) e da viscosidade ( $\mu$ ) do líquido, frequência rotacional do impulsor ( $N$ ) e das variáveis geométricas do sistema: diâmetro do agitador ( $D_a$ ), diâmetro do tanque ( $D_t$ ), altura do agitador desde a base do tanque ( $H_a$ ), altura do líquidos ( $H_l$ ), largura dos defletores ( $w_d$ ), além do tipo de agitador, com a sua característica altura das pás ( $H_p$ ). Assim, a potência do agitador para um fluido newtoniano é função das variáveis acima mencionadas:

$$P_0 = f(\rho, \mu, N, D_a, D_t, H_a, w_d, g) \quad (1)$$

No entanto, aplicando o método da análise dimensional, o número de variáveis pode ser reduzido aos números adimensionais de potência, de Reynolds e de Froude:

$$N_{P_0} = \frac{P_0}{N^3 D_a^5 \rho} \quad (2)$$

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \quad (3)$$

$$N_{Fr} = \frac{N^2 D_a^2}{g} \quad (4)$$

Em que:  $N_{P_0}$  é o número de potência [adimensional];  $N_{Re}$  é o número de Reynolds [adimensional] e  $N_{Fr}$  é o número de Froude [adimensional].

Além dos adimensionais relacionados anteriormente, os seguintes números adimensionais geométricos são definidos:  $\frac{D_t}{D_a}, \frac{H_a}{D_a}, \frac{H_L}{D_a}, \frac{w_d}{D_a}$

Portanto, o número de potência ( $N_{P_0}$ ) será função de:

$$P_0 = f(N_{Re}, N_{Fr}, \frac{D_t}{D_a}, \frac{H_a}{D_a}, \frac{H_L}{D_a}, \frac{w_d}{D_a}) \quad (5)$$

O número de Froude ( $N_{Fr}$ ) deve ser considerado quando há formação de vórtice junto ao eixo. Esse fenômeno é preponderante para  $N_{Re} > 300$  e para tanques sem defletores.

### **2.1. Cálculo da potência requerida para agitar fluidos newtonianos**

O caso mais simples de cálculo é aquele em que o tipo de agitador, a velocidade angular a ser empregada e as dimensões geométricas são definidos previamente. Nesse caso, o projeto

baseia-se no conhecimento da energia dissipada pelo agitador para essas condições e, conseqüentemente, implicará a determinação do  $N_{Po}$  para o sistema em questão. Em geral são utilizadas configurações geométricas padrão. As mais usuais são:

$$\frac{D_t}{D_a} = 3, \frac{H_a}{D_a} = 1, \frac{H_L}{D_a} = 3, \frac{w_d}{D_t} = 0,1 \quad (6)$$

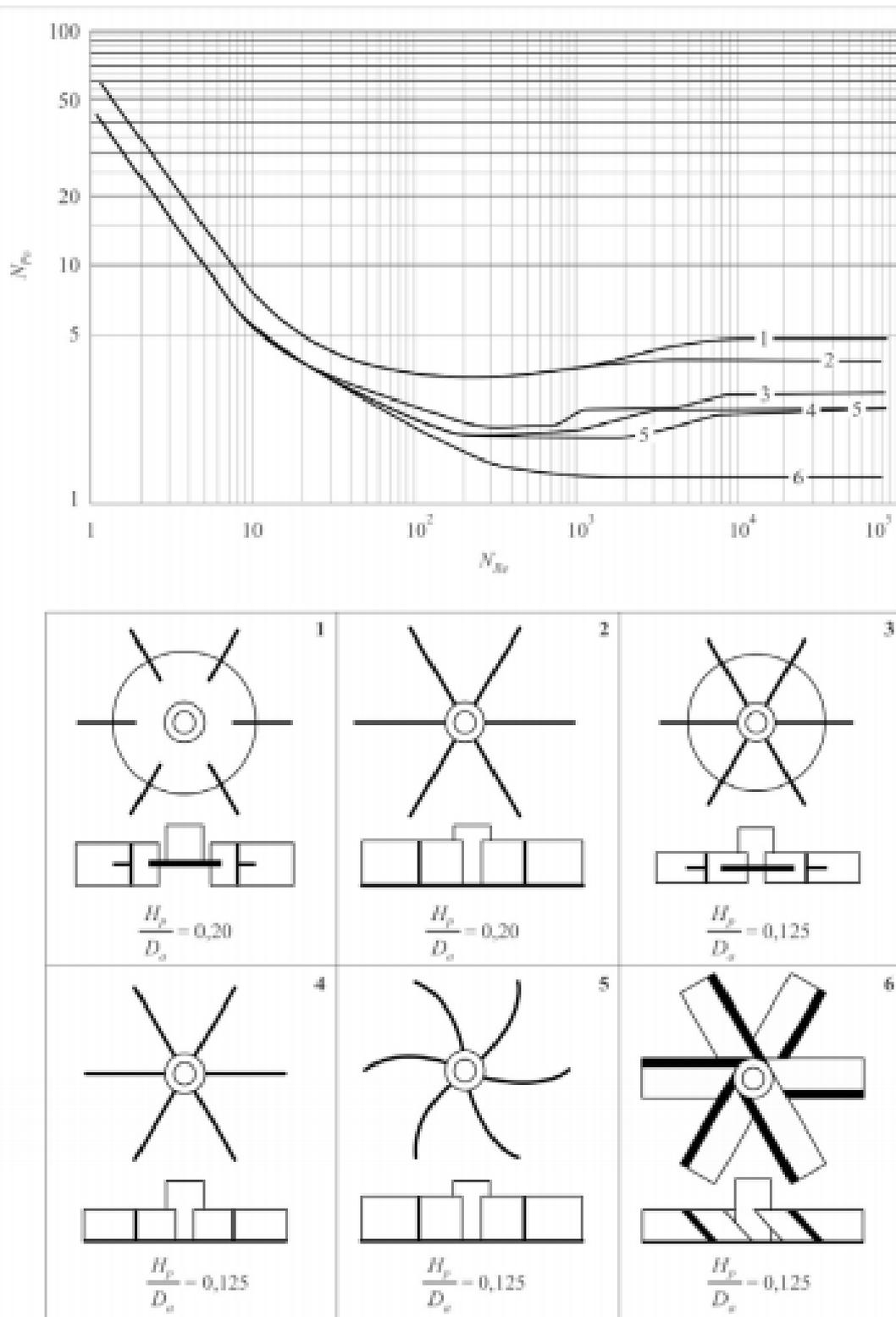
$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}, \frac{H_a}{D_t} = \frac{1}{3}, \frac{H_L}{D_t} = 1, \frac{w_d}{D_t} = \frac{1}{12}, \frac{H_p}{D_a} = \frac{1}{5} \quad (6.1)$$

As curvas de  $N_{Po}$  em função do número de Reynolds são determinadas experimentalmente para os diferentes tipos de agitadores. Na figura 6 são mostradas curvas típicas para agitadores tipo turbina, com diferentes relações entre altura das pás do impulsor ( $H_p$ ) e diâmetro do agitador ( $D_a$ ) em tanques com 4 defletores e com configurações geométricas padrão. A figura 7 inclui curvas para agitadores tipo hélice e para agitação de fluidos pseudoplásticos. As curvas mostradas nas figuras 6 e 7 apresentam similaridade com o diagrama de Moody. Para a região laminar ( $N_{Re} < 10$ ) a seguinte expressão é válida:

$$N_{Po} = \frac{K_p}{N_{Re}} \quad (7)$$

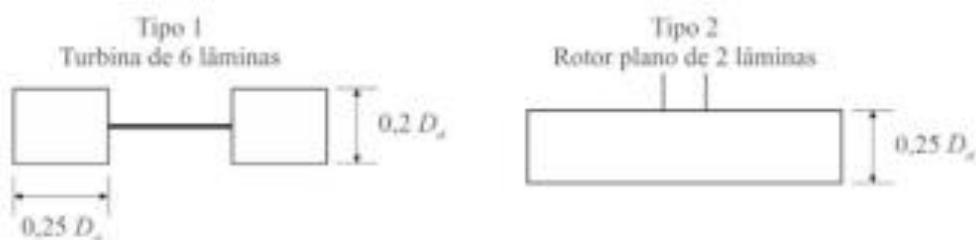
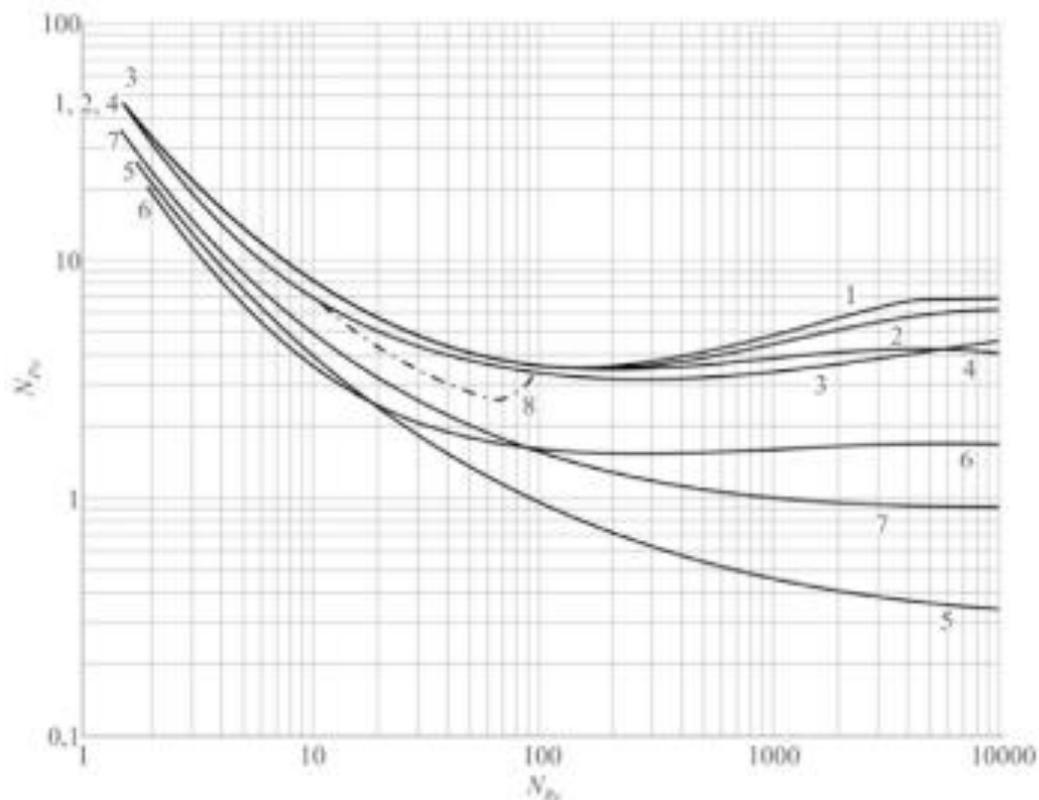
Em que  $K_p$  é uma constante [adimensional]. Na região de turbulência, observa-se que é válida a igualdade  $N_{Po} = K_p$ . Os valores de  $K_p$  em geral são constantes e dependem do tipo de agitador, das dimensões do tanque e número de defletores. Curvas relacionando  $N_{Po}$  em função do número de Reynolds para outros tipos de agitadores, com e sem defletores, podem ser encontrados na literatura.

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.



**Figura 6** – Número de potência ( $N_{po}$ ) em função do número de Reynolds ( $N_{re}$ ) para vários tipos de turbinas para agitação de fluidos newtonianos em tanques com características geométricas padrão.<sup>1</sup>

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.



Tipo de rotor	$w_r/D_s$	Curva
Tipo 1	0,17	1
Tipo 1	0,10	2
Tipo 1	0,04	3
Tipo 1 com lâminas curvas	0,10	4
Hélice com 3 pás, $s = D_s$	0,10	5
Tipo 2	0,10	6
Hélice com 3 pás, $s = 2D_s$	0,10	7
Tipo 1 com fluido pseudoplástico	0,04	8

**Figura 7** – Número de potência ( $N_{po}$ ) em função do número de Reynolds ( $N_{re}$ ) para vários tipos de impulsores em tanques com as seguintes relações geométricas:

$$D_r/D_s = 3; 2,7 \leq H_1/D_s \leq 3,9; 0,75 \leq H_2/D_s \leq 1,3. \quad 1$$

## **2.2. Cálculo da potência requerida para agitar fluidos não newtonianos**

No tratamento da agitação de fluidos newtonianos, a propriedade reológica em questão é a viscosidade dos fluidos que é independente da taxa de cisalhamento. No entanto, a situação é bem mais complexa quando se trata de agitação de fluidos não newtonianos. Como as propriedades reológicas dependem da taxa de cisalhamento e esta varia ao longo do tanque, consequentemente a viscosidade aparente também varia, ou seja, em regiões próximas ao agitador ocorre uma zona de máximo cisalhamento, o que resulta em uma queda de viscosidade aparente para um fluido não newtoniano de comportamento pseudoplástico; por outro lado, essa será uma zona de viscosidade aparente máxima para um fluido não newtoniano de comportamento dilatante. De fato, para fluidos dilatantes, o aumento da viscosidade aparente em função do aumento da taxa de cisalhamento faz com que dificilmente seja atingido um número de Reynolds superior a 10.000, o que significa que o regime será laminar ou de transição. A definição de viscosidade efetiva tem sido adotada para contornar essas diferenças em fluidos de comportamento não newtoniano com alta viscosidade aparente para prever o número de potência correspondente ao agitador selecionado.

Dois métodos de cálculo de consumo de potência para sistemas de agitação de fluidos não newtonianos serão considerados. O primeiro método foi desenvolvido para fluidos de comportamento não newtoniano que obedecem a Lei de Potência, enquanto o segundo método não tem restrições com relação ao comportamento reológico do fluido.

OBS: Lei de Potência em fluidos: correspondem aos fluidos com comportamento reológico descrito pelo modelo da lei de potência, o qual é representada pela seguinte expressão:

$$\sigma = K\gamma^n$$

em que  $K$  é o índice de consistência e  $n$  é o índice de comportamento do escoamento.

Fluidos que seguem a lei de potência apresentam:

$n < 1$  – pseudoplásticos, como exemplo: suco de fruta, creme, chocolate derretido, ketchup de tomate, mostarda, molho de maçã e purês de frutas e verduras.

$n > 1$  – dilatantes, como exemplo: soluções de amido em água e açúcar em solução.

O primeiro método, com base em números adimensionais, foi proposto por Forestie Liu (1959) para fluidos pseudoplásticos, sendo válido apenas para regime laminar. Nesse caso, o número de potência é dado por:

$$N_{P_0} = 160 \left[ \left( \frac{D_a^2 N^{2-n} \rho}{K} \right) \left( \frac{H_L}{H_a} \right)^n \left( \frac{D_a}{D_a + D_t} \right) \right]^{-1} 50^{n-1} \quad (8)$$

Em que  $K$  é o índice de consistência do fluido [ $\text{Pa.s}^n$ ];  $n$  é o índice de fluxo ou índice de comportamento [adimensional] e as demais dimensões correspondem ao sistema de agitação e mistura.

Essa correlação foi proposta a partir de dados experimentais para quatro fluidos pseudoplásticos e quatro tipos diferentes de agitadores, sendo válida para o número de Reynolds modificado,  $N'_{re}$ , menor que 10, definido de acordo com a equação:

$$N'_{Re} = \frac{D_a^2 N^{2-n} \rho}{K} \quad (9)$$

O segundo método, proposto por Metzner e Otto (1957), é o mais utilizado por diversos autores e baseia-se no cálculo de uma taxa de cisalhamento efetiva  $(dv/dr)_{ef}$  existente no tanque, de modo que a viscosidade efetiva  $(\mu_{ef})$  correspondente a taxa de cisalhamento efetiva seja

igual a viscosidade de um fluido newtoniano em um sistema com o mesmo consumo de energia, sob condições idênticas em regime laminar.

Da equação constitutiva do fluido, a viscosidade efetiva é dada por:

$$\mu_{ef} = K \left( \frac{dv}{dr} \right)_{ef}^{n-1} \quad (10)$$

Em que  $\mu_{ef}$  é a viscosidade efetiva [Pa.s].

Metzner e Otto (1957) assumiram que a taxa de cisalhamento efetiva obedece a uma relação linear em função da frequência rotacional do impulsor:

$$\left( \frac{dv}{dr} \right)_{ef} = K_s N \quad (11)$$

Em que  $K_s$  é uma constante empírica [adimensional]. Essa proposta é válida para vários sistemas de agitação em regime laminar e o valor de  $K_s$  deve ser determinado experimentalmente. Valores de  $K_s$  para diversos agitadores são apresentados na Tabela 2.

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

IMPULSOR	Nº DE DEFLETORES		$D_a$ [m]	$\left(\frac{D_f}{D_a}\right)$	n [-]	K <sub>s</sub> [-]
		$\left(\frac{w_d}{D_f}\right)$				
<b>Turbina</b>						
com seis pás planas	4 (0,1)		0,051 – 0,20	1,3 – 5,5	0,05 – 1,5	11,5 ± 1,5
com seis pás planas	Sem defletores		0,051 – 0,20	1,3 – 5,5	0,18 – 0,54	11,5 ± 1,4
duas com seis pás planas, separadas de D <sub>f</sub> /2	4 (0,1)		–	3,5	0,14 – 0,72	11,5 ± 1,4
duas com seis pás planas, separadas de D <sub>f</sub> /2	4 (0,1) ou sem defletores		–	1,02 – 1,18	0,14 – 0,72	11,5 ± 1,4
com seis pás inclinadas a 45°	4 (0,1) ou sem defletores		0,10 – 0,20	1,33 – 3,0	0,21 – 0,26	13 ± 2
com seis pás inclinadas a 45°	4 (0,1) ou sem defletores		0,10 – 0,20	1,33 – 3,0	1,0 – 1,42	13 ± 2
<b>Hélice marinha</b>						
com três pás (impulsão descendente)	Sem defletores, eixo vertical ou eixo inclinado a 10°, instalado a D <sub>f</sub> /6		0,127	2,2 – 4,8	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
com três pás (impulsão ascendente)	Sem defletores, eixo vertical ou eixo inclinado a 10°, instalado a D <sub>f</sub> /6		0,127	2,2 – 4,8	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
com três pás (impulsão descendente)	Sem defletores, eixo inclinado a 10°, instalado a D <sub>f</sub> /6		0,305	1,9 – 2,0	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
com três pás (impulsão descendente)	Sem defletores, eixo vertical		0,305	1,9 – 2,0	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
de passo quadrado com três pás	4 (0,1)		0,152	1,67	0,16 – 0,6	10
de passo duplo com três pás (impulsão descendente)	Sem defletores, eixo inclinado a 10°, instalado a D <sub>f</sub> /6			1,4 – 3,0	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
de passo duplo com três pás (impulsão descendente)	Sem defletores, eixo vertical			1,4 – 3,0	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
de passo quadrado com quatro pás	4 (0,1)		0,12	2,13	0,05 – 0,61	10
Pás de duas folhas	4 (0,1)		0,09 – 0,13	2 – 3	0,16 – 1,68	10
Ancora	Sem defletores		0,28	1,02	0,34 – 1,0	11 ± 5
Impulsores cônicos	Sem defletores ou 4 (0,08)		0,10 – 0,15	1,92 – 2,88	0,34 – 1,0	11 ± 5

Fonte: Skelland (1967).

**Tabela 2** – Valores de K<sub>s</sub> para diversos tipos de impulsores usados na agitação de fluidos pseudoplásticos<sup>1</sup>

Após a seleção do sistema de agitação e a definição da frequência rotacional de operação do impulsor (N), a potência de agitação necessária pode ser calculada de acordo com as seguintes etapas: (i) calcula-se a taxa de cisalhamento efetiva empregando a equação acima; (ii) determina-se a viscosidade efetiva ( $\mu_{ef}$ ) e, com esse valor, obtém-se o número de Reynolds ( $N_{Re}$ ); (iii) avalia-se o  $N_{Po}$  a partir das correlações ou diagramas apropriados (Figura 7) para o impulsor considerado ou, alternativamente, ou através da equação pertinente.

Entre os vários tipos de agitadores utilizados para fluidos de alta viscosidade aparente, os de fita helicoidal (FH) e fita helicoidal com parafuso (FHP) são amplamente utilizados. Na Tabela 3 são apresentados os valores de  $K_s$  para esses tipos de impulsor e a sua dependência em função do índice de fluxo ( $n$ ).

**Tabela 5.5** Valores de  $K_s$  para impulsores do tipo fita helicoidal (FH) e fita helicoidal e parafuso (FHP)

IMPULSOR	$\left(\frac{D_t}{D_a}\right)$	$n$	$K_s$
FH	1,02 - 1,12	0,4 - 1	66,06
FH	1,10 - 1,11	0,35 - 1	27
FHP	1,03	0,35 - 1	24,58
FH	1,053	0,5 - 1	36,73
FH	1,056	0,27 - 1	30
FH	1,04 - 1,19	0,5 - 1	27,6
FHP	1,056 - 1,118	0,26 - 1	30,6
FH	1,11 - 1,37	0,17 - 0,65	79,85
FH	1,05 - 1,33	0,35 - 0,75	24,68
FH	1,05 - 1,33	-	26,8
FH	1,11	0,18 - 1	17 - 40

Fonte: Brito-De La Fuente et al. (1997).

**Tabela 3** – Valores de  $K_s$  para impulsores do tipo FH e FHP<sup>1</sup>

Brito-De La Fuente et al. (1997) estudaram o consumo de potência para agitação de fluidos pseudoplásticos e fluidos newtonianos empregando impulsores do tipo FH e FHP instalados em tanques com as seguintes relações geométricas:

$$\frac{D_t}{D_a} = 1,135, \frac{w_f}{D_a} = 0,108 \text{ a } 0,135, \frac{w_p}{w_f} = 1,17 \text{ a } 1,25, \frac{H_L}{D_t} = 2,07, \frac{s}{D_a} = 0,5 \text{ ou } 1 \quad (12)$$

Em que  $w_f$ ,  $w_p$  e  $s$  são a largura da fita, largura do parafuso e o passo do impulsor, respectivamente [m]. Para regime laminar ( $N_{re} \leq 100$ ), a seguinte correlação foi determinada:

$$N_{P0} = 173,1 N_{Re}^{-1} \left(\frac{s}{D_a}\right)^{-0,72} \left(\frac{w_f}{D_a}\right)^{0,14} \quad (13)$$

A qual deve ser empregada para o cálculo do número de potência pelo método de Metzner e Otto (1957). Para fluidos pseudoplásticos, a constante  $K_s$  pode ser calculada por:

$$K_s = 38,27 \left( \frac{w_f}{D_a} \right)^{-0,024} \left( \frac{s}{D_a} \right)^{-0,135} (0,814)^{\frac{1}{n}} \quad (14)$$

### 2.3. Fatores de correção dos cálculos de agitadores

Quando o sistema não é estritamente semelhante aos apresentados na bibliografia (como por exemplo: mais de um impulsor no eixo ou o tanque e o impulsor têm medidas diferentes das medidas-padrão), fatores de correção podem ser utilizados para calcular a potência do agitador.

No caso de mais de um impulsor, a seguinte proporção deve ser respeitada:  $H_L \approx D_a$  para cada impulsor adicional, e a potência total é expressa como:

$$P_{oT} = P_o n_i \quad (15)$$

Em que:  $P_{oT}$  é a potência total [W],  $P_o$  é a potência de cada impulsor [W] e  $n_i$  é o número de impulsores.

Quando as dimensões do sistema diferem das configurações geométricas padrão, aplica-se um fator de correção ( $f'$ ), dado pela equação abaixo, que deve ser aplicado no cálculo do número de potência:

$$f' = \sqrt{\frac{(D_t/D_a)_{Real} (H_L/D_a)_{Real}}{(D_t/D_a)_{Padrão} (H_L/D_a)_{Padrão}}} \quad (16)$$

### 3. Projeto por semelhança – ampliação de escala

A maior dificuldade encontrada em projetos de agitadores reside na ampliação de escala de laboratório para a escala industrial. No caso mais geral, os dados disponíveis de projeto são: o volume do fluido e o objetivo da agitação no processo, ou seja, uniformizar a temperatura ou concentração, misturar dois fluidos miscíveis, emulsionar fluidos imiscíveis, etc.

Resumindo, o projeto do sistema depende basicamente da finalidade da agitação. Portanto, além do cálculo da potência consumida, o tipo de impulsor, bem como a sua velocidade e as dimensões do sistema devem ser adequadamente selecionados, de modo a garantir o bom desempenho do sistema. Consequentemente, o cálculo da potência consumida na agitação é somente uma parte do problema, ou seja, deve-se primeiramente definir o processo ou qual será o resultado esperado da agitação, ou seja, simplesmente a mistura de um componente (deve-se garantir certo tempo de mistura), a promoção da transferência de calor ou massa, a dissolução de um sólido, etc.

Assim, para a ampliação de escala, ensaios em laboratório devem ser conduzidos, nos quais as condições em que haja o melhor desempenho do tanque agitado em unção do objetivo preestabelecido sejam obtidas. A ampliação deve ser realizada da escala de laboratório para a de planta-piloto e desta para a industrial. Em geral, utiliza-se o projeto por semelhança, em que os números adimensionais relevantes devem ser mantidos constantes entre ambos os sistemas. No entanto, os critérios e os números adimensionais a serem considerados dependerão em parte do processo.

Para a escala maior, devem-se assegurar as condições iniciais de sucesso na escala menor, mantendo-se a mesma proporcionalidade geométrica (semelhança geométrica), além de se respeitar as semelhanças cinemática e dinâmica entre os dois sistemas.

### **3.1. Semelhança Geométrica**

A fim de assegurar a semelhança geométrica entre um dado modelo (1) e um protótipo (2), todas as relações geométricas devem ser mantidas. Logo:

$$\left(\frac{D_t}{D_a}\right)_1 = \left(\frac{D_t}{D_a}\right)_2, \left(\frac{H_a}{D_a}\right)_1 = \left(\frac{H_a}{D_a}\right)_2, \left(\frac{H_L}{D_a}\right)_1 = \left(\frac{H_L}{D_a}\right)_2, \left(\frac{w_d}{D_a}\right)_1 = \left(\frac{w_d}{D_a}\right)_2 \quad (17)$$

### 3.2. Semelhança Dinâmica

A semelhança dinâmica implica a igualdade entre os números adimensionais relevantes a fluidodinâmica do sistema. Estes dependem do regime fluidodinâmico governante no agitador. Em regime laminar os números adimensionais que podem influenciar a fluidodinâmica do sistema são:  $N_{Re}$  e  $N_{Fr}$ , logo  $N_{po} = f(N_{Re}, N_{Fr})$ . Portanto, para assegurar a semelhança entre os dois sistemas, valem as igualdades:

$$(N_{Re})_1 = (N_{Re})_2 \text{ e } (N_{Fr})_1 = (N_{Fr})_2 \quad (18)$$

Entretanto, para sistemas com defletores ou com  $N_{re} < 300$ , o número de potência só é função de  $N_{Re}$ , assim:  $N_{po} = f(N_{Re})$ . Se o número de Reynolds do modelo e do protótipo se iguala e os números adimensionais geométricos são iguais, podemos concluir, que o número de potência de ambos os equipamentos será o mesmo:

$$(N_{P_o})_1 = (N_{P_o})_2 \quad (19)$$

A partir da igualdade do número de Reynolds:

$$\left(\frac{D_a^2 N \rho}{\mu}\right)_1 = \left(\frac{D_a^2 N \rho}{\mu}\right)_2 \quad (20)$$

E considerando que  $\rho_1 = \rho_2$  e  $\mu_1 = \mu_2$ , pode-se afirmar que:

$$(D_a^2 N)_1 = (D_a^2 N)_2$$

(21)

Com base nessa relação pode-se calcular, por exemplo, o número de rotações do protótipo a partir dos dados do modelo, calculando-se a potência a ser consumida pela unidade industrial. Para fluidos não newtonianos, o conceito de viscosidade efetiva pode ser empregado, de modo que dois sistemas serão semelhantes se:

$$\left( \frac{D_a^2 N \rho}{\mu_{ef}} \right)_1 = \left( \frac{D_a^2 N \rho}{\mu_{ef}} \right)_2 \quad (22)$$

Como os sistemas apresentam semelhança geométrica e dinâmica e são destinados a agitar o mesmo fluido ( $K_1 = K_2$  e  $n_1 = n_2$ ), a constante  $K$ , também é a mesma para ambos.

Assim:

$$\left( \frac{D_a^2 N \rho}{K(K_s N)^{n-1}} \right)_1 = \left( \frac{D_a^2 N \rho}{K(K_s N)^{n-1}} \right)_2 \quad (23)$$

Ou:

$$\left( \frac{N_1}{N_2} \right) = \left( \frac{D_{a2}^2}{D_{a1}^2} \right)^{\frac{2}{2-n}} \quad (24)$$

Em regime turbulento, o número de potência independe de  $N_{Re}$ , e conseqüentemente devem-se utilizar critérios adicionais para realizar a mudança de escala, segundo o objetivo da agitação (mistura, TC, emulsão, etc.). Nesse caso, a potência consumida depende somente do tipo de agitador e das relações geométricas do tanque-sistema de agitação.

### 3.3. Igualdade de potência por unidade de volume

Um dos critérios mais utilizados para ampliação de escala em um sistema de agitação é assegurar um dado nível de potência fornecida por unidade de volume. Esse critério é bastante simples e geralmente utilizado quando não existem outros mais específicos e adequados ao objetivo que se pretende atingir. Assim, determinado o nível de potência por unidade de volume que assegura um bom desempenho do sistema, esta será igual no modelo e no protótipo (os valores mais usuais estão mostrados na Tabela 4):

$$\left(\frac{P_o}{V}\right)_1 = \left(\frac{P_o}{V}\right)_2 \quad (25)$$

Em que V é o volume total do líquido contido no tanque (m<sup>3</sup>) e que pode ser calculado como:

$$V = \frac{\pi}{4} D_t^2 H_L \quad (26)$$

Substituindo a equação anterior na primeira, obtém-se:

$$\left(\frac{P_o}{D_t^2 H_L}\right)_1 = \left(\frac{P_o}{D_t^2 H_L}\right)_2 \quad (27)$$

Dividindo e multiplicando a equação anterior por D<sub>a</sub><sup>3</sup>, obtém-se:

$$\frac{P_{o1}}{\left(\frac{D_t}{D_a}\right)_1^2 \left(\frac{H_L}{D_a}\right)_1 (D_{a1})^3} = \frac{P_{o2}}{\left(\frac{D_t}{D_a}\right)_2^2 \left(\frac{H_L}{D_a}\right)_2 (D_{a2})^3} \quad (28)$$

E considerando que as relações geométricas são mantidas:

$$\frac{P_{o1}}{(D_{a1})^3} = \frac{P_{o2}}{(D_{a2})^3} \quad (29)$$

Substituindo a potência dada pela equação:  $P_o = N_{Po} N^3 D_a^5 \rho$ , e considerando a igualdade:

$$(N_{P_o})_1 = (N_{P_o})_2$$

Tem-se:

$$N_1^3 D_{a1}^2 = N_2^3 D_{a2}^2 \quad (30)$$

Essa abordagem pode ser empregada nas seguintes aplicações: extração líquido-líquido, processos de transferência de massa, dispersões gás-líquido, dissolução de sólidos em líquidos, processos de transferência de calor, mistura de líquidos miscíveis, entre outras.

### Níveis de potência por unidade de volume ( $P_o/V$ )

$P_o/V$		NÍVEL DE AGITAÇÃO
$[W \cdot m^{-3}]$	$[HP \cdot m^{-3}]$	
Até 80	Até 0,1	Débil
80 - 230	0,1 - 0,3	Suave
230 - 460	0,3 - 0,6	Média
460 - 750	0,6 - 1,0	Forte*
750 - 1500	1 - 2	Intensa
1500 - 2250	2 - 3	Muito forte
2250 - 3000	3 - 4	Superintensa

\*Valor mais usual.

**Tabela 4** – Níveis de potência por unidade de volume ( $P_o/V$ )<sup>1</sup>

#### 3.4. Igualdade na velocidade periférica do agitador

A velocidade calculada na ponta das pás do agitador, conhecida como velocidade periférica, é utilizada como critério de ampliação de escala quando há interesse em manter a mesma tensão de cisalhamento no sistema modelo e no industrial, como por exemplo, na

preparação de emulsões. Esse é um critério que assegura uma dispersão equivalente em ambos os sistemas. Assim:

$$v = \pi D_a N \quad (31)$$

Em que  $v$  é a velocidade periférica do agitador [m/s]. E considerando a igualdade dessa grandeza nos dois sistemas:

$$(D_a N)_1 = (D_a N)_2 \quad (32)$$

A equação anterior é usada em conjunto com a igualdade dos números de potência. Assim:

$$\frac{Po_1}{D_{a_1}^2} = \frac{Po_2}{D_{a_2}^2} \quad (33)$$

### 3.5. Tempo de mistura

Em algumas aplicações o conceito de tempo de mistura ( $t_m$ ) é utilizado para realizar mudança de escala. O tempo de mistura é determinado experimentalmente, medindo-se, por exemplo, o tempo necessário que uma alíquota de corante ou outro material convenientemente marcado se distribua homogeneamente na massa de líquido, em um sistema de agitado. O tempo de mistura depende do  $N_{Re}$  e fortemente da geometria do misturador e dos padrões de escoamento. Assim, as correlações disponíveis são específicas para cada tipo de agitador. Para agitadores de pás planas (Nienow, 1997), a seguinte relação é válida:

$$t_m = \frac{5,3}{N} \frac{1}{(N_{Po})^{1/3}} \left( \frac{D_a}{D_t} \right)^{-2} \quad (34)$$

Sano e Usui (1985) propuseram a correlação dada pela equação abaixo para agitadores tipo turbina de Rushton com as seguintes características:  $0,4 \leq \frac{D_a}{D_t} \leq 0,7$ ;  $0,1 \leq \frac{H_p}{D_t} \leq 0,4$   $\frac{w_d}{D_t} = 0,1$

2 a 8 pás, 4 defletores  $N_{Re} > 5 \times 10^3$

$$t_m = \frac{3,8}{N} \left( \frac{D_a}{D_t} \right)^{-1,8} \left( \frac{H_p}{D_t} \right)^{-0,51} n_{pás}^{-0,47} \quad (35)$$

Em que  $n_{pás}$  é o número de pás do impulsor [adimensional].

### 3.6. Igualdade de transferência de calor

Para mudança de escala adotando esse critério, correlações específicas devem ser utilizadas:

$$N_{Nu} = f(N_{Re}, N_{Pr}, \dots) \quad (36)$$

Resumindo, o critério de mudança de escala dos sistemas geometricamente semelhantes se reduz a uma relação do tipo:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{D_{a1}}{D_{a2}} \right)^x \quad (37)$$

Em que o expoente  $x$  depende do critério escolhido, além das igualdades que resultam dos outros números adimensionais. Outros critérios existem além dos descritos, como por exemplo, igualdade de áreas interfaciais. Em geral, diferentes critérios levam a fatores de escala diversos. Portanto é necessário, em cada caso, determinar a característica mais importante do processo que deve ser considerada.

## **Bibliografia**

1) TADINI, C. Telis, V.R.; Meirelles, A.J.A.; Pessoa, P.A. Operações Unitárias na indústria de alimentos. v1 1. ed. – Rio de Janeiro : LTC, 2016.

2) MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Unit operations of chemical engineering. 7ed. Boston: McGraw-Hill, 1140 p. 2005;

3) PERRY's chemical engineers handbook. Editor in Chief Don W. Green; Late Editor Robert H. Perry New York: McGraw-Hill, 2008.

NAO DIVULGAR