

# Capítulo

# 5

## Agitação e mistura

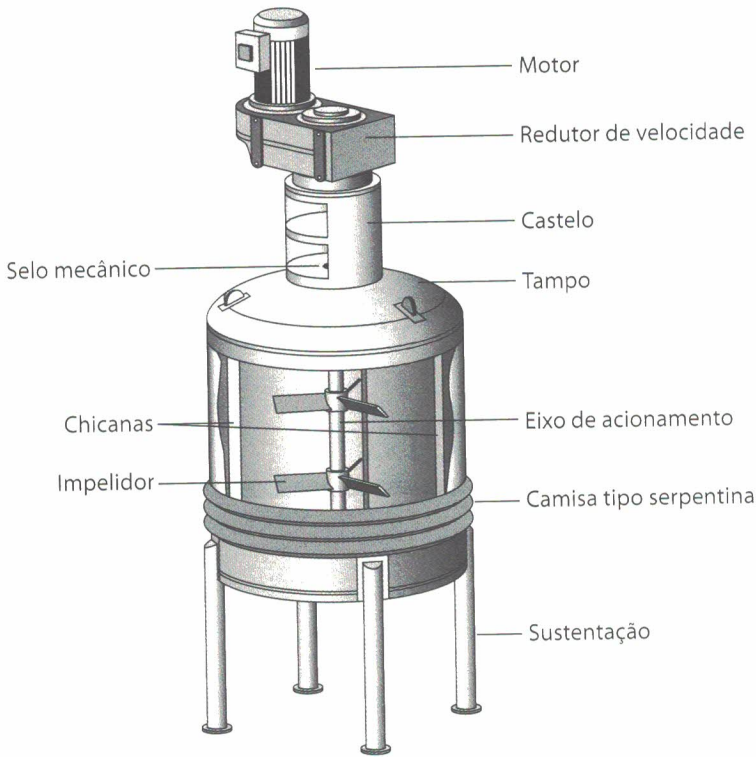
---

### 5.1 Introdução

A operação de agitação refere-se à movimentação de líquidos e de pastas em tanques por meio de dispositivos, cujo objetivo reside, entre outros, no incremento das taxas de transferência de calor e de massa, bem como na facilitação da realização de reações químicas. Enquanto a agitação pode envolver o movimento de uma única fase, a mistura está associada à presença mais de uma fase para diminuir a heterogeneidade entre fases e/ou características físico-químicas. Dessa maneira, pode ocorrer agitação sem mistura, desde que o líquido a ser processado venha ser uma substância pura. Já a mistura envolve, no mínimo, duas fases (ou dois líquidos). A agitação, por si só, refere-se à movimentação de uma determinada fase, usualmente, líquida. As técnicas de agitação e mistura são encontradas em diversos processos dentro de indústrias de transformação, principalmente como equipamentos destinados à promoção de reações químicas, trocadores de calor e de massa, podendo-se citar: reatores CSTR; tanques de floculação; tanques de dissolução de ácidos, base; tanques de dispersão de gases; tanques de extração; tanques de retenção de produto em processamento.

### 5.2 Características de um tanque agitado

Tanques agitados são equipamentos destinados a promover a agitação e/ou mistura de meios monofásicos (meio líquido), bifásicos (líquido e sólido) ou mesmo trifásicos (meios líquido, sólido e gasoso). Além de um tanque ou reservatório, o sistema de agitação é composto por acessórios, feito aqueles ilustrados na Figura 5.1. Nesta figura, pode-se identificar (Barbosa, 2004):



**Figura 5.1** Representação de um tanque agitado (BARBOSA, 2004).

*Tanque*: trata-se de um reservatório normalmente cilíndrico. Quando este reservatório é pressurizado, além da parte cilíndrica, o equipamento é dotado de tampos ou calotas (normalmente abaulados).

*Impelidores*: trata-se do acessório responsável por transmitir movimento e consequentemente a mistura ao fluido.

*Motorreductor*: sistema de acionamento de agitação, usualmente composto por um motor (hidráulico ou elétrico) e um redutor de velocidade, de modo a impor a rotação exigida para a mistura.

*Castelo*: acessório empregado para suportar o conjunto motorreductor, bem como para acomodar o(s) mancal(is) e o sistema de vedação do tanque.

*Camisas ou serpentinas*: esse acessório é utilizado para manter a temperatura constante na operação.

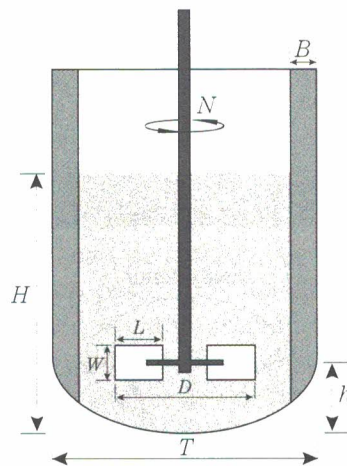
*Chicanas ou defletores*: são acessórios (chapas) utilizados internamente no reservatório com o intuito de redirecionar o fluxo de mistura, eliminando o problema de vórtice.

*Eixo de acionamento*: acessório empregado para suportar e/ou dar resistência mecânica ao(s) impelidor(es), auxiliando na transmissão de movimento ao fluido.

*Sustentação*: acessórios que suportam o sistema de agitação.

A Figura 5.2 apresenta uma configuração típica de um tanque agitado, na qual:

- $H$ , altura do líquido no reservatório;
- $T$ , diâmetro do tanque;
- $h$ , distância entre o impelidor e o fundo do tanque;
- $D$ , diâmetro do impelidor;
- $W$ , altura da pá do impelidor;
- $L$ , largura da pá do impelidor;
- $B$ , largura da chicana;
- $N$ , número de rotações do impelidor.



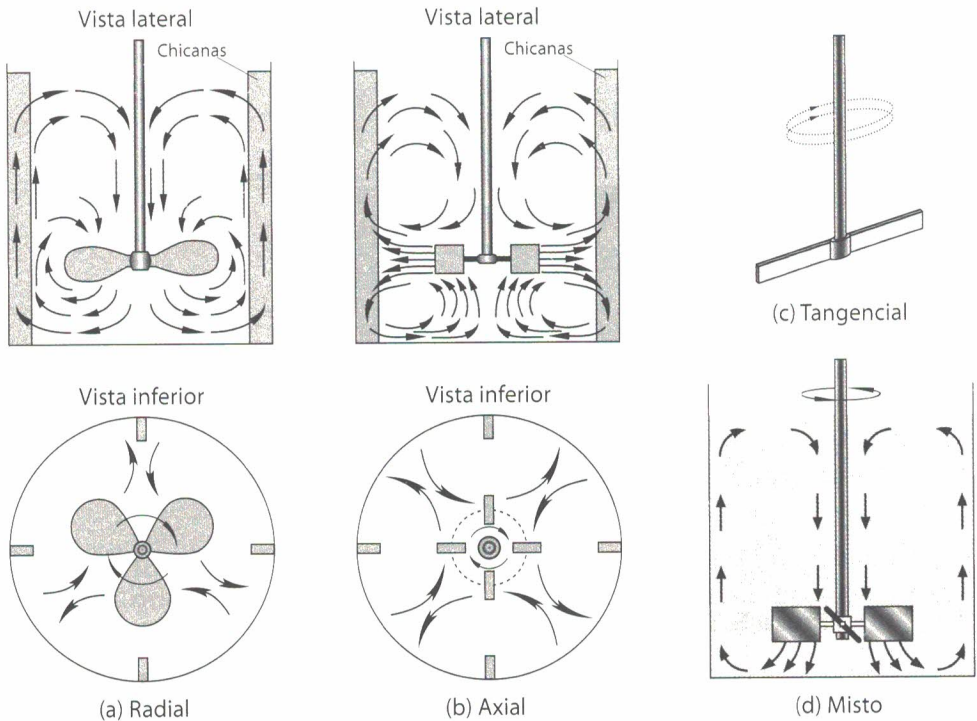
**Figura 5.2** Característica de um tanque agitado com chicanas (baseada em CHEREMISINOFF, 2000).

O sistema de agitação, do modo como apresentado, também pode ser enquadrado como sistema fluidomecânico na medida em que promove a movimentação da matéria, bem como da sua mistura, por meio da adição de energia ao meio considerado.

### 5.3 Padrões de fluxo

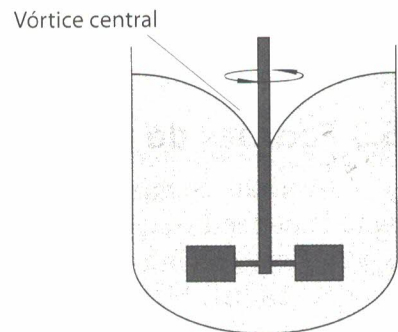
O padrão de fluxo ou de escoamento do líquido (ou mistura) em um tanque agitado depende da proporção geométrica e das características dos acessórios que o compõem (Figura 5.2). A velocidade do fluido possui três componentes: componente radial, Figura 5.3a, em que a direção de descarga do fluido a partir do impelidor coincide com a direção normal do eixo de acionamento. No fluxo radial o líquido é inicialmente direcionado para a parede do reservatório, ao longo do raio do tanque. A componente axial de velocidade, Figura 5.3b, é caracterizada por

apresentar direção, do líquido, paralela ao eixo de acionamento. Nesse tipo de fluxo, o líquido é direcionado para a base do reator, isto é, paralelo ao eixo do impelidor. A terceira componente de velocidade é a tangencial, Figura 5.3c, que propicia movimento circular ao redor do eixo de acionamento. Ressalte-se entretanto que, em maior ou menor grau, tais componentes coexistem simultaneamente, Figura 5.3d, e o predomínio de uma ou de outra componente deve-se, entre outros fatores, ao tipo de impelidor empregado na agitação.



**Figura 5.3** Padrões de escoamento (baseada em CHEREMISINOFF, 2000).

É importante mencionar que, em determinadas situações, a presença majoritária da componente tangencial de velocidade pode trazer desvantagens pois, ao apresentar trajetória circular propicia condições para o surgimento de vórtices, dificultando a mistura uniforme que, usualmente, se objetiva. Se existirem partículas sólidas, estas, devido à força centrífuga, são lançadas para fora do vórtice, concentrando-se junto à parede do tanque em vez de uma mistura homogênea em todo o volume. A utilização de chicanas, além de trazer estabilidade mecânica para o sistema, minimiza o aparecimento de vórtices.



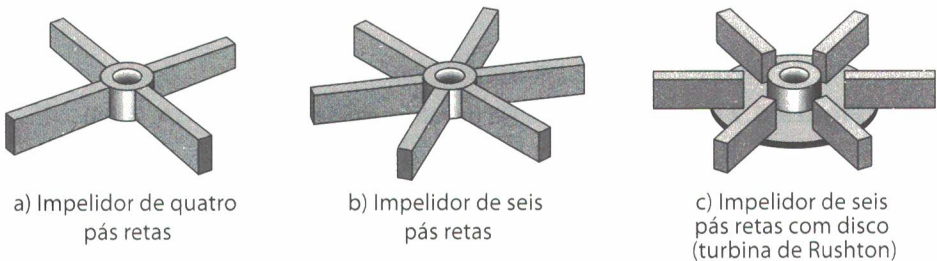
**Figura 5.4** Fenômeno de vórtice (baseada em BARBOSA, 2004).

## 5.4 Tipos de impelidores

Conforme pode ser observado na Figura 5.2, todo o tanque agitado contém um ou mais impelidores, também conhecidos como impulsores ou agitadores ou misturadores. A principal função desse acessório é o de provocar a movimentação do fluido, ou seja, proporcionar a mistura desejada. Há diversos modos de classificação de impelidores, destacando-se por tipo de padrão de fluxo, como descrito no item anterior, e por geometria. No que se refere à classificação de tipos de impelidores na dependência geométrica, têm-se:

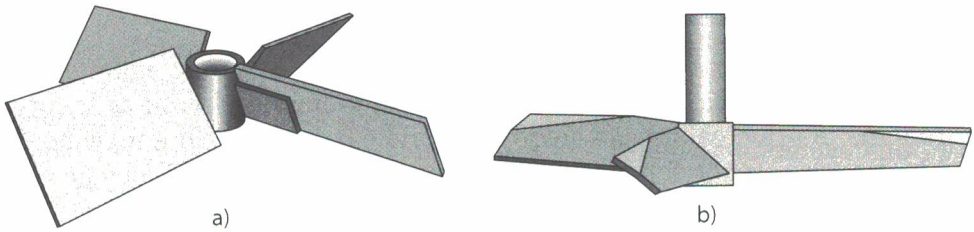
a) *Turbinas*. Estes impelidores são caracterizados por um ângulo de inclinação com a vertical, nos quais as lâminas podem ser curvadas. A ação de mistura se dá pela entrada e descarga de líquido pelas lâminas nas turbinas com fluxo radial que atinge as paredes do recipiente. Esse fluxo divide-se em correntes e provoca mistura devido a sua energia cinética. Existem diversos tipos de turbinas, podendo-se citar:

a.1) *pás retas 90°*. Este tipo de impelidor provoca fluxo predominantemente *radial*, podendo ser de 4 pás ou mais (Figuras 5.5a e 5.5b) e são adequados para agitação de fluidos viscosos. Existem também aqueles em um disco contendo pás (4 e 6, usualmente 6 pás), conhecidas como turbina de Rushton e que está ilustrada na Figura 5.5c. Tais impelidores são adequados para agitação de fluidos poucos viscosos, dispersão de gases em líquidos, mistura de fluidos imiscíveis.



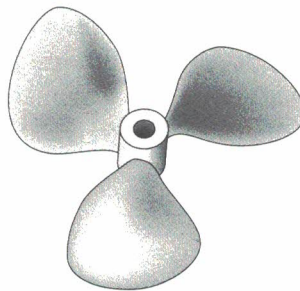
**Figura 5.5** Impelidores tipo turbina de pás retas (baseada em BARBOSA, 2004).

a.2) *pás inclinadas*. Este tipo construtivo de impelidor provoca fluxo predominantemente axial, sendo útil ao se trabalhar com suspensão de sólidos. Nessa classe, encontram-se os impelidores que possuem pás dispostas em 45° com a horizontal (Figura 5.6a) e aqueles conhecidos como de alta eficiência ou *hydrofoil* (Figura 5.6b).



**Figura 5.6** Impelidores tipo turbina de pás inclinadas: a) impelidor de quatro pás inclinadas; b) *hydrofoil* (baseada em BARBOSA, 2004).

b) *Hélice*. Conhecido também como hélice naval, este tipo de impelidor é caracterizado por apresentar padrão de fluxo predominantemente axial. A hélice naval (Figura 5.7) transforma o movimento de rotação do motor em movimento linear (axial), promovendo bombeamento no interior do tanque, ocasionando menor tempo de mistura quando comparado ao impelidor tipo turbina e pás. As desvantagens em relação às pás e às turbinas são o custo, a sensibilidade da operação em relação à geometria do recipiente e a sua localização dentro do tanque. O impelidor tipo hélice também se caracteriza por apresentar três parâmetros de projeto: o diâmetro, o passo e a rotação.



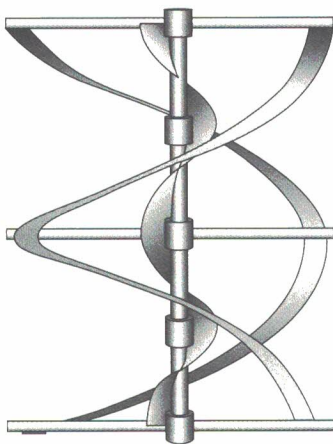
**Figura 5.7** Impelidor tipo hélice naval (baseada em BARBOSA, 2004).

Este tipo de impelidor é indicado para a operação com emulsões que apresentam baixa viscosidade, em solubilizações e para reações químicas; sendo por outro lado, inadequadas para suspensões que sedimentam rapidamente e em tanques destinados à absorção de gases.

c) *Pás*. Misturadores do tipo pás constituem-se de duas ou mais lâminas na vertical. Suas principais vantagens são a simplicidade de construção e o baixo custo. A principal desvantagem é que há baixo fluxo axial. Alta taxa de mistura é alcançada apenas nas vizinhanças das pás. Dentre os diversos tipos encontrados nessa classificação, estão:

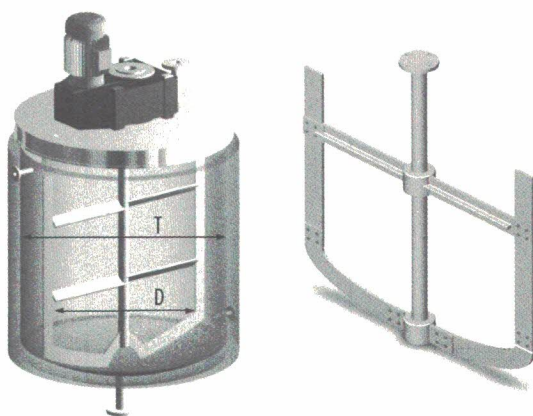
c.1) *Impelidor tipo espiral dupla ou helical ribbon* (Figura 5.8a). Este tipo de impelidor provoca o padrão de escoamento misto devido ao movimento das pás, sendo que a interna impulsiona o fluido para baixo e a externa para cima. É utilizado para fluidos newtonianos de viscosidade elevada

e para fluidos não newtonianos que apresentem alta consistência, como aqueles encontrados na indústria alimentícia. Opera com alta relação entre o diâmetro do impelidor em relação ao diâmetro do tanque (entre 0,90 e 0,95  $D/T$ ).



**Figura 5.8a** Impelidor tipo espiral dupla (baseada em BARBOSA, 2004).

c.2) *Impelidor tipo âncora* (Figura 5.8b). Este tipo de impelidor provoca o fluxo tangencial e normalmente utiliza raspadores. De igual forma ao impelidor tipo espiral dupla, é indicado quando se opera com fluidos que apresentam consistência elevada.



**Figura 5.8b** Impelidor tipo âncora.

A Tabela 5.1 apresenta informações úteis para o emprego dos impelidores em decorrência da viscosidade do fluido a ser agitado.

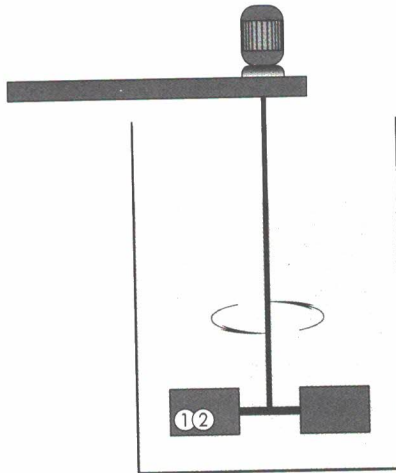
**Tabela 5.1** Emprego de impelidores quanto à faixa de viscosidade do fluido a ser agitado

Tipo de impelidor	Faixa de viscosidade (cP)
Pás	$10^2 - 3,0 \times 10^4$
Turbina	$10^0 - 3,0 \times 10^4$
Hélice	$10^0 - 10^4$
Âncora	$10^2 - 2,0 \times 10^3$
Espiral dupla	$10^4 - 2,0 \times 10^5$

## 5.5 Potência de agitação

Pode-se imaginar o movimento do fluido decorrente da ação do impelidor em um tanque agitado qual sistema de escoamento horizontal e circular em que, após certo tempo, o fluido retorna ao mesmo ponto de partida (Figura 5.9). Tendo em vista a presença do trabalho agregado,  $\dot{W}/g$ , devido à ação do impelidor, é possível descrever a equação de energia à semelhança daquelas utilizadas nas máquinas de fluxo (bombas e compressores). Assim, a Eq. (3.3) pode ser retomada como

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2} + \frac{\dot{W}}{g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2} + h_L \quad (5.1)$$



**Figura 5.9** Agitador como máquina de fluxo.

Como  $p_1 = p_2$ ,  $u_1 = u_2$  e  $z_1 = z_2$ , tem-se que o trabalho agregado é

$$\dot{W} = gh_L \quad (5.2)$$



Supondo, para efeito de análise, que a perda de carga – devido à movimentação do fluido em um tanque agitado – possa ser expressa aos moldes da Eq. (2.59), tem-se na Eq. (5.2)

$$\dot{W} = k_f \frac{u^2}{2} \quad (5.3)$$

Ao escrever a Eq. (5.3) em termos de potência útil,  $\dot{W}_u$ , pode-se multiplicá-la pela vazão mássica de fluido,

$$\dot{W} = k_f \frac{u^2}{2} \rho u A_i \quad (5.4)$$

Substituindo a definição de área,  $A_i = \pi D^2/4$ , em que  $D$ , conforme ilustrado na Figura 5.2, é o diâmetro do impelidor, na Eq. (5.4), esta é posta como

$$\dot{W}_u = \frac{\pi}{8} k_f \rho u^3 D^2 \quad (5.5)$$

Sabendo que a velocidade presente na Eq. (5.5) é proporcional tanto ao diâmetro do impelidor quanto à sua rotação,  $N$ , na forma

$$u \propto ND \quad (5.6)$$

tem-se na Eq. (5.5)

$$\dot{W}_u \propto \frac{\pi}{8} k_f \rho N^3 D^5 \quad (5.7)$$

Identificando o número de potência,  $N_{Po}$ , na Eq. (5.7), como

$$N_{Po} \equiv \frac{\pi}{8} k_f \quad (5.8)$$

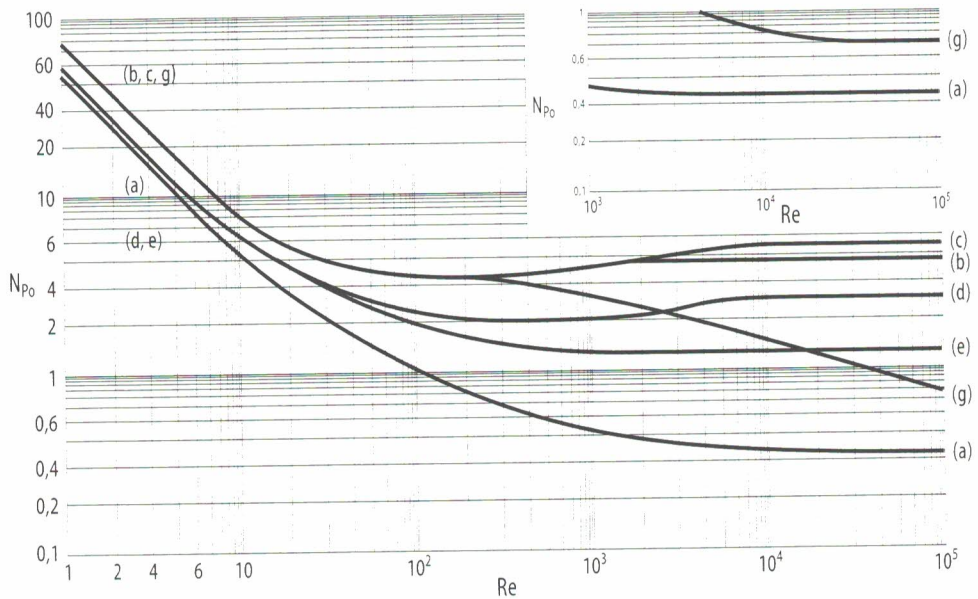
resulta da Eq. (5.7)

$$\dot{W}_u = N_{Po} \rho N^3 D^5 \quad (5.9)$$

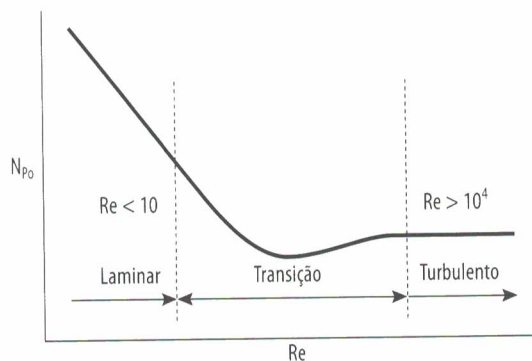
O número de potência, à semelhança do fator de atrito e do coeficiente de perda de carga localizada, representa o efeito de atrito em decorrência do nível de agitação do fluido e das características construtivas do tanque agitado. Por meio da Figura 5.10, de modo análogo ao *diagrama de Moody* (Figura 2.1), é possível obter o valor de  $N_{Po}$  em função do número de Reynolds do impelidor, o qual é definido por

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu} \quad (5.10)$$

Na Figura 5.10, como no diagrama de Moddy, é possível identificar comportamentos de mistura aos regimes encontrados em escoamentos em tubulações, regimes laminar, de transição e turbulento, conforme ilustra a Figura 5.11. Observa-se, em tais figuras, que o regime laminar situa-se em uma faixa de  $Re < 10$ , em que  $N_{Po} = k_L/Re$ , e uma região turbulenta em que se verifica  $N_{Po} = k_T$ . Os valores das constantes dependem, sobretudo, das características construtivas do tanque de agitação, ressaltando a natureza do impelidor e da chicana.



**Figura 5.10** Número de potência para diversos impelidores do tipo turbina em função do número de Reynolds do impelidor para fluidos newtonianos: (a) hélice naval; (b) pás retas; (c) pás retas e disco (turbina de Rushton),  $W/D=0,2$ ; (d) pás encurvadas,  $W/D= 1/8$ ; (e) pás inclinadas com passo de  $45^\circ$  e  $W/D=1/8$ ; (f) *shoured*; (g) pás retas sem chicanas (baseada em TREYBAL, 1980).



**Figura 5.11** Regimes característicos de mistura (baseada em BARBOSA, 2004).

### Exemplo 5.1

A crise energética mundial e a preservação do meio ambiente direcionam a atenção da sociedade para fontes renováveis de energia. Dentre estas, o biodiesel encontra-se como alternativa viável, uma vez que pode ser utilizado como substituinte ao óleo diesel fóssil. Pode-se utilizar o biodiesel como combustível e como aditivo para combustíveis, bem como ser usado puro a 100% (B100), em mistura com o diesel de petróleo (B20), ou em uma baixa proporção como aditivo de 1 a 5%. O biodiesel é definido como sendo um monoalquil éster de ácidos graxos, derivado de biomassa renovável, obtido usualmente por meio da reação catalítica de transesterificação em que ocorre a transformação de triglicerídeos em moléculas menores de ésteres de ácidos graxos, possuindo características similares às do combustível fóssil. Ressalte-se que as variedades de biomassa com potencial para produção de biodiesel são variadas, podendo-se citar: amendoim, algodão, mamona, soja, girassol, gergelim, canola, dendê, babaçu, palma. Dada a importância tecnológica da aplicação do biodiesel, considere a situação em que se deseja utilizar, para a homogeneização de um determinado biodiesel ( $\nu = 3,5$  cSt,  $\rho = 0,88$  g/cm<sup>3</sup>), um tanque de agitação que apresenta as seguintes características,  $D = 60$  cm;  $T = 180$  cm;  $h = 60$  cm;  $H = 180$  cm;  $N = 30$  rpm. Estime o valor da potência consumida pelo sistema de agitação, assumindo que o tanque apresenta turbina de seis pás retas e: (a) quatro chicanas; (b) sem chicanas.

### Solução

Verifica-se que foram fornecidas as dimensões do sistema de agitação, bem como o número de rotações do impelidor. Dessa maneira, em ambos os itens, a solução advém da utilização da Eq. (5.9), ou

$$\dot{W}_u = N_{Po} \rho N^2 D^3 \quad (1)$$

Foram fornecidos  $\rho = 0,88$  g/cm<sup>3</sup>,  $N = 30$  rpm = 0,5 rps; e  $D = 60$  cm, os quais, substituídos na Eq. (1) resultam em

$$\dot{W}_u = (0,88) \times (0,5)^3 \times (60)^5 \times N_{Po} = 8,554 \times 10^7 \times N_{Po} \text{ (erg/s)} \quad (2)$$

Há de se notar que a obtenção do valor da potência depende do valor do número de Reynolds. Este valor, por sua vez, depende das características do sistema de agitação e pode ser obtido por intermédio da utilização da Figura 5.10. Independentemente de o tanque conter ou não chicanas, para se utilizar tal figura, torna-se necessário conhecer o valor do número de Reynolds do impelidor, Eq. (5.10), aqui retomado como

$$\text{Re} = \frac{ND^2}{\nu} \quad (3)$$

Como  $N = 30$  rpm = 0,5 rps;  $D = 60$  cm e  $\nu = 3,5$  cSt = 0,035 cm<sup>2</sup>/s substituem-se esses valores na Eq. (3)

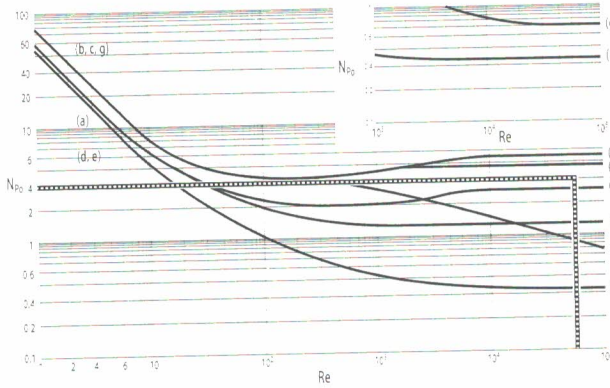
$$\text{Re} = \frac{(0,5)(60)^2}{(0,035)} = 5,143 \times 10^4 \quad (4)$$

A partir do resultado (4), tem-se:

a) tanque de agitação com quatro chicanas e impelidor tipo turbina de seis pás retas.

Neste caso, utiliza-se a Figura (5.10), considerando nesta a curva (b). Com o valor de  $Re = 5,143 \times 10^4$  na abscissa dessa figura, obtém-se o valor do número de potência, na ordenada, conforme ilustra a Figura 1 deste exemplo, igual a

$$N_{Po} = 4,0 \tag{5}$$



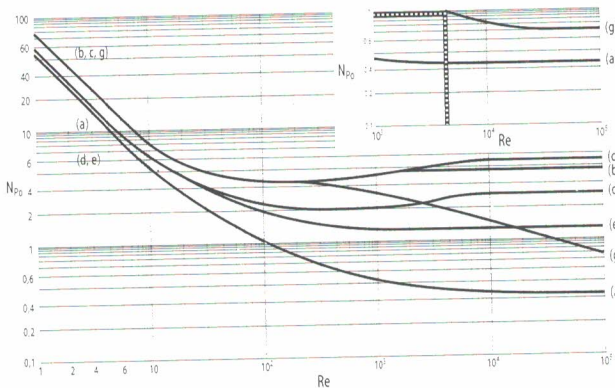
**Figura 1** Solução do item (a) do Exemplo 5.1.

Substituindo-se o resultado (5) na Eq. (2), chega-se a

$$\dot{W}_u = (8,554 \times 10^7)(4) = 34,216 \times 10^7 \text{ erg/s} = 34,216 \text{ W} \tag{6}$$

b) tanque de agitação sem chicanas e impelidor tipo turbina de seis pás retas. Neste caso, utiliza-se o gráfico menor da Figura (5.10), considerando nesta a curva (g). Com o valor de  $Re = 5,143 \times 10^4$  na abscissa dessa figura, obtém-se o valor do número de potência, na ordenada, conforme ilustra a Figura 2 deste exemplo, igual a

$$N_{Po} = 0,90 \tag{7}$$



**Figura 2** Solução do item (b) do Exemplo 5.1.

Levando o resultado (7) na Eq. (2), resulta

$$\dot{W}_u = (8,554 \times 10^7)(0,9) = 7,699 \times 10^7 \text{ erg/s} = 7,699 \text{ W} \quad (8)$$

Observe que o uso de chicanas aumenta pouco mais de quatro vezes o valor da potência utilizada para o sistema de agitação.

## 5.6 Níveis de agitação

O nível de agitação de um fluido,  $N_A$ , é definido pela relação potência/volume de agitação, cuja escala, em termos de (HP/m<sup>3</sup>) é de 0 a 4, conforme ilustra a Tabela 5.1. Define-se, portanto, o nível de agitação como

$$N_A = \frac{\dot{W}_u}{V_l} \quad (5.11)$$

sendo  $V_l$  o volume de líquido a ser agitado.

**Tabela 5.1** Nível de agitação

$N_A$ (HP/m <sup>3</sup> )	Nível de agitação
até 0,1	Débil
0,1 – 0,3	Suave
0,3 – 0,6	Média
0,6 – 1,0	Forte
1,0 – 2,0	Intensa
2,0 – 3,0	Muito forte
3,0 – 4,0	Muito intensa

O volume de líquido a ser agitado, na situação apresentada, está associado à vazão volumétrica de bombeamento,  $Q_p$ , e ao tempo de mistura,  $\tau$ , segundo

$$V_l \propto \tau Q_p \quad (5.12)$$

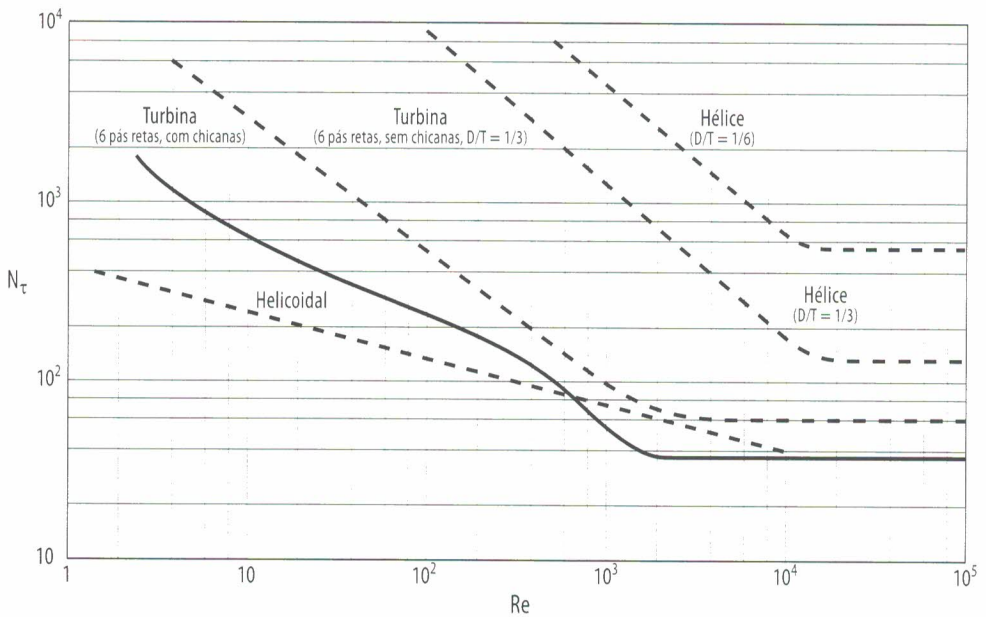
em que o tempo de mistura,  $\tau$ , está afeito à medida de tempo requerido para misturar líquidos miscíveis no volume do tanque agitado. O tempo de mistura é obtido a partir do conhecimento do número de mistura,  $N_\tau$ , este definido como

$$N_\tau \equiv \tau N \quad (5.13)$$

O valor do número de mistura, assim como o valor do número de potência, depende das características do tanque agitado, especialmente do tipo de impelidor. A Figura (5.12) apresenta a dependência desse número com o número de Reynolds do impelidor, Eq. (5.10), para alguns tipos de impelidores. Verifica-se, na situação em que  $N_T$  venha a ser constante, que o tempo de mistura é inversamente proporcional à velocidade de rotação do impelidor.

Já a vazão volumétrica de bombeamento,  $Q_p$ , é diretamente proporcional à velocidade do fluido,  $u$ , no tanque agitado, bem como da área do impelidor,  $A_i$ , por meio de

$$Q_p \propto uA_i \quad (5.14)$$



**Figura 5.12** Número de mistura em função do número de Reynolds do impelidor para alguns impelidores (baseada em MCCABE et al., 1993).

Tendo em vista que  $A_i \propto D^2$ , pode-se substituir esta relação em conjunto com a relação (5.6) na proporcionalidade (5.14), resultando em

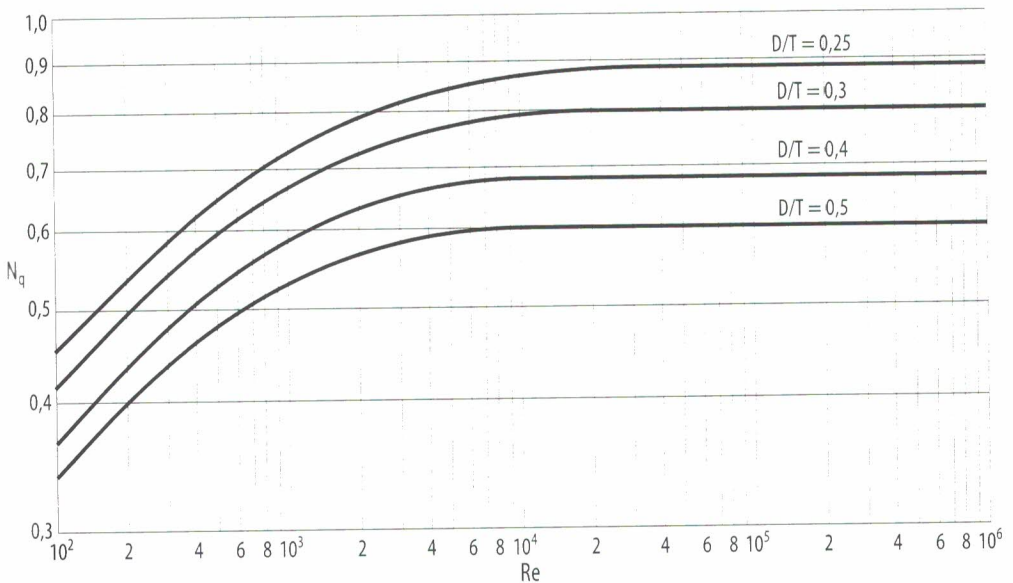
$$Q_p \propto ND^3 \quad (5.15)$$

De modo a tornar a expressão (5.14) uma igualdade, inclui-se a constante de proporcionalidade,  $N_q$ , a qual se refere ao número de bombeamento, ou

$$Q_p = N_q ND^3 \quad (5.16)$$

O valor do número de bombeamento depende das características do tanque agitado. A Figura (5.13) apresenta a dependência desse número com o número de Reynolds do impelidor, Eq. (5.10), para diversas relações entre o diâmetro do impelidor,  $D$ , e o diâmetro do tanque agitado,  $T$ . Há de se notar, finalmente, que o nível de agitação pode ser expresso por meio dos números de potência, de mistura e de bombeamento. Para tanto, basta substituir as definições (5.9), (5.13) e (5.16), na definição (5.11), obtendo-se

$$N_A \propto \rho \left( \frac{N_{Po}}{N_r N_q} \right) N^3 D^2 \quad (5.17)$$



**Figura 5.13** Número de bombeamento em função do número de Reynolds do impelidor, para algumas relações  $D/T$  para turbinas de pás inclinadas de  $45^\circ$  com chicanas (baseada em CHEREMISINOFF, 2000).

## 5.7 Fatores de correção no projeto de sistemas de agitação

- a) Quando existe mais de um impelidor no eixo (Figura 5.14), em que  $h \cong T$ , sendo  $h$  a distância entre os impelidores, a potência útil é dada por

$$\dot{W}_T = n \dot{W}_u \quad (5.18)$$

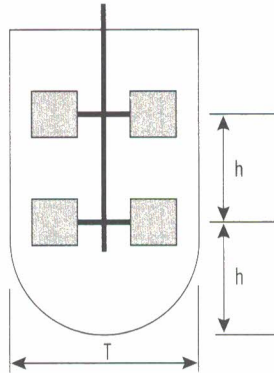
em que  $n$  é o número de impelidores e  $\dot{W}_u$  é a potência de um impelidor, cujo valor advém da Eq. (5.9) para agitadores de medidas padrão.

- b) Quando o tanque de agitação e o impelidor têm medidas diferentes das medidas padrão, utiliza-se um fator de correção,  $\varphi$ , da forma como se segue

$$\dot{W}_{\text{nova}} = \varphi \dot{W}_u \quad (5.19)$$

em que  $\dot{W}$  é potência de um agitador de medidas padrão; e o fator de correção obtido de

$$\varphi = \left[ \frac{(T/D)_{\text{nova}} (H/D)_{\text{nova}}}{(T/D)_{\text{padrão}} (H/D)_{\text{padrão}}} \right]^{1/2} \quad (5.20)$$



**Figura 5.14** Tanque com mais de um impelidor.

Sendo as medidas padrão, conforme representadas na Figura 5.2:

Número de chicana = 4

$$\frac{D}{T} = \frac{1}{3}; \quad \frac{h}{D} = 1; \quad \frac{H}{T} = 1; \quad \frac{B}{T} = \frac{1}{10}$$

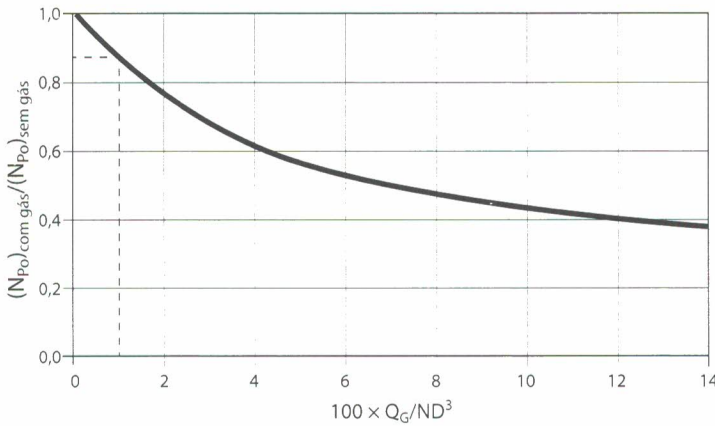
$$\frac{W}{D} = 0,2 \quad \text{e} \quad \frac{L}{D} = 0,25 \quad \text{para turbinas}$$

$$\frac{W}{D} = 0,25 \quad \text{para pás}$$

$$\frac{W}{D} = 0,20 - 0,25 \quad \text{para hélices}$$

- c) Quando o sistema é gaseificado, ou seja, na existência de borbulhamento de gás em um tanque agitado. Recomenda-se, neste caso, as relações geométricas:  $h/T = 0,6$ ;  $H/T = 1,2$ ;  $B/T = 1/12$ , mantendo-se as demais proporções apresentadas no item b. Nessa situação, a potência dissipada é reduzida, conforme ilustra a Figura 5.15.





**Figura 5.15** Potência dissipada em função da vazão de borbulhamento do gás para turbinas; QG é vazão volumétrica de injeção de gás (baseada em TREYBAL, 1980).

### Exemplo 5.2

Deseja-se avaliar um sistema de agitação destinado à oxidação de matéria orgânica de um efluente que apresenta massa específica igual a  $1,1 \text{ g/cm}^3$  e viscosidade dinâmica igual a  $50 \text{ cP}$ . Conhecendo-se a capacidade de descarga do impelidor, que é igual a  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$ , e a vazão requerida de ar igual a  $300 \text{ cm}^3/\text{s}$ , pede-se:

- projete o sistema de agitação, utilizando um impelidor do tipo turbina de pás inclinadas de  $45^\circ$  para um tanque de 100 litros considerando-o em medidas padrão de modo que o seu volume venha ser 20% maior do que o volume do líquido a ser agitado.
- obtenha o valor da potência útil de agitação referente ao sistema projetado no item anterior, assim como verifique o nível de agitação.

### Solução

a) Considerando a Figura 5.2, pode-se escrever que o volume do líquido é obtido de

$$V_\ell = \frac{\pi}{4} T^2 H \tag{1}$$

Tendo em vista que o sistema é gaseificado, sabe-se que  $H/T = 1,2$ , o qual substituído na Eq. (1), resulta em

$$V_\ell = 0,3 \pi T^3 \tag{2}$$

Informou-se que volume do tanque de agitação,  $V$ , é igual a 100 litros ( $1,0 \times 10^5 \text{ cm}^3$ ) e é 20% maior do que o volume do líquido a ser agitado ou seja,  $V = 1,2 V_\ell$  que, levado à Eq. (2), fornece

$$V = 0,36 \pi T^3 = 1,0 \times 10^5 \tag{3}$$

O diâmetro do tanque será

$$T = 44,55 \text{ cm} \quad (4)$$

que em termos construtivos,

$$T = 45 \text{ cm} \quad (5)$$

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos considerando-se as medidas padrão no caso de tanque agitado com borbulhamento de ar.

**Tabela 1** Dimensões características para o tanque de agitação referente ao Exemplo 5.2

Dimensões	Relações geométricas	Valores de projeto
Altura do líquido no tanque	$H = 1,2 \times T$	$H = 54 \text{ cm}$
Distância entre o impelidor e o fundo do tanque	$h = 0,6 \times T$	$H = 27 \text{ cm}$
Diâmetro do impelidor	$D = \frac{1}{3} \times T$	$D = 15 \text{ cm}$
Altura da pá do impelidor	$W = 0,20 \times D$	$W = 3 \text{ cm}$
Largura da pá do impelidor	$L = 0,25 \times D$	$L = 3,75 \text{ cm} \sim 4 \text{ cm}$
Largura da chicana	$B = \frac{1}{12} \times T$	$B = 3,75 \text{ cm} \sim 4 \text{ cm}$
Número de chicanas	Medida padrão	$n = 4$

b) Verifica-se, por inspeção da Tabela 1, que foram fornecidas as dimensões do sistema de agitação. Dessa maneira, a potência útil advém da utilização da Eq. (5.9), ou

$$\dot{W}_u = N_{Po} \rho N^3 D^5 \quad (6)$$

Nota-se na Eq. (6) que o valor do número de rotação,  $N$ , do impelidor não é conhecido. Todavia, conhece-se a capacidade de descarga do impelidor que é igual a  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $2,0 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), a qual se relaciona com o número de bombeamento por meio da Eq. (5.16), ou

$$Q_p = N_q N D^3 \quad (7)$$

De igual modo à Eq. (6), na Eq. (7) também se desconhece o valor de  $N$  que, por sua vez, está associado ao número de Reynolds do impelidor por intermédio da Eq. (5.10), ou

$$\text{Re} = \frac{\rho N D^2}{\mu} \quad (8)$$

Observa-se que valores para o número de Reynolds do impelidor encontram-se nas abscissas das Figuras (5.10) e (5.13), utilizadas para a determinação dos números de potência e de bombeamento, respectivamente. A solução, portanto, para este item

dá-se pelo método da tentativa e erro. Ou seja, atribui-se um valor para  $N$ , calcula-se o valor de  $Re$  por meio da Eq. (8) e, à primeira vista, utiliza-se a Figura 5.10 para a obtenção do  $N_{Po}$ , advindo da ordenada de tal figura. Contudo, ao inspecionar-se a ordenada da Figura 5.10, Eq. (6), constatam-se duas incógnitas: o próprio  $N$ , assim como  $\dot{W}_u$ . Por outro lado, ao utilizar-se a Figura 5.13 o valor encontrado na ordenada será o número de bombeamento, Eq. (7), em que  $Q_p = 2,0 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Assim, portanto, recalcula-se o valor de  $N$  e o compara com o valor de  $N$  anteriormente atribuído. Tendo em vista que  $D = 15 \text{ cm}$ ;  $\mu = 50 \text{ cP} = 0,5 \text{ g/cm} \cdot \text{s}$ , e  $\rho = 1,1 \text{ g/cm}^3$ , tem-se nas Eq. (8) e (7), respectivamente

$$Re = \frac{(1,1)(15)^2}{(0,5)} N = 495 \times N \quad (9)$$

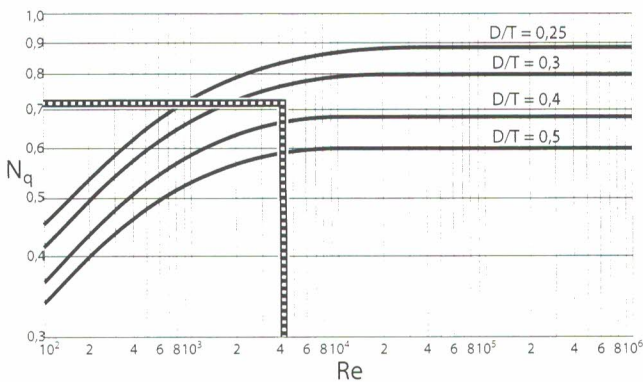
sendo

$$N = \frac{Q_p}{N_q D^3} = \frac{(2,0 \times 10^4)}{(15)^3} \frac{1}{N_q} = \frac{5,926}{N_q} \quad (10)$$

A Tabela 2 apresenta as iterações referentes a este item. Já a Figura 1 ilustra o resultado final.

**Tabela 2** Iterações para a estimativa do valor do número de rotações do Exemplo 5.2

Iteração	N (rps)	Re = 495 × N	$N_q$ (Figura 5.13, curva D/T = 1/3)	$N_{\text{novo}} = 5,926/N_q$
1	1	495,00	0,570	10,40
2	10,40	5.148,00	0,720	8,73
3	8,73	4.331,35	0,715	8,29
4	8,29	4.103,615	0,714	8,30
5	8,30	4.108,5	0,714	8,30



**Figura 1** Solução do item (b) do Exemplo 5.2.

Os números de rotação, de Reynolds do impelidor e de bombeamento são, respectivamente,

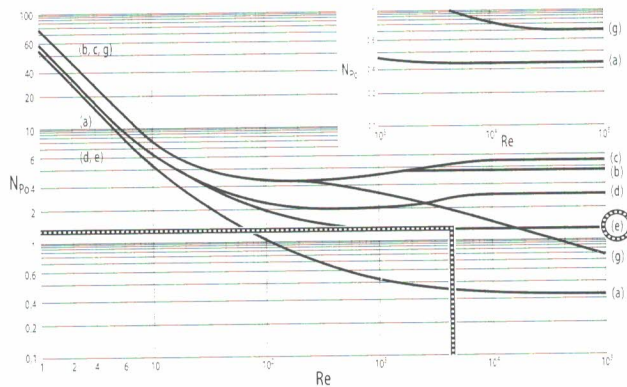
$$N = 8,30 \text{ rps} \quad (11)$$

$$Re = 4.108,5 \quad (12)$$

$$N_q = 0,714 \quad (13)$$

De posse do valor do número de Reynolds do impelidor, Eq. (12), utiliza-o na abscissa da Figura 5.10, curva (e) (considerando-a válida para a presente situação), de modo a obter, na ordenada dessa figura, o valor do número de potência para o sistema de agitação não borbulhado, conforme ilustra a Figura 2. O valor encontrado para o número de potência é

$$N_{Po} = 1,4 \quad (14)$$



**Figura 2** Obtenção do  $N_{Po}$  do Exemplo 5.2.

A potência útil, neste exemplo, refere-se ao sistema gaseificado. Nessa situação, torna-se necessária a correção do número de potência utilizando-se, por exemplo, a Figura (5.15). Nessa figura, a abscissa é obtida por intermédio de

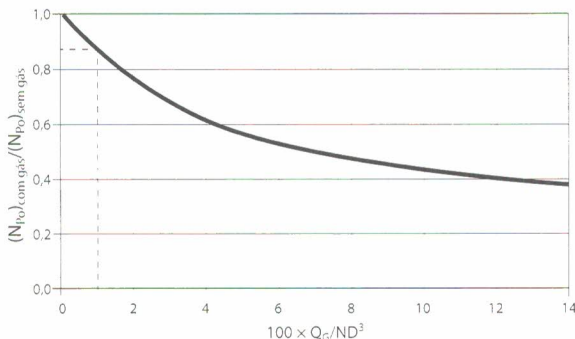
$$x = 100 \times \frac{Q_G}{ND^3} \quad (15)$$

Tendo em vista que  $Q_G = 300 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $N = 8,3 \text{ rps}$  e  $D = 15 \text{ cm}$ , tem-se em (15):

$$x = 100 \times \frac{(300)}{(8,3)(15)^3} = 1,07 \quad (16)$$

Utilizando-se o valor (16) na Figura (5.15), obtém-se a razão entre o número de potência com a injeção de ar e aquele sem injeção de ar igual a (Figura 3)

$$\frac{(N_{Po})_{\text{com gás}}}{(N_{Po})_{\text{sem gás}}} = 0,89 \quad (17)$$



**Figura 3** Obtenção do  $N_{Po}$  para o sistema gaseificado do Exemplo 5.2.

O valor do número de potência do sistema gaseificado será obtido substituindo (14) na Eq. (17) de onde resulta

$$(N_{Po})_{com\ gás} = (0,89)(1,4) = 1,246 \tag{18}$$

O valor da potência útil é obtido após substituir os valores (11), (20),  $D = 15\text{ cm}$  e, e  $\rho = 1,1\text{ g/cm}^3$  na Eq. (6)

$$\dot{W}_u = 1,246 \times (1,1) \times (8,3)^3 \times (15)^5 = 5,951 \times 10^8\text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^3$$

ou

$$\dot{W}_u = 59,51\text{ W} = 0,0796\text{ HP} \tag{19}$$

O valor do nível de agitação do sistema advém da Eq. (5.14), ou

$$N_A = \frac{\dot{W}_u}{V_\ell} \tag{20}$$

Sabendo que  $V = 1,2 V_\ell$  e  $V = 100\text{ litros} = 0,1\text{ m}^3$ , tem-se  $V_\ell = 0,0833\text{ m}^3$  que substituído em conjunto com  $\dot{W}_u = 0,0796\text{ HP}$  na Eq. (20), resulta em

$$N_A = \frac{(0,0796)}{(0,0833)} = 0,956\text{ HP/m}^3 \tag{21}$$

Observa-se por inspeção da Tabela 5.2 que o nível de agitação é considerado *forte*.

### 5.8 Ampliação de escala

No desenvolvimento de processos precisa-se passar da escala de laboratório para a escala de planta piloto. As condições que tiveram sucesso na escala menor devem ser mantidas no tamanho maior, além de ser conservada a mesma proporcionalidade geométrica (semelhança geométrica). Para a ampliação de escala, podem ser adotados os seguintes critérios, os quais dependerão do objetivo da operação de agitação.

### 5.8.1 Semelhança geométrica

Considerando-se as grandezas físicas presentes na Figura (5.2) e tendo como base o diâmetro do impelidor, têm-se as seguintes relações entre o modelo (subscrito 1) e o protótipo (subscrito 2)

$$\left(\frac{T}{D}\right)_1 = \left(\frac{T}{D}\right)_2; \quad \left(\frac{H}{D}\right)_1 = \left(\frac{H}{D}\right)_2; \quad \left(\frac{h}{D}\right)_1 = \left(\frac{h}{D}\right)_2;$$

$$\left(\frac{B}{D}\right)_1 = \left(\frac{B}{D}\right)_2; \quad \left(\frac{W}{D}\right)_1 = \left(\frac{W}{D}\right)_2; \quad \left(\frac{L}{D}\right)_1 = \left(\frac{L}{D}\right)_2$$

### 5.8.2 Semelhança fluidodinâmica

Obedecida a semelhança geométrica, ou seja, mantendo-se o mesmo tipo de agitador, outro critério trata-se da semelhança fluidodinâmica, a qual envolve o comportamento de mistura, traduzida nos regimes apresentados na Figura 5.11.

b.1) *Regime laminar*

$$N_{Po} = \frac{k_L}{\text{Re}} \quad (5.21)$$

ou

$$k_L = \text{Re } N_{Po} \quad (5.22)$$

Como se trata do mesmo tipo de agitador

$$(k_L)_1 = (k_L)_2 \quad (5.23)$$

Substituindo a Eq. (5.25) na Eq. (5.23)

$$(\text{Re } N_{Po})_1 = (\text{Re } N_{Po})_2 \quad (5.24)$$

Identificando as definições (5.9) e (5.10) na igualdade (5.24)

$$\left(\frac{1}{\mu} \frac{\dot{W}_u}{N^2 D^3}\right)_1 = \left(\frac{1}{\mu} \frac{\dot{W}_u}{N^2 D^3}\right)_2 \quad (5.25)$$

No caso de o fluido de trabalho não ser alterado,

$$\left(\frac{\dot{W}_u}{N^2 D^3}\right)_1 = \left(\frac{\dot{W}_u}{N^2 D^3}\right)_2 \quad (5.26)$$

b.2) *Regime turbulento*

$$N_{Po} = k_T \quad (5.27)$$

Como se trata do mesmo tipo de agitador

$$(k_T)_1 = (k_T)_2 \tag{5.28}$$

Identificando as definições (5.9) na igualdade (5.28)

$$\left( \frac{\dot{W}_u}{\rho N^3 D^5} \right)_1 = \left( \frac{\dot{W}_u}{\rho N^3 D^5} \right)_2 \tag{5.29}$$

Na situação de o fluido de trabalho não ser alterado, a igualdade (5.29) é simplificada para

$$\left( \frac{\dot{W}_u}{N^3 D^5} \right)_1 = \left( \frac{\dot{W}_u}{N^3 D^5} \right)_2 \tag{5.30}$$

### 5.8.3 Manutenção do nível de agitação

Nesta categoria, a ampliação de escala é baseada na manutenção da intensidade de agitação entre as situações 1 e 2, ou

$$(N_A)_1 = (N_A)_2 \tag{5.31}$$

Trazendo a Eq. (5.14) na Eq. (5.31), tem-se

$$\left( \frac{\dot{W}_u}{V_\ell} \right)_1 = \left( \frac{\dot{W}_u}{V_\ell} \right)_2 \tag{5.32}$$

Tendo como base a Figura (5.2), o volume do líquido a ser agitado é, tanto para o modelo quando para o protótipo,

$$V_\ell = \frac{\pi T^2}{4} H \tag{5.33}$$

Substituindo as definições (5.9) e (5.33) na igualdade (5.32), resulta em

$$\left( \rho \frac{N_{Po} N^2 D^3}{T^2 H} \right)_1 = \left( \rho \frac{N_{Po} N^2 D^3}{T^2 H} \right)_2 \tag{5.34}$$

No caso de o regime ser *laminar*, pode-se substituir a Eq. (5.21) na Eq. (5.34), como identificando a definição (5.10) e a igualdade (5.23) no resultado obtido chega-se a

$$\left( \mu \frac{N^2 D^3}{T^2 H} \right)_1 = \left( \mu \frac{N^2 D^3}{T^2 H} \right)_2 \tag{5.35}$$

Rearranjando a igualdade (5.35),

$$\left[ \mu \frac{N^2}{(T/D)^2(H/D)} \right]_1 = \left[ \mu \frac{N^2}{(T/D)^2(H/D)} \right]_2 \quad (5.36)$$

Identificando as semelhanças geométricas na igualdade (5.35), esta é retomada tal como se segue

$$(\mu N^2)_1 = (\mu N^2)_2 \quad (5.37)$$

Simplificando a igualdade (5.36) para o mesmo fluido de trabalho, tem-se

$$(N)_1 = (N)_2 \quad (5.38)$$

Para o regime *turbulento*, substitui-se a Eq. (5.27) na Eq. (5.34), bem como identificando a definição (5.10) e a igualdade (5.23) no resultado obtido, chega-se a

$$\left( \rho \frac{k_T N^3 D^5}{T^2 H} \right)_1 = \left( \rho \frac{k_T N^3 D^5}{T^2 H} \right)_2 \quad (5.39)$$

Identificando a igualdade (5.28) na igualdade (5.39),

$$\left( \rho \frac{N^3 D^5}{T^2 H} \right)_1 = \left( \rho \frac{N^3 D^5}{T^2 H} \right)_2 \quad (5.40)$$

Reescrevendo a Eq. (5.40)

$$\left[ \rho \frac{N^3 D^2}{(T/D)^2(H/D)} \right]_1 = \left[ \rho \frac{N^3 D^2}{(T/D)^2(H/D)} \right]_2 \quad (5.41)$$

Depois de identificar as semelhanças geométricas na igualdade (5.41), esta é posta como

$$(\rho N^3 D^2)_1 = (\rho N^3 D^2)_2 \quad (5.42)$$

No caso de o fluido de trabalho não ser alterado

$$(N^3 D^2)_1 = (N^3 D^2)_2 \quad (5.43)$$

### Exemplo 5.3

Considerando-se os enunciados apresentados nos Exemplos 5.1 e 5.2, pede-se:

- Calcule o valor da potência útil ao se reduzir pela metade o valor do número de rotações do impelidor referente ao sistema, com chicanas, estudado no Exemplo 5.1.
- Obtenha o valor da potência útil, bem como projete o sistema de agitação referente ao Exemplo 5.2, para tratar 10.000 litros de efluente, mantendo-se o mesmo nível de agitação.



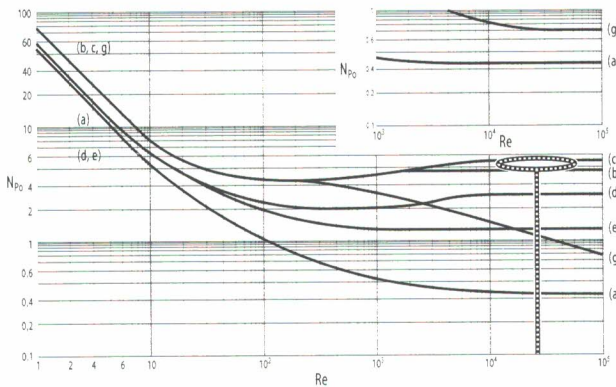
### Solução

a) Note que ao se reduzir o número de rotações,  $N$ , diminui-se o valor do número de Reynolds do impelidor e, por consequência, altera-se o comportamento fluidodinâmico do sistema (veja a Figura 5.11). Como é estabelecida a semelhança geométrica do sistema de agitação (não houve modificação no projeto do tanque agitado), este item será resolvido por meio da técnica de semelhança fluidodinâmica, se houver. Dessa maneira, verifica-se do Exemplo 5.1, para o tanque com chicanas, que o valor do número de Reynolds do impelidor é  $Re = 5,143 \times 10^4$ , o qual é definido pela Eq. (5.10), ou

$$Re = \frac{ND^2}{\nu} \tag{1}$$

em que  $D = 60$  cm e  $\nu = 0,035$  cm<sup>2</sup>/s. Tendo em vista que, na atual situação, o valor de  $N$  é reduzido pela metade, o novo valor para o número de Reynolds do impelidor é  $Re = 2,571 \times 10^4$ . Levando este valor na abscissa da Figura 5.10, verifica-se que se trata do regime turbulento (veja a Figura 1). Como o fluido de trabalho não foi alterado e se trata de regime turbulento, utiliza-se a Eq. (5.33) ou

$$\left( \frac{\dot{W}_u}{N^3 D^5} \right)_1 = \left( \frac{\dot{W}_u}{N^3 D^5} \right)_2 \tag{2}$$



**Figura 1** Solução do item (a) do Exemplo 5.1.

Sabendo que se manteve o mesmo impelidor  $D_1 = D_2 = 60$  cm, Eq. (2) é reescrita como

$$\left( \dot{W}_u \right)_2 = \left( \dot{W}_u \right)_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^3 \tag{3}$$

Do enunciado do item (a), observa-se  $N_1 = 2N_2$ , que substituído na Eq. (3) resulta

$$\left( \dot{W}_u \right)_2 = \frac{\left( \dot{W}_u \right)_1}{8} \tag{4}$$

Do exemplo (5.1)  $\dot{W}_u = 34,216 \text{ W}$ . Substituindo esse valor na Eq. (4),

$$\left(\dot{W}_u\right)_2 = \frac{34,216}{8} = 4,277 \text{ W} \quad (5)$$

b) Este item trata da ampliação de escala, no sentido de já se ter o projeto advindo do Exemplo 5.2. Em assim sendo, pode-se retomar a Eq. (2) desse exemplo como

$$V_l = 0,3 \pi T^3 \quad (6)$$

Sabendo que a unidade deverá processar 10.000 litros ( $1,0 \times 10^7 \text{ cm}^3$ ) de efluente, tem-se na Eq. (6)

$$1,0 \times 10^7 = 0,3 \pi T^3 \quad (7)$$

resultando no diâmetro para o tanque agitado igual a

$$T = 219,74 \text{ cm} \quad (8)$$

Em termos construtivos,

$$T = 220 \text{ cm} \quad (9)$$

O restante dos valores para as dimensões do sistema de agitação pode ser obtido à semelhança da Tabela 1 apresentada no exemplo anterior. Todavia, conhecem-se tais valores, conforme apresenta a segunda coluna da Tabela 1 do presente exemplo. Dessa maneira pode-se, neste exemplo, utilizar a semelhança geométrica, conforme apontada na terceira coluna. Na última coluna dessa tabela, estão os resultados das dimensões do sistema de agitação com borbulhamento de ar.

**Tabela 1** Dimensões características para o tanque de agitação referente ao Exemplo 5.3

Dimensões	Valores de projeto	Relação geométrica	Valores de projeto (resultado arredondado)
Diâmetro do tanque	$T_1 = 45 \text{ cm}$		$T_2 = 220 \text{ cm}$
Diâmetro do impelidor	$D_1 = 15 \text{ cm}$	$D_2 = D_1 \times (T_2/T_1)$	$D_2 = 74 \text{ cm}$
Altura do líquido no tanque	$H_1 = 54 \text{ cm}$	$H_2 = H_1 \times (D_2/D_1)$	$H_2 = 264 \text{ cm}$
Distância entre o impelidor e o fundo do tanque	$h_1 = 27 \text{ cm}$	$h_2 = h_1 \times (D_2/D_1)$	$h_2 = 132 \text{ cm}$
Altura da pá do impelidor	$W_1 = 3 \text{ cm}$	$W_2 = W_1 \times (D_2/D_1)$	$W_2 = 15 \text{ cm}$
Largura da pá do impelidor	$L_1 = 4 \text{ cm}$	$L_2 = L_1 \times (D_2/D_1)$	$L_2 = 20 \text{ cm}$
Largura da chicana	$B_1 = 4 \text{ cm}$	$B_2 = B_1 \times (D_2/D_1)$	$B_2 = 20 \text{ cm}$
Número de chicanas	$n = 4$		$n = 4$

Recorde-se que a estimativa do valor de  $N$ , no Exemplo 5.2, deu-se por tentativa e erro. Entretanto, tendo em vista que se trata do mesmo fluido de trabalho e que se preserva o mesmo nível de agitação do Exemplo (5.2) (agitação forte), o regime é, portanto, turbulento. Nesse caso, pode-se utilizar a Eq. (5.30) para a estimativa do valor do novo número de rotação do impelidor,

$$\left(\frac{\dot{W}_u}{N^3 D^5}\right)_1 = \left(\frac{\dot{W}_u}{N^3 D^5}\right)_2 \quad (10)$$

ou

$$N_2 = N_1 \left(\frac{\dot{W}_{u_2}}{\dot{W}_{u_1}}\right)^{1/3} \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{5/3} \quad (11)$$

Sabendo que  $D_1 = 15$  cm,  $D_2 = 74$  cm e  $N_1 = 8,30$  rps, tem-se na Eq. (11),

$$N_2 = (8,30) \left(\frac{15}{74}\right)^{5/3} \left(\frac{\dot{W}_{u_2}}{\dot{W}_{u_1}}\right)^{1/3} = 0,581 \times \left(\frac{\dot{W}_{u_2}}{\dot{W}_{u_1}}\right)^{1/3} \quad (12)$$

Do Exemplo (5.2) sabe-se que  $(\dot{W}_u)_1 = 59,51$  W. Contudo, desconhece-se o valor de  $(\dot{W}_u)_2$ . Por outro lado, foi informado que se mantém o mesmo nível de agitação, ou

$$(N_A)_1 = (N_A)_2 \left(\frac{\dot{W}_u}{V_\ell}\right)_1 = \left(\frac{\dot{W}_u}{V_\ell}\right)_2 \quad (13)$$

O valor da potência útil será, portanto,

$$(\dot{W}_u)_2 = (\dot{W}_u)_1 \left(\frac{V_{\ell_2}}{V_{\ell_1}}\right) \quad (14)$$

É importante assinalar que o sistema de agitação do Exemplo (5.2) foi projetado para 83,33 litros de efluente (note que o volume do tanque de 100 litros é 20% superior ao de líquido). Dessa maneira, pode-se substituir  $(\dot{W}_u)_1 = 59,51$  W,  $V_\ell = 83,33$  ℓ e  $V_{\ell_2} = 10.000$  ℓ na Eq. (14), ou

$$(\dot{W}_u)_2 = (59,51) \left(\frac{10.000}{83,33}\right) = 7.141,49$$
 W (15)

Substituindo os valores de potência útil  $(\dot{W}_u)_1 = 59,51$  W e  $(\dot{W}_u)_2 = 7.141,49$  W na Eq. (12), obtém-se o seguinte valor para o novo número de rotações do impelidor.

$$N_2 = 0,581 \left(\frac{7.141,49}{59,51}\right)^{1/3} = 2,87$$
 rps (16)

## 5.9 Bibliografia consultada

- BARBOSA, J. E. *Dimensionamento do eixo do impelidor em sistemas de agitação e mistura para processos industriais*. Dissertação de Mestrado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- CHEREMISINOFF, N. P. *Handbook of chemical processing equipment*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.
- COKER, A. K. *Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants*. 4. ed. Oxford: Elsevier, 2007.
- JOAQUIM JR., C. F.; CEKINSKI, E.; NUNHEZ, J. R.; URENHA, L. C. *Agitação e mistura na indústria*. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007.
- MCCABE, L. W.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. *Unit operations of chemical engineering*. 5. ed. New York: McGrawHill, 1993.
- SILVA, J. L. G. *Análise crítica das correlações e parâmetros fundamentais em sistemas de agitação*. Dissertação de Mestrado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- SPOGIS, N. *Metodologia para determinação de curvas de potência e fluxos característicos para impelidores axiais, radiais e tangenciais utilizando a fluidodinâmica computacional*. Dissertação de Mestrado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- TREYBAL, R. E. *Mass-transfer operation*. 3. ed., Singapore: McGraw-Hill, (1980).

## 5.10 Nomenclatura

$A_i$	Área descrita pelo impelidor.....	$[L^2]$
$B$	Largura da chicana no tanque agitado .....	$[L]$
$D$	Diâmetro do impelidor .....	$[L]$
$g$	Aceleração gravitacional; constante gravitacional.....	$[L \cdot T^{-2}]$
$h$	Distância entre o impelidor e o fundo do tanque agitado .....	$[L]$
$H$	Altura do líquido no tanque agitado .....	$[L]$
$h_L$	Perda de carga.....	$[L]$
$L$	Largura da pá do impelidor.....	$[L]$
$k_f$	Coefficiente de perda de carga localizada .....	adimensional
$n$	Número de impelidores.....	adimensional
$N$	Número de rotação do impelidor.....	$[T^{-1}]$
$N_A$	Nível de agitação .....	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-3}]$
$p$	Pressão exercida no fluido .....	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$Q_p$	Vazão volumétrica de bombeamento.....	$[L^3 \cdot T^{-1}]$

☐	Diâmetro do tanque agitado .....	[L]
☐	Velocidade do fluido no tanque agitado .....	[L·T <sup>-1</sup> ]
☐	Volume de líquido a ser agitado .....	[L <sup>3</sup> ]
☐	Altura da pá do impelidor .....	[L]
☐	Trabalho .....	[L <sup>2</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
☐	Potência útil .....	[M·L <sup>2</sup> ·T <sup>-3</sup> ]
☐	Cota, altura .....	[L]

### Letras gregas

•	Peso específico .....	[M·L <sup>-2</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
▼	Rendimento .....	adimensional
◄	Fator de correção .....	adimensional
▲	Viscosidade dinâmica .....	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-1</sup> ]
▼	Viscosidade cinemática .....	[L <sup>2</sup> ·T <sup>-1</sup> ]
♠	Massa específica .....	[M·L <sup>-3</sup> ]
⊖	Tempo de mistura .....	[T]

### Subscritos

- ☐ Total
- ☐☐ Cotas; casos

### Números dimensionais

- ☐ número de potência;
- ☐ número de bombeamento;
- ☐ número de mistura;
- ☐ número de Reynolds do impelidor.