

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):

Integrado
Optimizar
Atividade

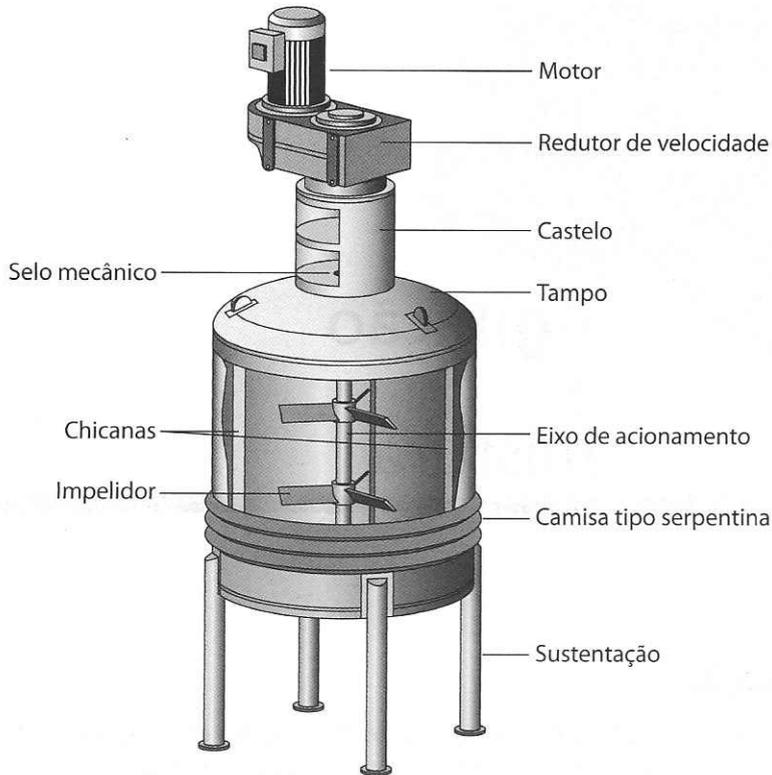


Figura 5.1 Representação de um tanque agitado (BARBOSA, 2004).

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 conseqüentemente 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 apres

H , altura do líq
 T , diâmetro do
 h , distância en
 D , diâmetro do
 W , altura da pá
 L , largura da p
 B , largura da c
 N , número de 1

Figura

O sistema de agi
 drado como sistema
 da matéria, bem com
 siderado.

5.3 Padrões de t

O padrão de flux
 agitado depende da p
 o compõem (Figura
 ponente radial, Figu
 impelidor coincide co
 líquido é inicialmente
 do tanque. A compo

Optimum for
 Agitator
 Cavoy, C. J.
 Incapable

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.

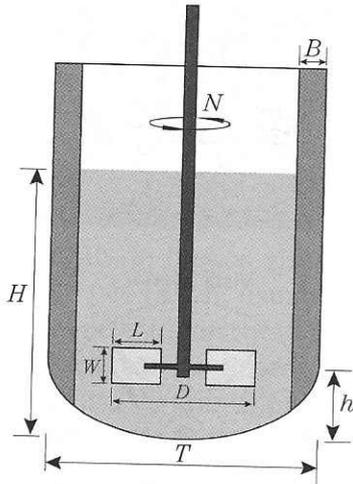


Figura 5.2 Característica de um tanque agitado com chicanas (baseada em CHEREMISINOFF, 2000).

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 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

Carony, C
 Impelidor
 Optimum for
 Actu.

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.

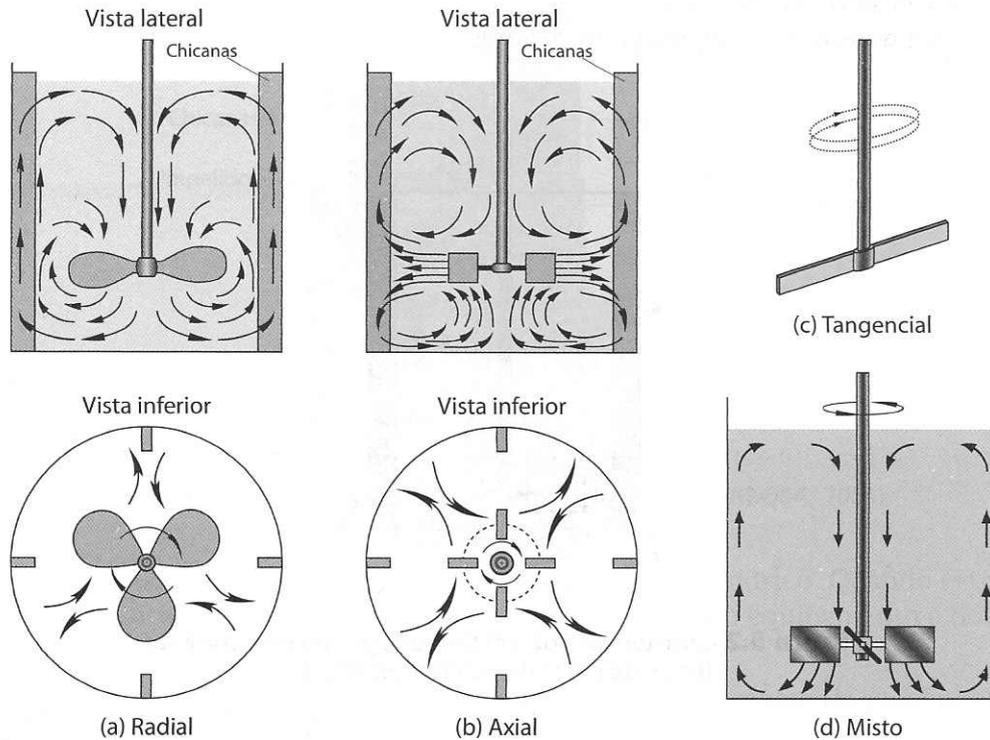


Figura 5.3 Padrões de escoamento (baseada em CHEREMISINOFF, 2000).

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.

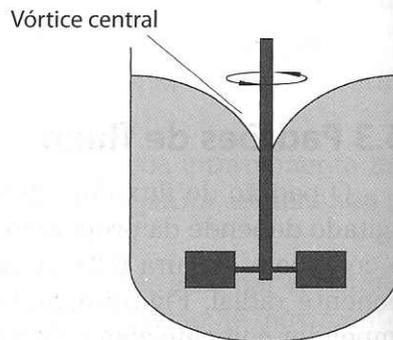


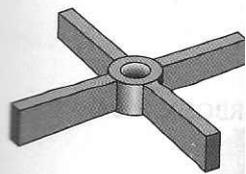
Figura 5.4 Fenômeno de vórtice (baseada em BARBOSA, 2004).

5.4 Tipos de impelidores

Conforme pode ser observado, existem um ou mais impelidores em tanques de mistura. A primeira classificação dos tipos de fluidos, ou seja, propagação de impelidores, depende do tipo de fluido, e por consequência, dos tipos de impelidores na dependência

a) Turbinas. Estas são utilizadas para a agitação com a velocidade de rotação baixa. A mistura se dá por movimento radial com fluxo radial predominante em correntes descendentes e ascendentes.

a.1) pás retas. São geralmente radiais e são adequados para a agitação de líquidos em um disco de agitação. As pás de uma turbina de Rusan são adequadas para a agitação de gases em líquidos.



a) Impelidor de quatro pás retas

Figura 5.5 Impelidores

a.2) pás inclinadas. São predominantemente radiais e são adequados. Nessa classificação, as pás em 45° com o eixo de rotação apresentam alta eficiência.

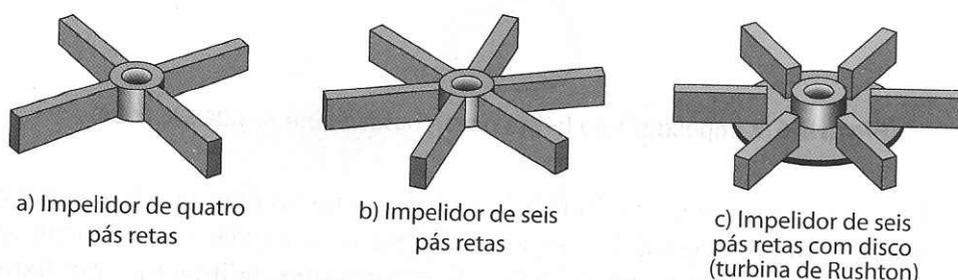
Optimum for Agitation

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.



a) Impelidor de quatro pás retas

b) Impelidor de seis pás retas

c) Impelidor de seis pás retas com disco (turbina de Rushton)

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).

Impelidores
Optimizados
Adv.

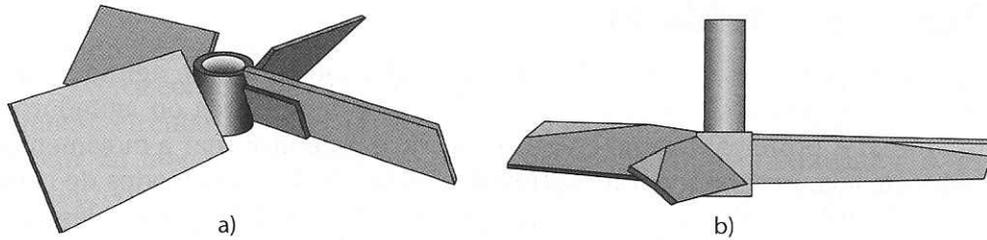


Figura 5.6 Impelidores tipo turbina de pás inclinadas:
a) impelidor de quatro pás inclinadas; b) *hydrofoil* (baseada em BARBOSA, 2004).

- 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.

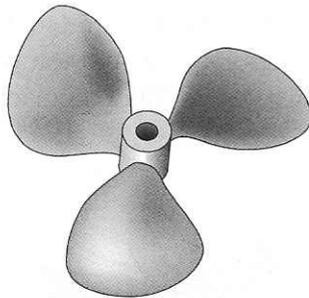


Figura 5.7 Impelidor tipo hélice naval (baseada em BARBOSA, 2004).

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
aqueles
tre o diâ
e 0,95 D

Figura 5.

c.2) *Impelidor*
o fluxo ta
impelidor
apresenta

A Tabela 5.1 apresent
rência da viscosidade

Optimizar for
Adm.

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).

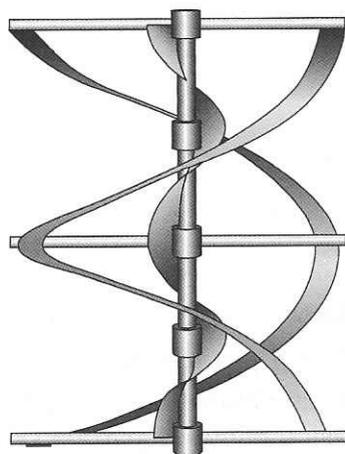


Figura 5.8a Impelidor tipo espiral dupla (baseada em BARBOSA, 2004).

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.

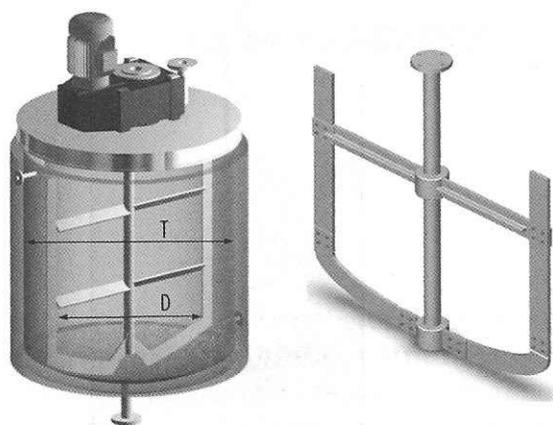


Figura 5.8b Impelidor tipo âncora.

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

Impelidor
Ótimo para
Acel.

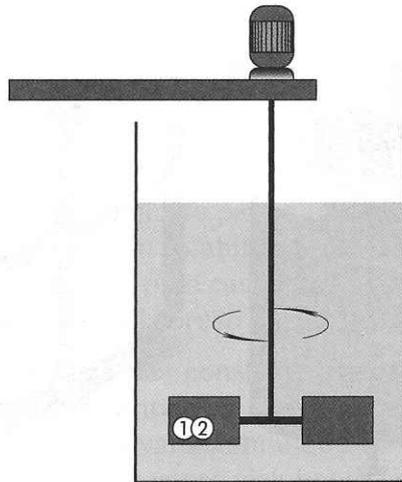
Tabela 5.1 Emprego de impelidores quanto à faixa de viscosidade do fluido a ser agitado

| 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 | $10^4 - 2,0 \times 10^6$ |

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, pa
do fluido em um
tem-se na Eq. (5

Ao escrever :
pela vazão mássi

Substituindo
Figura 5.2, é o diâ

Sabendo que a
tro do impelidor q

tem-se na Eq. (5.5

Identificando o

resulta da Eq. (5.7)

O número de po
da de carga localiza
agitação do fluido e
da Figura 5.10, de m
obter o valor de N_{Po}
finido por

Optimum
incapable
Actu

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

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

Optimum for
Actual

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.

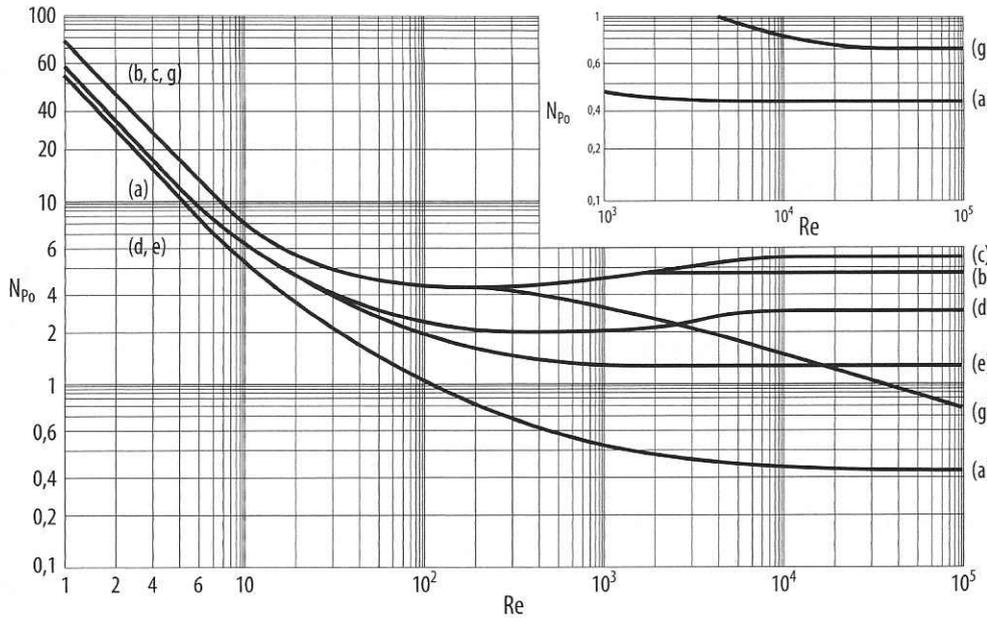


Figura 5.10 Número de potência para diversos impelidores do tipo turbina em função do número de Reynolds do impelidor para fluidos newtonianos: (a) hélice naval; (b) pás retas; (c) pás retas e disco (turbina de Rushton), $W/D=0,2$; (d) pás encurvadas, $W/D=1/8$; (e) pás inclinadas com passo de 45° e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

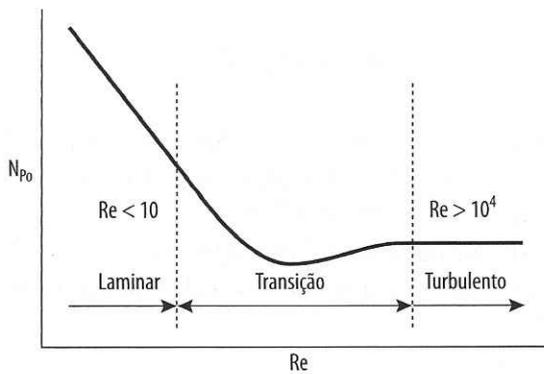


Figura 5.11 Regimes característicos de mistura (baseada em BARBOSA, 2004).

Exemplo 5.1

A crise energética r... da sociedade para f... -se como alternativ... óleo diesel fóssil. Po... combustíveis, bem c... petróleo (B20), ou... definido como send... renovável, obtido us... que ocorre a transfe... ácidos graxos, possu... -se que as variedades... variadas, podendo-s... canola, dendê, baba... diesel, considere a s... determinado biodies... senta as seguintes c... $N = 30$ rpm. Estime... mindo que o tanque... sem chicanas.

Solução

Verifica-se que foram... número de rotações... vem da utilização da...

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

Foram fornecidos $\rho =$... tituídos na Eq. (1) re...

$$\dot{W}_u = (0,88) \times (0$$

Há de se notar que a... Reynolds. Este valor, p... e pode ser obtido por... de o tanque conter ou... conhecer o valor do r... como

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

Como $N = 30$ rpm = 0... esses valores na Eq. (3)

$$Re = \frac{(0,5)(60)^2}{(0,035)} =$$

Optimizar... Adm...

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 ($\nu = 3,5 \text{ cSt}$, $\rho = 0,88 \text{ g/cm}^3$), um tanque de agitação que apresenta as seguintes características, $D = 60 \text{ cm}$; $T = 180 \text{ cm}$; $h = 60 \text{ cm}$; $H = 180 \text{ cm}$; $N = 30 \text{ rpm}$. 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 $\rho = 0,88 \text{ g/cm}^3$, $N = 30 \text{ rpm} = 0,5 \text{ rps}$; e $D = 60 \text{ cm}$, 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 $N = 30 \text{ rpm} = 0,5 \text{ rps}$; $D = 60 \text{ cm}$ e $\nu = 3,5 \text{ cSt} = 0,035 \text{ cm}^2/\text{s}$ substituem-se esses valores na Eq. (3)

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

Optimizar
Acel

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

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

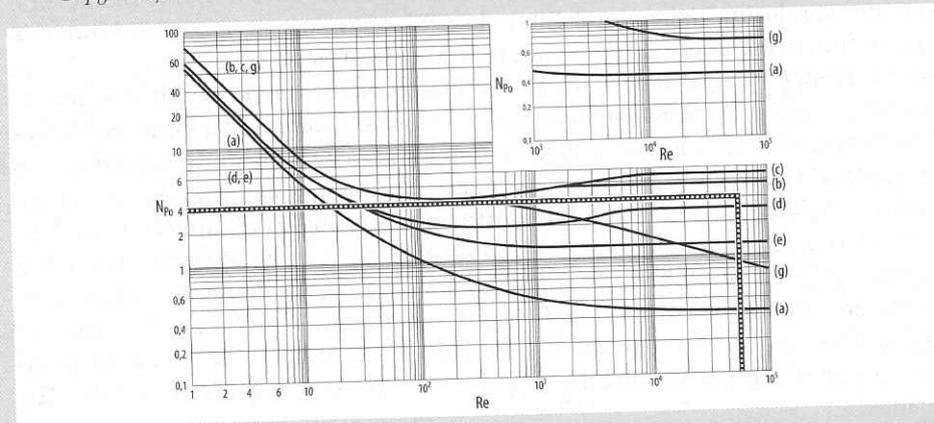


Figura 1 Solução do item (a) do Exemplo 5.1.

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

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

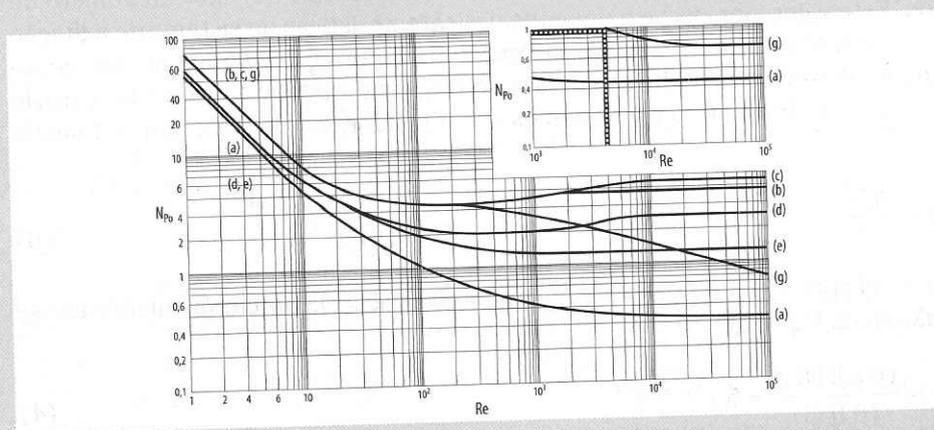


Figura 2 Solução do item (b) do Exemplo 5.1.

Levando o resulta

$$\dot{W}_u = (8,554$$

Observe que o us
cia utilizada para

5.6 Níveis de a

O nível de agit
de agitação, cuja es
la 5.1. Define-se, po

sendo V_ℓ o volume

Tabela

O volume de líq
vazão volumétrica d

em que o tempo de m
rar líquidos miscíveis
partir do conhecime

Optimum for
Agitation

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/m³) é de 0 a 4, conforme ilustra a Tabela 5.1. Define-se, portanto, o nível de agitação como

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

sendo V_ℓ o volume de líquido a ser agitado.

Tabela 5.1 Nível de agitação

| N_A (HP/m ³) | 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, τ , segundo

$$V_\ell \propto \tau Q_p \quad (5.12)$$

em que o tempo de mistura, τ , 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_τ , este definido como

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

Optimum for
Adu.
Encapsulated

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_τ 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

$$Q_p \propto uA_i \tag{5.14}$$

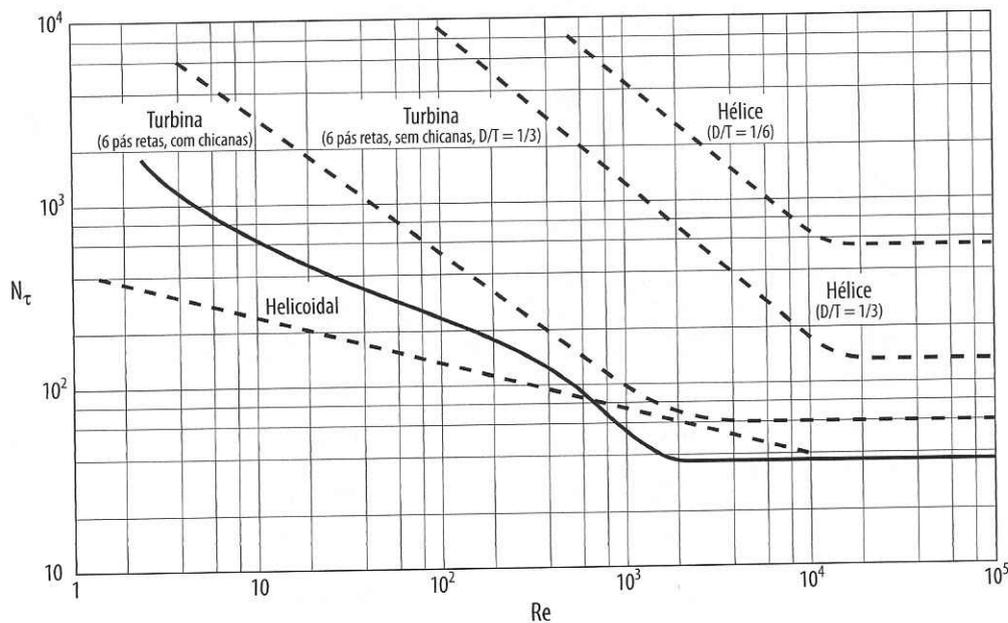


Figura 5.12 Número de mistura em função do número de Reynolds do impelidor para alguns impelidores (baseada em McCABE et al., 1993).

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

$$Q_p \propto ND^3 \tag{5.15}$$

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

$$Q_p = N_q ND^3 \tag{5.16}$$

O valor do número de mistura para um tanque agitado. A Figura 5.13 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_τ venha a ser constante, que o tempo de mistura é inversamente proporcional à velocidade de rotação do impelidor.

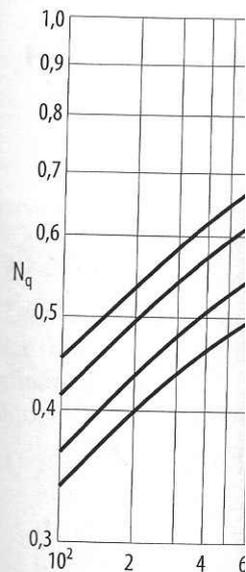


Figura 5.13 Número de bombeamento para algumas condições de agitação

5.7 Fatores de correção

a) Quando existe um fator de correção devido ao tamanho do tanque, sendo h a distância do eixo de rotação ao fundo do tanque, a expressão para o número de bombeamento é dada por:

em que n é o número de pás e n_0 é o número de pás de referência, cujo valor advém da literatura.

b) Quando o tanque não é cilíndrico, as medidas padrão para o número de bombeamento são:

Handwritten notes: "Otimizar for", "Integrar", "Adm."

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

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

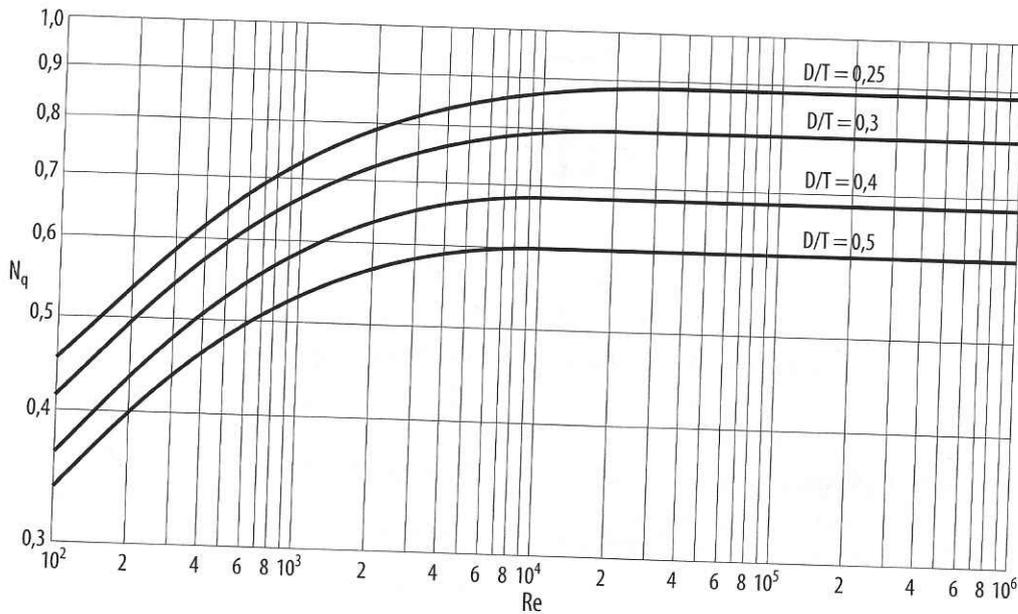


Figura 5.13 Número de bombeamento em função do número de Reynolds do impelidor, para algumas relações D/T para turbinas de pás inclinadas de 45° com chicanas (baseada em CHEREMISINOFF, 2000).

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, φ , da forma como se segue

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

Engenharia
Optimizar
Adeq

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

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

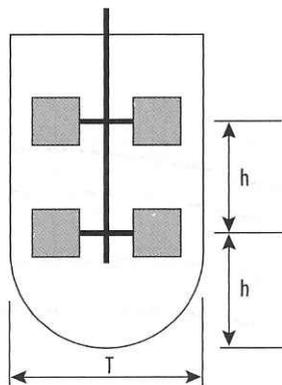


Figura 5.14 Tanque com mais de um impelidor.

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.

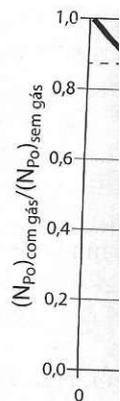


Figura 5.15 Potência das turbinas; QG é vazão de gás.

Exemplo 5.2

Deseja-se avaliar um sistema de agitação de um efluente que possui viscosidade dinâmica igual a 50 cP e densidade igual a 0,02 m³/s, e a vazão de gás é de 0,02 m³/s.

- projete o sistema de agitação com pás inclinadas de 45° para o eixo de modo que o seu número de Reynolds seja maior que 10.000.
- obtenha o valor da potência dissipada para o item anterior, assumindo que o sistema é gaseificado.

Solução

- a) Considerando a Figura 5.2:

$$V_t = \frac{\pi}{4} T^2 H$$

Tendo em vista que o sistema é gaseificado, resulta em:

$$V_t = 0,3 \pi T^3$$

Informou-se que o volume de gás a ser agitado é 20% maior do que o volume do líquido. Assim, a Eq. (2), fornece

$$V = 0,36 \pi T^3 = 1,0 \text{ m}^3$$

Integrando
Optimizar
Adm.

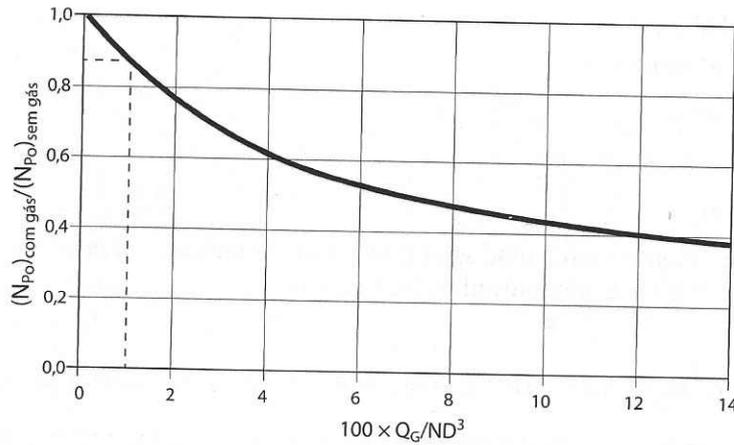


Figura 5.15 Potência dissipada em função da vazão de borbulhamento do gás para turbinas; Q_g é vazão volumétrica de injeção de gás (baseada em TREYBAL, 1980).

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 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° 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

$$V_\ell = \frac{\pi}{4} T^2 H \quad (1)$$

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

$$V_\ell = 0,3 \pi T^3 \quad (2)$$

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

$$V = 0,36 \pi T^3 = 1,0 \times 10^5 \quad (3)$$

Optimum for
Aerob.

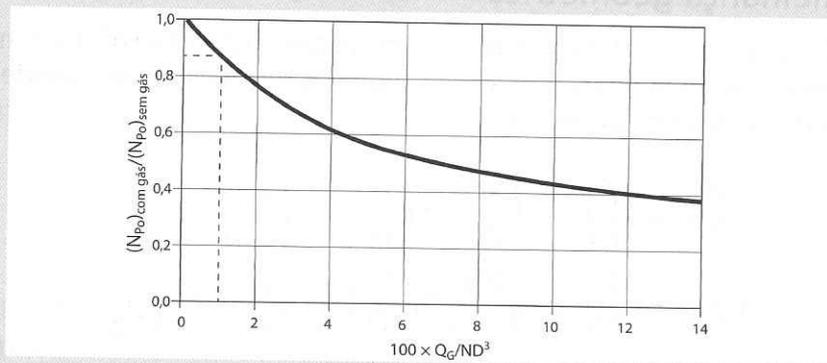


Figura 3 Obtenção do N_{Po} para o sistema gasificado do Exemplo 5.2.

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

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

O valor da potência útil é obtido após substituir os valores (11), (20), $D = 15$ cm e, $\rho = 1,1$ g/cm³ 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

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

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

$$N_A = \frac{\dot{W}_u}{V_\ell} \quad (20)$$

Sabendo que $V = 1,2 V_\ell$ e $V = 100$ 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

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

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.

Optimum for
Adv.

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

Identificando a

Na situação de
plificada para

5.8.3 Manutenção

Nesta categoria
de de agitação entre

Trazendo a Eq.

Tendo como base
o modelo quando pa

Substituindo as

No caso de o regi
bem como identificar
da, chega-se a

Optimum for
Encapsulada
Adv.

Como se trata do mesmo tipo de agitador

$$(k_T)_1 = (k_T)_2 \quad (5.28)$$

Identificando as definições (5.9) na igualdade (5.28)

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

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

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

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

$$(N_A)_1 = (N_A)_2 \quad (5.31)$$

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

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

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

$$V_\ell = \frac{\pi T^2}{4} H \quad (5.33)$$

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

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

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

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

Interpretado
Optimum for
Adeq.

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 a de Reynolds do nâmico do sistema trica do sistema este item será re ver. Dessa man valor do número Eq. (5.10), ou

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

em que $D = 60$ de N é reduzido $Re = 2,571 \times 10^6$ trata do regime terado e se trata

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

Sabendo que se como

$$\left(\dot{W}_u \right)_2 = \left(\dot{W}_u \right)_1$$

Do enunciado do

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

Optimum form
Agitação
Encapsulação