

# **O HOMOGENEIZADOR E O IMPELIDOR UNIVERSAL DO TIPO TURBINA: UM ESTUDO COMPARATIVO.**

**Augusto Ronchi Junior**

**Geraldo Luiz Palma**

**Paulo Cezar Razuk**

**Célio Losnak**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Eng. Luiz. E. C. Coube, s/n, 17033-360, Bauru, SP, Brasil. E-mail: [ronchi@bauru.unesp.br](mailto:ronchi@bauru.unesp.br)

## **Resumo**

A agitação e a mistura de líquidos constituem-se num importante tópico das operações unitárias, tendo grande aplicação nos mais variados ramos da indústria. A peça mais importante desse contexto é o impulsor e suas condições operacionais. Neste trabalho, foram executados ensaios com o homogeneizador de estator fixo e rotor de quatro pás radiais e com o impelidor convencional de quatro pás retas inclinadas a 45°, ou turbina. Para a verificação do desempenho do homogeneizador e da turbina, foi preparado um xarope de açúcar com água deionizada a 40° Brix. Foram executados ensaios com rotações de 9,6, 19,2, 25 e 50 rps, num béquer de volume 0,005 m<sup>3</sup> com o impelidor mergulhado até uma altura de 0,03 m acima do fundo do tanque. Para a mistura, em função dos parâmetros de potência consumida e concentração da solução com o tempo, comprovou-se o melhor desempenho do impelidor convencional. Comparou-se, ainda, os resultados de outros ensaios feitos com água de torneira, onde esta mostrou-se mais vantajosa.

**Palavras-chave:** Mistura - líquidos; Número de Potência; Concentração

## **1. INTRODUÇÃO**

Com aplicações numa vasta área da indústria, a mistura pode ser considerada hoje de importância fundamental na maioria dos processos. Ramos industriais tais como o alimentício, químico, petroquímico, farmacêutico e metalúrgico não dispensam processos de mistura em operações que necessitam de alterações químicas, físicas e/ou transferência de calor e massa em seus produtos.

As mudanças na intensidade da agitação necessária para cada produto, fazem com que os projetos de misturadores sejam os mais distintos possíveis.

Características de processos tais como alterações na composição química, podem levar a variações na viscosidade, criar ou eliminar partículas suspensas, alterar o volume da batelada, dificultando o projeto e a avaliação do rendimento do misturador, em termos do tempo e da potência necessária para se obter uma determinada mistura.

### **1.1 Principais tipos de impulsores**

O padrão de recirculação do fluido num misturador deve-se, principalmente, as características de descarga do impulsor. Assim, é preciso inicialmente classificar e conceituar os tipos principais de impulsores, os quais irão fornecer padrões distintos de fluxo. São eles:

a) a turbina de lâmina vertical ou turbina Rushton provoca dois ciclos de recirculação, oferecendo assim um esforço cortante, sendo recomendada para aplicações onde o cisalhamento é mais desejável do que o fluxo.

b) a turbina de lâmina inclinada (pitched-blade turbine) ou de fluxo preponderantemente axial, tem como característica um fluxo maior em proporção ao esforço cortante. O fluxo nestes impulsores é descendente com um componente para fora e rotacional. O padrão descendente muda de direção ao atingir o fundo do tanque, desviando-se para fora e subindo pelas paredes do vaso para em seguida voltar ao impulsor.

c) o impulsor de alta eficiência, provoca um fluxo mais axial do que radial, com maior recirculação e diminuição da turbulência na região próxima as extremidades da lâmina, quando comparado com a turbina de lâmina inclinada.

Dentre os impelidores de última geração, destaca-se o homogeneizador pelo seu novo conceito e, conseqüentemente, pela ausência de aprofundamento científico sobre sua capacidade no campo da mistura.

Este novo impulsor, mostrado a esquerda na figura 1, traz além das pás rotativas, um estator fixo com furos oblongos na direção axial, capaz de alterar as características de fluxo e, conseqüentemente, a eficiência do processo em termos da resposta de tempo e potência consumida na operação de mistura. A figura 1 mostra ainda, a direita, um impulsor tipo turbina com quatro lâminas inclinadas.

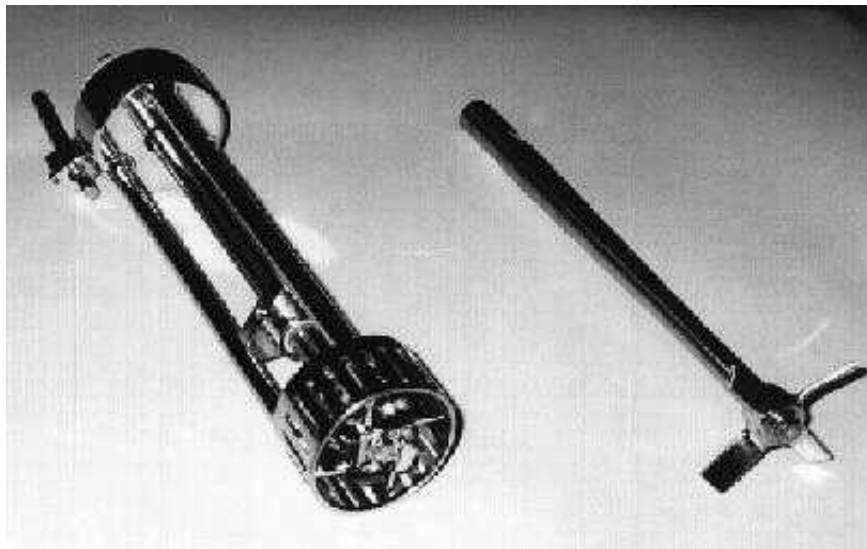


Figura 1. O homogeneizador, a esquerda, e a turbina, a direita.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho de pesquisa tem como objetivos principais:

- o estudo da eficiência na preparação do xarope de açúcar, considerando o tempo necessário para se obter a concentração de 40° Brix com o uso do homogeneizador, e
- da mesma forma usando um impelidor com quatro lâminas inclinadas a 45°.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A agitação pode ser classificada da seguinte forma:

**Mistura de líquidos miscíveis:** constitui-se numa operação que necessita muito mais de circulação do que cisalhamento. A potência necessária pode variar bastante, em função do tempo disponível para executar a mistura e das viscosidades e densidades dos componentes à serem misturados. A turbina mais adequada seria a do tipo lâmina inclinada.

**Mistura de líquidos não-miscíveis:** operação que necessita mais de cisalhamento em relação a circulação, sendo empregada usualmente para gerar uma emulsão, estável ou instável, entre dois líquidos. O fluxo aqui tem a sua importância pois é ele que leva o fluido até a região do impulsor, onde é feito o corte. O impulsor tipo lâmina vertical geralmente é o escolhido.

**Suspensões:** são divididas em suspensões simples e operações de cristalização. A operação de suspensão simples requer grande circulação de volume e potência suficiente para evitar a decantação da partícula sólida. Aqui, independente do tipo de mistura, a potência deve garantir que as partículas fiquem suspensas no grau desejado. Geralmente adota-se um impulsor tipo lâmina inclinada.

**Absorção de gás:** esta operação requer um alto esforço cortante controlado para proporcionar uma dispersão fina e máxima área de contato interfacial entre o gás e o líquido. A potência será a suficiente para, além de dispersar o gás, evitar que ele escape para a superfície do líquido. A turbina de fluxo radial é a mais indicada.

**Transferência de calor:** a circulação deve assegurar uma temperatura uniforme da massa líquida em agitação. Uma mistura insatisfatória dos componentes, da parede ao centro do vaso, fará com que a temperatura do líquido na parede aproxime-se da temperatura da mesma, reduzindo assim a transferência de calor entre eles.

Dickey & Hemrajani (1992) chamam a atenção para a importância de se compreender os objetivos do processo de mistura como um passo essencial para o correto dimensionamento e seleção do equipamento. A mistura, segundo os autores, é melhor avaliada em termos de três parâmetros principais: intensidade, dificuldade e capacidade, os quais relacionam-se, respectivamente, com a velocidade do fluido, a viscosidade e a quantidade de material que deve ser misturado.

O número de Reynolds é definido como

$$Re = \rho \cdot N \cdot D^2 / \mu \quad (1)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do líquido,  $N$  é a rotação do impelidor,  $D$  é o diâmetro do impulsor e  $\mu$  é a viscosidade absoluta do líquido.

Assim, a classificação do escoamento foi feita como sendo:

- laminar, para  $Re$  menor que 10,
- turbulento, para  $Re$  maior que 20.000, e
- região de transição, para  $Re$  entre 10 e 20.000.

O número de potência do impulsor é calculado pela equação

$$N_p = P / (\rho \cdot N^3 \cdot D^5) \quad (2)$$

e permanece constante para condições turbulentas. O símbolo  $P$  representa a potência.

A exigência de potência num misturador foi objeto da pesquisa de Kinget *al.* (1988), que consideraram várias características de processo, tais como o tempo necessário para a operação e os coeficientes de transferência de massa e de calor, dependentes da potência demandada.

Hicks *et al.* (1976) e Razuk & Souza (1996) apresentaram um trabalho visando a determinação da potência e da rotação do eixo do agitador com o diâmetro do impulsor da turbina para aplicações variando de vasos de estocagem, com pouca agitação, até reatores críticos que necessitam de altos níveis de agitação.

A capacidade da agitação foi indicada pelo volume equivalente  $V_{eq}$  definido como

$$V_{eq} = S_g \cdot V \quad (3)$$

onde  $S_g$  representa a densidade relativa e  $V$  o volume, enquanto a severidade, conforme denominado pelos autores, foi expressa pela viscosidade máxima  $\mu$  da fase líquida à ser agitada.

Da correlação da figura 2 pode-se calcular, através da equação (4), a capacidade de bombeamento efetivo  $Q$  para a turbina de lâmina inclinada, que dividida pela área de secção transversal do tanque com a geometria da figura 3, fornece a velocidade média  $v_b$  do fluido. Essa é a velocidade representativa de todas as velocidades no fluido agitado e que serve como base para a escala de agitação proposta pelos autores. O símbolo  $K_p$  representa o número de bombeamento.

$$K_p = Q / (N \cdot D^3) \quad (4)$$

Velocidades de fluido variando de 0,031 a 0,310 m/s caracterizam a maioria das aplicações de agitadores para mistura.

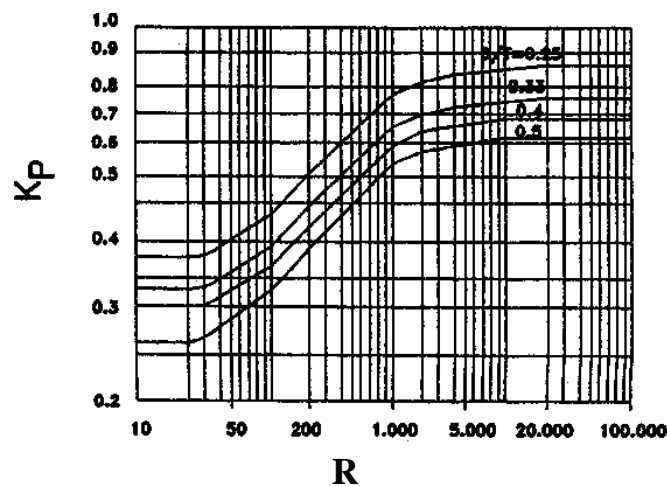


Figura 2. Número de bombeamento em função do número de Reynolds. De Hicks *et al.* (1976) e Dickey (1984).

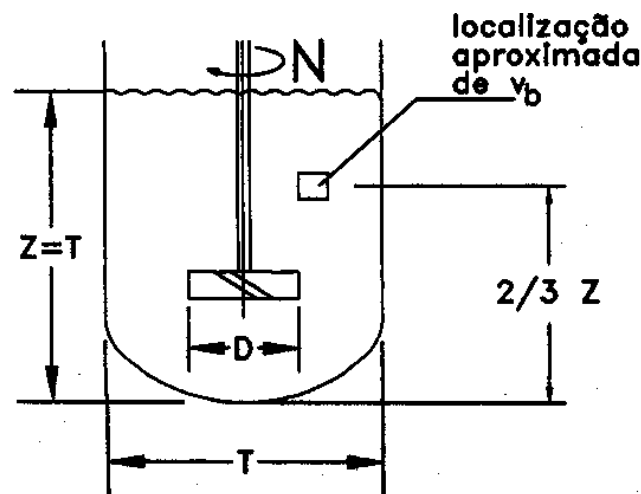


Figura 3. Tanque de batelada quadrada ( $Z = T$ ) mostrando a velocidade média ( $v_b$ ) do fluido. De Hicks *et al.* (1976).

Os símbolos Z e T representam, respectivamente, a altura do líquido e o diâmetro do tanque.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os experimentos foram executados três vezes e os valores aqui apresentados são a média aritmética. As rotações executadas foram, em rps: 9,6 - 19,2 - 25 - 50.

O desvio máximo para todos os ensaios foi de  $\pm 1\%$  do valor médio.

Utilizou-se a mistura de água e açúcar cristal, que é o chamado xarope simples, base da produção de bebidas carbonatadas na indústria de refrigerantes. Optou-se pela água deionizada, pois, sendo isenta de compostos orgânicos, já que foi previamente destilada, e inorgânicos, tem uma composição padrão e independente do tempo.

De uso corrente na produção do xarope de açúcar, o grau Brix, é definido como sendo a porcentagem, em peso, dos sólidos solúveis em uma solução.

Assim, tomando como exemplo um xarope a 40° Brix, cuja massa específica deve ser igual a 1.176 kg/m<sup>3</sup>, tem-se, para 1 litro de xarope à ser produzido, 0,47 kg de açúcar e 0,71 kg de água, não importando a massa específica da água, desde que se trabalhe com quantidades em massa e não em volume.

Além do homogeneizador montado com o estator, foi ensaiado também um impelidor com quatro pás retas inclinadas a 45°, executado em aço inoxidável, e com diâmetro de 7,5.10<sup>-2</sup> m. Ambos os impelidores podem ser vistos na figura 1.

Foi medida a viscosidade do xarope a 40° Brix resultando o valor de 0,0062 kg/m.s, à temperatura de 28 °C.

Pode-se calcular o número de bombeamento  $K_p$ , segundo Dickey (1984), através da expressão:

$$K_p = 0,683 \cdot [0,394 / (D/T)]^{1/2} \quad (5)$$

constante para o regime turbulento e uma dada relação D/T.

Contudo, deve-se neste ponto executar um cálculo iterativo da seguinte forma:

- calcula-se o  $R_e$ , equação (1), que deve ser ajustado pela relação D/T, dando origem ao número de Reynolds modificado,  $R_e^*$ , de acordo com a equação (6);

$$R_e^* = R_e \cdot (D/T) / 0,394 \quad (6)$$

- segundo Dickey (1984), em função do valor do  $R_e^*$ , deve-se também corrigir o número de bombeamento, dando origem ao  $K_p^*$ , conforme abaixo:

- para  $R_e^*$  maior que 20.000:

$$K_p^* = 0,683 \quad (7)$$

- para  $R_e^*$  entre 20.000 e 300:

$$K_p^* = \exp(-5,71 + 1,683 \cdot \ln R_e^* - 0,179 \cdot (\ln R_e^*)^2 + 0,0064 \cdot (\ln R_e^*)^3) \quad (8)$$

- para  $R_e^*$  entre 300 e 25:

$$K_p^* = \exp(-0,947 - 0,231 \cdot \ln R_e^* + 0,0467 \cdot (\ln R_e^*)^2) \quad (9)$$

- para  $R_e^*$  menor que 25:

$$K_p^* = 0,3 \quad (10)$$

Conhecendo-se o valor do número de bombeamento modificado  $K_p^*$ , a expressão

$$K_P = K_P^* \cdot [0,394 / (D/T)]^{1/2} \quad (11)$$

permite recalcular o  $K_P$  que deve ser comparado com o valor obtido pela equação (5).

Com  $K_P$ ,  $N$ ,  $D$  e a equação (4), pode-se calcular a capacidade de bombeamento  $Q$  do impulsor em questão.

Pela equação (12), basta dividir  $Q$  pela área transversal ( $A$ ) do tanque para obter-se a velocidade média  $v_b$  do fluido

$$v_b = Q/A \quad (12)$$

Conhecida  $v_b$  e aplicando-se a equação (13)

$$I_A = v_b / 0,031 \quad (13)$$

determina-se o índice de agitação  $I_A$ , que, para a produção de xarope de açúcar usualmente é igual a 3, conforme Bowen (1985).

Assim, executados os cálculos para o  $I_A$ , obtiveram-se os resultados abaixo:

- para a turbina, 8,3 e 16,7, respectivamente para as rotações de 25 e 50 rps,
- para o homogeneizador, 3,1 e 6,4, respectivamente para as rotações de 25 e 50 rps.

Devido ao seu maior diâmetro, a turbina com pás a 45° leva a níveis de agitação maiores que o homogeneizador, para uma mesma rotação e um mesmo grau Brix.

Decidiu-se então, pela comparação do desempenho entre os dois impelidores também pelo índice de agitação, além da rotação e da concentração.

Assim, tomando-se como referência os  $I_A$  para o homogeneizador, foram recalculadas, pelo mesmo roteiro, as rotações necessárias para que a turbina a 45° produzisse o mesmo efeito de mistura, isto é, o mesmo índice de agitação. Tais rotações para a turbina a 45° resultaram iguais a 9,6 e 19,2 rps, respectivamente para os  $I_A$  de 3,1 e 6,4.

Desta forma, as duas rotações suplementares acima tornam a comparação mais justa entre os dois impelidores, do ponto de vista de resposta dinâmica.

Foram colhidos dados de corrente elétrica consumida, para efeito de cálculo de potência, sob duas condições distintas: no instante de partida do motor, caracterizando a potência de pico, em início de operação de mistura, e após o xarope ter atingido sua concentração, ou grau Brix final, caracterizando a menor potência demandada.

### 3.1 O método de ensaio

Na execução dos ensaios, montou-se o impulsor centralizado e a uma altura de 0,03 m acima do fundo do béquer e regulou-se a rotação desejada. Foram pesadas as massas de açúcar e de água. Iniciou-se a operação de mistura por um tempo de 15 s, sendo colhida a amostra após um período de 5 minutos de espera, para desaeração do xarope.

Mediu-se a massa específica da amostra, numa balança de Mohr-Westphal, sendo em seguida, retornada a amostra para o béquer, de onde foram retiradas novas amostras nos tempos de 30, 45, 60 e 120 segundos, conforme descrito em Ronchi (1997).

Assim, percebeu-se que, sob determinadas condições de rotação e tipo de impelidor, a massa específica desejada era rapidamente obtida, quando comparada com outras condições.

## 4. RESULTADOS

Na figura 4 pode-se ver um gráfico típico dos resultados de ensaios.

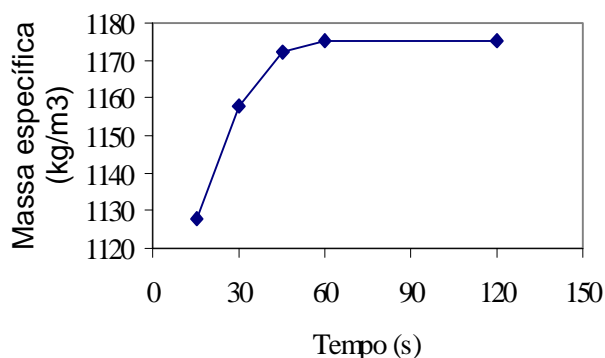


Figura 4. Resultados para a turbina a 25 rps.

#### 4.1 Potência

Foram obtidos os valores mostrados na tabela 1, onde constam também os resultados dos cálculos da potência aparente.

Tabela 1 - Resultados para potência aparente.

Impelidor	Rotação (rps)	$I_A$	P (W)		$P_s$ (W)	$P_u$ (W)	T (s)
			Partida	Regime			
turbina	9,6	3,1	528,0	50,6	41,8	8,8	300
	19,2	6,4		77,0	55,0	22,0	120
	25	8,3	741,4	81,4			
homogeneizador	9,6		525,8	81,4			
	25	3,1	770,0	176,0	110,0	66,0	185
	50	6,4		367,4	121,0	246,4	180

Para se calcular a potência útil ( $P_u$ ) ou a efetivamente requerida pelo xarope, bastou subtrair a potência consumida pelo impulsor girando a seco ( $P_s$ ) da potência em regime.

## 5. DISCUSSÃO

Através da análise das curvas da massa específica em função do tempo, tal como a da figura 4, verificou-se que o impelidor de pás a  $45^\circ$  apresentou melhor rendimento que o conjunto rotor/estator do homogeneizador. O motivo está no baixo poder de sucção do homogeneizador. Sua geometria e ângulo, não conseguem o mesmo desempenho que a turbina que, nitidamente, promove um vigoroso fluxo circulatório, notadamente longitudinal, capaz de realmente misturar o açúcar com a água.

Na comparação entre os dois impelidores pelo índice de agitação, houve vantagem para a turbina para o  $I_A$  de 6,4, quanto ao tempo de mistura. Quanto a potência demandada, a turbina foi melhor em ambos os  $I_A$ .

Já para o  $I_A$  de 3,1, houve melhor desempenho do homogeneizador no que diz respeito ao tempo exigido para a mistura. Tal vantagem, porém, foi anulada pelo consumo extremamente alto de potência requerida para a operação.

Comparando-se os resultados dos ensaios feitos com água comum, em Ronchi *et al.* (1999), percebe-se que não é compensador o uso de água deionizada.

## 6. CONCLUSÕES

Com poucas exceções, na comparação entre os dois impelidores quando à mesma rotação, a turbina apresentou um desempenho melhor. Mesmo quando comparados para o mesmo índice de agitação, implicando numa rotação maior para o homogeneizador, houve melhor rendimento da turbina, que necessitou de menos tempo para a obtenção do grau Brix final, nas condições do índice de agitação igual a 3,1 e 6,4.

## 7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao auxílio da Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – FUNDUNESP, para a realização desta pesquisa.

## 8. REFERÊNCIAS

- Bowen, R.L., 1985, Agitation intensity: key to scaling up flow-sensitive liquid systems, Chemical Engineering, Mar., pp.159-168.
- Dickey, D.S., 1984, Program chooses agitator, Chemical Engineering, Jan., pp.73-81.
- Dickey, D.S.; Hemrajani, R.R., 1992, Recipes for fluid mixing, Chemical Engineering, Mar., pp.82-89.
- Hicks, R.W.; Morton, J.R.; Fenic, J.G., 1976, How to design agitators for desired process response, Chemical Engineering, Apr., pp. 102-110.
- King, R.L.; Hiller, R.A.; Tatterson, G.B., 1988, Power consumption in a mixer, AIChE Journal, v. 34, n.3, pp.506-509.
- Razuk, P.C.; Souza, E., 1996, Operações unitárias no tratamento do xarope de açúcar, EDIPRO, Bauru, SP.
- Ronchi Junior, A., 1997, O número de potência na agitação de líquidos e a concentração na mistura do xarope de açúcar, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- Ronchi et al., 1999, Uma medida de eficiência entre o homogeneizador e o impelidor universal de pás retas, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, ISBN 85-85769-03-3, Nov., cód. AAACAI.