

RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DE MODELOS TEÓRICOS E EMPÍRICOS PARA A TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA NA AGITAÇÃO DE LÍQUIDOS - SISTEMAS HOMOGÊNEOS

Eduardo Ramos Ferreira da Silva *; Luiz Roberto Terron **

* Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP, Setor S 100, Travessa R, n. 400, Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira", São Paulo, SP, CEP 05508-900, Tel.: (011) 817-7632 - Fax (011) 814-4695.
E-mail: erfsilva@net.ipen.br

** Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) - Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira", Av. Prof. Mello de Moraes, 2373, São Paulo, SP, CEP 05508-900, Tel.:(011) 818-5640 -Fax: (011) 211-3020

RESUMO

O presente trabalho visa fazer uma apresentação de um algoritmo utilizando alguns modelos para o cálculo da potência consumida na agitação de líquidos newtonianos homogêneos. Apesar da diversidade, os resultados gerados pelos modelos estudados são praticamente coincidentes nas regiões de fluxo laminar e nas de regime altamente turbulento, de maneira que, nestas faixas, os modelos mais simples podem ser utilizados com precisão adequada.

I INTRODUÇÃO

Mistura, agitação e obtenção de pastas são procedimentos empregados, desde tempos imemoriais na preparação de alimentos e bebidas. Na atualidade, são comumente encontrados nos diversos processos da Indústria Química e constituem Operações Unitárias básicas, usadas em vários ramos da Engenharia Química, tais como a produção de: materiais de construção, vidro, produtos químicos, alimentos industrializados e, além desses exemplos específicos podem ser citadas algumas aplicações gerais: a realização de reações químicas e a preparação de soluções e misturas.

O termo mistura é geral. A agitação é um caso particular de mistura e é usado para caracterizar uma movimentação circular de um material líquido que está contido em um recipiente, geralmente cilíndrico, e a movimentação do líquido é ocasionada por um elemento externo denominado de rotor. Um sistema padrão para realizar a agitação de líquidos, comumente chamados de agitadores, consta das seguintes partes: motor, eixo, vaso, rotor e acessórios (selos, gaxetas e partes internas, tais como chicanas, serpentinhas, etc.).

Em virtude dos agitadores serem equipamentos de forma construtiva aparentemente simples e de apresentarem custos relativamente baixos em relação a

outros itens dentro de um processo, muitas vezes são relegados a segundo plano. Porém, as finalidades da agitação variam num amplo espectro dentro do domínio da indústria de processos químicos. Alguns dos propósitos da agitação juntamente com suas finalidades são ilustrados na tabela 1.

A escolha do sistema de agitação varia de acordo com a finalidade da agitação. Logo, cada sistema apresenta especificidades como tipo do tanque, número e tipo de rotor e relações geométricas entre as dimensões do sistema, etc..

Independentemente da finalidade da agitação, após a escolha e dimensionamento do sistema de agitação, o passo seguinte do projeto é estimar a potência requerida para que o sistema de agitação cumpra as suas finalidades. Essa potência poderia ser calculada a partir da resolução das equações de Navier-Stokes. Devido às dificuldades de se obter modelos resultantes dessas equações básicas, os autores procuraram correlações a partir da análise dimensional que, geralmente, apresentam a potência transmitida ao fluido na agitação, em termos de um número adimensional conhecido como número de Potência, P_o , em função do número de Reynolds, Re , para casos específicos. Assim, podem ser encontradas diversas curvas para diversos tipos de agitadores, como por exemplo em [1], [2], [3] e [4].

Tabela 1 - Propósitos e Finalidades da Agitação

PROPÓSITO DA AGITAÇÃO	FINALIDADE DA AGITAÇÃO
Mistura de Líquidos Miscíveis	solução de líquidos miscíveis entre si
Mistura de Líquidos Imiscíveis	lavagem de líquidos, extração, emulsificação, reação química
Agitação de Sistemas Gás-Líquido	absorção ou dispersão de gases em líquidos, reação química (aeração, lavagem de gases, hidrogenação, cloração, etc..)
Agitação de Sistemas Sólido-Líquido	suspensão ou dissolução de sólidos em líquidos, controle de crescimento de cristais, redução de tamanho de partículas, floculação de precipitados, lixiviação, reação química
Agitação de Sistemas Trifásicos Gás-Sólido-Líquido	reação química, fermentação
Transporte de Calor	aquecimento ou resfriamento de líquidos, suspensões, emulsões, dispersões, etc..

As curvas de Po em função de Re apresentam três regiões nítidas, que caracterizam os tipos de regimes de escoamento: laminar, de transição e turbulento. Observa-se que a presença de chicanas faz com que, no regime de escoamento turbulento, haja uma diminuição do número de potência.

Por outro lado, para o cálculo da potência transmitida na agitação, alguns autores procuraram resolver as equações da continuidade (como por exemplo [5]), ou procurar correlações empíricas que corrigem as simplificações teóricas (veja [6] e [7]). Devido as dificuldades encontradas, tais modelos são específicos para alguns tipos de agitadores, com características geométricas também específicas.

Este trabalho apresenta um algoritmo, baseado em modelos da literatura, para o cálculo da potência transmitida na agitação, para fluidos newtonianos homogêneos e, com esse algoritmo, foi desenvolvido um programa de cálculo. Isto faz com que as equações para cálculo de potência possam vir a ser implementadas em programas utilizados em projeto de processos ou em simuladores de processos, uma vez que, da maneira com que a literatura apresenta esses dados (gráficos e tabelas), fica bastante difícil a sua utilização diretamente nestes programas.

Os resultados gerados por esse programa, em termos do número de potência, foram comparados com aqueles resultantes de gráficos originados pela análise dimensional citados na literatura. Desse modo pode-se avaliar tanto a validação do algoritmo empregado quanto as técnicas usadas no desenvolvimento do programa.

II. MODELOS PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA TRANSMITIDA NA AGITAÇÃO

Os modelos para o cálculo da potência transmitida na agitação para fluidos newtonianos podem ser divididos em três grupos, conforme apresentados por [8]:

- **modelos teóricos:** aqueles baseados nas equações de conservação de Navier-Stokes. Os principais representantes dessa classe são os modelos devidos a [5] e [6]. Devido às dificuldades em aplicações práticas, esses modelos não serão tratados neste trabalho.

- **modelos semi-empíricos:** partem dos modelos teóricos e os simplificam através de correlações experimentais. Será considerado o modelo semi-empírico proposto por [5].

- **modelos empíricos:** aqueles baseados exclusivamente em dados experimentais. Usar-se-ão os modelos empíricos originados por [6] e [9].

Com as equações provenientes destes modelos elaborou-se um algoritmo ([8]) para o cálculo do Número de Potência, Po , que, conforme visto anteriormente, é um dos parâmetros mais importantes para o projeto de agitadores. Aquele algoritmo foi acrescido pelos modelos de [4], [10], [11], [12] e [13].

Com esse algoritmo foi desenvolvido um programa, chamado de AGITADOR, para microcomputadores da família IBM PC ou compatíveis, na linguagem Pascal, usando-se o compilador Turbo-Pascal v. 5.0.

III. RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Para testar o desempenho do programa, foi elaborado o estudo de um agitador com as características mostradas na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do Agitador a Serem Utilizados nos Cálculos de P_o a Partir dos Modelos Considerados.

Tipo de rotor	pás
Número de pás (c)	2
Diâmetro do rotor (d_r)	0,5 m
Diâmetro do tanque (D)	1 m
Diâmetro do eixo do agitador (d_w)	0,1 m
Altura da pá do rotor (h_r)	0,1 m
Altura do líquido no tanque (H)	1 m
Largura das lâminas do rotor (l)	0,25 m
Espessura das lâminas do rotor (b)	0,018 m
Intervalo de Re	1 até 10^5

O arquivo de valores gerado pelo programa foi comparado com dados experimentais da literatura para sistemas com chicanas [2] e sem chicanas (Bates et alii e Rushton et alii, citados em [4] e cujas relações geométricas do sistema de agitação estão mostradas na tabela 3.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se dizer que os modelos utilizados para o cálculo de P_o são coerentes com o comportamento esperado de curvas $P_o = f(Re)$, tanto para o caso com chicanas quanto os sem chicanas, originando valores maiores do que os experimentais, para um mesmo Re.

Tabela 3 - Característicos Geométricos dos Sistemas de Agitação Citados na Literatura e do Caso Estudado Neste Trabalho ([2] e [4]).

Relações Geométricas	Fonte		
	[2]	[4]	Este trabalho
c	4	6	2
d_r / h_r	5	1	5
H/D	1	1	1
C / d_r	1	-	-
D / d_r	-	3	2
l / d_r	-	0,25	0,5
b / h_r	-	0,25	0,18

Conforme apresentado anteriormente por [8] e [14]:

-além de todas as dificuldades para a obtenção das características geométricas envolvidas no estudo dos agitadores, o cálculo da potência consumida é de vital importância para as aplicações industriais.

-diversos autores têm proposto modelos que são válidos para alguns tipos de agitadores com características geométricas específicas.

-os resultados gerados pelos modelos anteriormente estudados, quando comparados entre si, são praticamente coincidentes nas regiões

de fluxo laminar e nas de regime altamente turbulento, de maneira que, nestas faixas, os modelos mais simples podem ser utilizados com precisão adequada.

Partiu-se então para uma nova revisão bibliográfica, visando a se obter um conjunto de dados, quer em forma de tabelas, quer na forma de gráficos, a fim de se comparar os resultados calculados com o algoritmo desenvolvido, o qual permite a escolha entre diversos modelos (teóricos, empíricos e semi-empíricos).

Foi verificado, novamente, que os modelos mais simples oferecem uma aderência muitas vezes melhor que os modelos mais complexos, os quais apresentam discrepâncias de até 800%. Tal situação pode ser explicada pelo fato de que, nestes modelos mais complexos, há maiores restrições com relação às características geométricas dos agitadores.

Verificou-se também que as características geométricas dos agitadores encontrados na literatura não seguem, geralmente, nenhuma padronização, o que vem a ser uma dificuldade na avaliação dos dados publicados, criando-se um obstáculo a mais na comparação dos resultados calculados com o algoritmo desenvolvido.

IV. NOMENCLATURA

- c número de lâminas do agitador tipo pás
- D diâmetro do tanque, m
- H altura do líquido no tanque, m
- hr altura do agitador, m
- hs espessura do disco do agitador tipo turbina, m
- l largura das lâminas do agitador, m
- n rotações por segundo, 1/s
- Po = Número de Potência, definido por

$$Po = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

- Re número de Reynolds, definido por

$$Re = \frac{D^2 n \rho}{\mu}$$

- ρ densidade, Kg/m
- μ viscosidade, Pa s

V. BIBLIOGRAFIA

- [1] GUPTA, S.K. **Momentum transfer operations**, Tata McGraw-Hill, Delhi, 1st ed., 1979.
- [2] TREYBAL, R.E. **Mass-Transfer Operations**, McGraw-Hill, USA, 5th pr., 1980.
- [3] COULSON, J.M.; RICHARDSON, J.F. **Tecnologia Química**, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2 ed., 1962.
- [4] McCabe, W.I.; Smith, J.C.; Harriott, P. **Unit operations of chemical engineering**, McGraw-Hill, USA, 4th ed., 1985.
- [5] BRAUER, H. **Biotechnology**, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Federal Republic of Germany, 1985.
- [6] NAGATA, S. **Mixing**, A Halsted Press Book, Toquio, 1st ed., 1975.
- [7] ULBRECHT, J.J.; PATTERSON, G.K. **Mixing of liquids by mechanical agitation**, Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1st ed., 1985.
- [8] SILVA, E.R.F.; TERRON, L.R. **Modelos teóricos e empíricos para a transmissão de potência na agitação de líquidos - sistemas homogêneos**, 10 Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, 1.994.
- [9] PAVLOV, K.F.; ROMANKOV, P.G.; NOSKOV, A.A. **Examples and problems to the course of unit operations of chemical engineering**, MIR, Moscow, 1st ed., 1979.
- [10] RUSHTON, J.H. **Mixing technology**, Ind. Eng. Chem., n. 8, p. 55-58, Aug., 1952.
- [11] TERRON, L.R. **Conceitos fundamentais da agitação em líquidos**, apostila do Curso PQI 816, EPUSP, 1992.
- [12] UHL, V.W.; GRAY, J.B. **Mixing Theory and Practice**, AP, USA, 2nd. pr., 1966.
- [13] WOOD, J.C.; WHITTEMORE, E.R.; BADGER, W.L. **The measurement of performance**, Chem. Met. Eng., v. 27, p. 1176, 1922.
- [14] SILVA, E.R.F.; TERRON, L.R. **Análise dos Modelos teóricos e empíricos para a transmissão de potência na agitação de líquidos - sistemas homogêneos**, X ENFIR / V ENAN, Águas de Lindóia, São Paulo, 1.995.

VI ABSTRACT

This paper aims to make a presentation of an algorithm by using some models for the input power calculation in the agitation of homogenous Newtonian liquids. Despite diversity, results generated by the models studied are practically coincident in the laminar flow and in the high turbulent regimen regions. Thus, in those intervals the simplest models can be used with adequate precision.