

Eduardo Ramos Ferreira da Silva (1); Luiz Roberto Terron (2)

(1) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN/COPESP 2, Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira", São Paulo, SP, CEP 05508-900, Tel.: (011) 817-7632 - Fax (011) 814-4695.

(2) 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

## 1. RESUMO

Segundo Coulson e Richardson (1968), "o problema de misturar duas ou mais substâncias revelou-se uma das mais intratáveis entre todas as operações unitárias da tecnologia química e a grande maioria do equipamento industrial ainda é projetado com base na experiência e não em qualquer teoria aceita".

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

Os pesquisadores vêm se preocupando como assunto desde a década de 1920, quando foram obtidos os primeiros dados experimentais. Posteriormente, com a dificuldade de se apresentar um modelo que atendesse as equações básicas de Navier-Stokes, os autores procuraram correlações a partir da análise dimensional, que geralmente apresentam a potência consumida em função do número de Reynolds. Outros procuraram ou resolver as equações da continuidade ou correlações empíricas que corrigem as simplificações teóricas.

Serão apresentados aqui alguns modelos utilizados para o cálculo da potência consumida na agitação de líquidos newtonianos homogêneos e aplicados ao mesmo tipo de agitador, a fim de se poder compará-los entre si.

Palavras-chave: agitadores, transmissão de potência, modelos.

## 2. MODELOS PARA A TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA NA AGITAÇÃO DE LÍQUIDOS: SISTEMAS HOMOGÊNEOS -

Para melhor organização do texto, os modelos foram divididos em três grupos, a saber:

- 1.- modelos teóricos: aqueles baseados nas equações de conservação de Navier-Stokes
- 2.- modelos semi-empíricos: partem dos modelos teóricos e os simplificam através de correlações experimentais
- 3.- modelos empíricos: aqueles baseados exclusivamente em dados experimentais

os quais serão expostos a seguir.

### 2.1- Modelos Teóricos

Foram encontrados, na literatura, basicamente, dois exemplos de modelagem teórica: o primeiro apresentado por Brauer (1985) e o segundo por Nagata (1975).

O modelo de Brauer (1985) baseia-se no fato de que, em um fluxo agitado em regime laminar, o fluido contido em um volume cilíndrico gerado pelo agitador comporta-se como um corpo sólido e quando transfere energia ao

líquido, o agitador promove dois tipos de fluxos, um devido à rotação e um outro devido às forças tangenciais.

Thiele (1972) já havia equacionado a transferência de energia através dessas superfícies considerando o caso de um fluxo laminar em um fluido newtoniano.

O modelo de Nagata (1975) correlaciona a potência com as características geométricas do vortáx formado quando da agitação do líquido e com as características do fluido.

## 2.2- Modelos semi-empíricos

Brauer (1985) apresenta um interessante equacionamento para o cálculo do número de potência,  $N_p$ , obtido a partir do desenvolvimento teórico aplicado no regime laminar e implementado por correlações experimentais encontradas na literatura até 1974.

Tais correlações procuram corrigir o modelo teórico nos regimes de transição e turbulento a partir das características geométricas do tanque agitado e do agitador, sendo desenvolvidas para agitadores do tipo pás e do tipo turbina, considerando também, em ambos os casos, a existência ou não de chicanas.

Conforme apresentado por Brauer (1985), três características geométricas são fundamentais no estudo da transferência de energia ao líquido: diâmetro, altura e número de lâminas do agitador.

## 2.3- Modelos empíricos

Apenas a nível de comparação, foram escolhidos dois tipos de modelos empíricos: o apresentado por Pavlov (1979) e o apresentado por Nagata (1975).

## 3. CÁLCULO COMPUTACIONAL

Foi feito um programa computacional em linguagem Turbo-Pascal, versão 5.0, que contempla o modelo de Brauer (1985), denominado modelo 1, o modelo de Pavlov (1975), denominado modelo 2, e o modelo empírico de Nagata (1975), denominado modelo 3. Não foram feitas considerações sobre os modelos teóricos devido a falta de informações. O programa gera um arquivo de saída que pode ser lido por um programa gráfico que plotará número de potência como uma função do número de Reynolds ( $N_p = f(Re)$ ).

O programa contém os parâmetros de cálculo para as seguintes situações:

- 1 - tipo pás com 2 lâminas (modelo 2)
- 2 - idem ao 1, com lâminas inclinadas à 45° (modelo 2)
- 3 - tipo pás, com 4 lâminas (modelo 2)
- 4 - idem, com lâminas inclinadas à 45° (modelo 2)
- 5 - idem, com lâminas inclinadas à 60° (modelo 2)
- 6 - tipo âncora, com 2 lâminas (modelo 2)
- 7 - tipo hélice, com pás inclinadas de 22,5° (modelo 2)
- 8 - tipo hélice, com 2 pás (modelo 2)
- 9 - tipo turbina, com 3 pás (modelo 2)
- 10 - tipo turbina, com 6 pás e disco difusor (modelo 2)
- 11 - modelo 1 aplicado a agitador tipo pás sem chicanas
- 12 - modelo 1 aplicado a agitador tipo turbina sem chicanas
- 13 - modelo 1 aplicado a agitador tipo pás com chicanas
- 14 - modelo 1 aplicado a agitador tipo turbina com chicanas
- 15 - modelo 3

Conforme o item escolhido há a necessidade de entrada de mais dados, que serão as características geométricas do agitador.

Se todos os intervalos de validade das equações forem obedecidos, será gerado um arquivo de dados. Se não, o programa informará a inconsistência dos dados e solicitará novas entradas dos mesmos.

#### 4. RESULTADOS

De posse do programa AGITADOR, foram plotados 4 gráficos:

- gráfico 1 = representa o modelo de Pavlov (modelo 2)
- gráfico 2 = representa o modelo de Brauer (modelo 1)
- gráfico 3 = representa o modelo de Nagata (modelo 3)
- gráfico 4 = representa um agitador tipo pás, quando analisado pelos três modelos

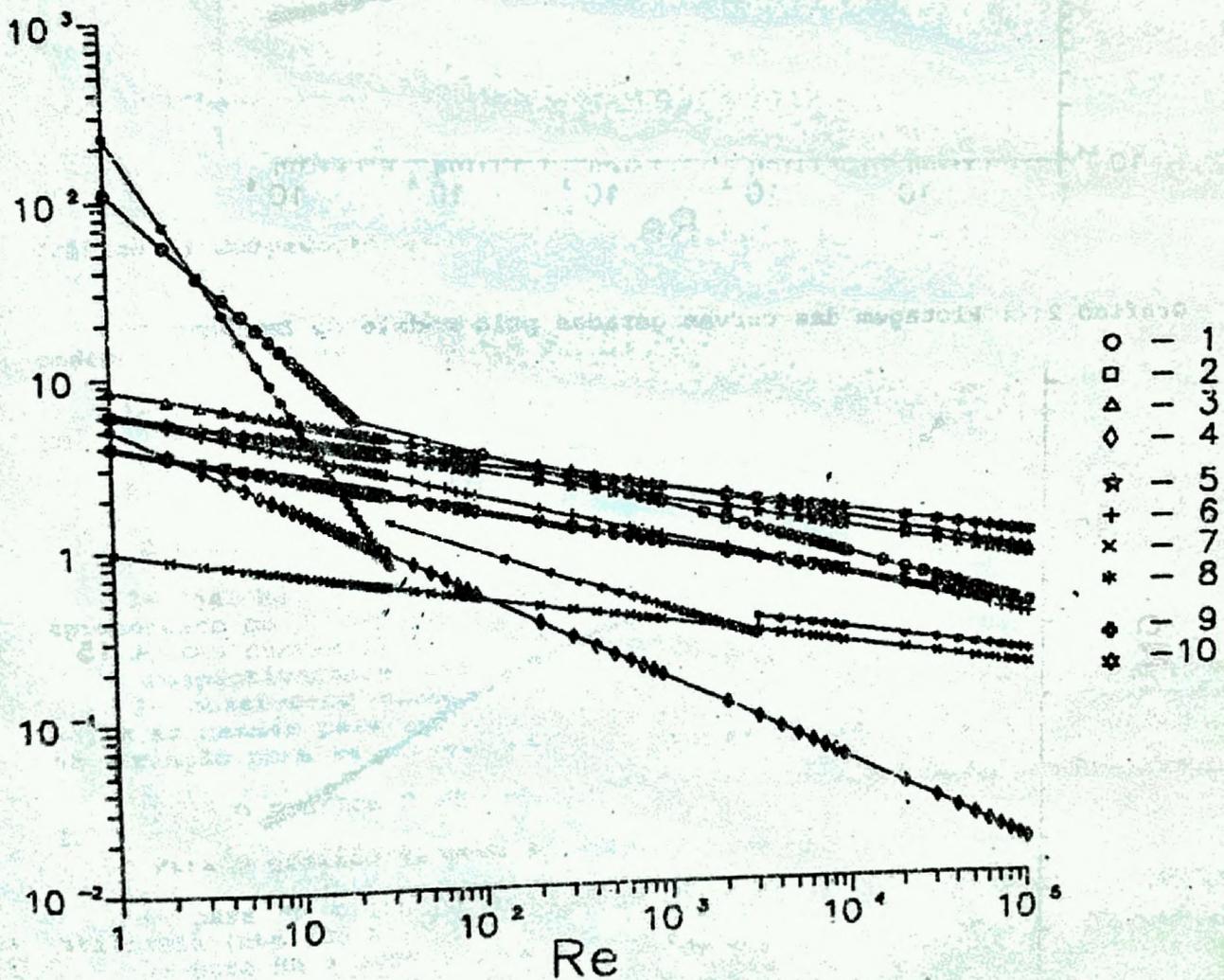


Gráfico 1: Plotagem das curvas geradas pelo modelo de Pavlov.

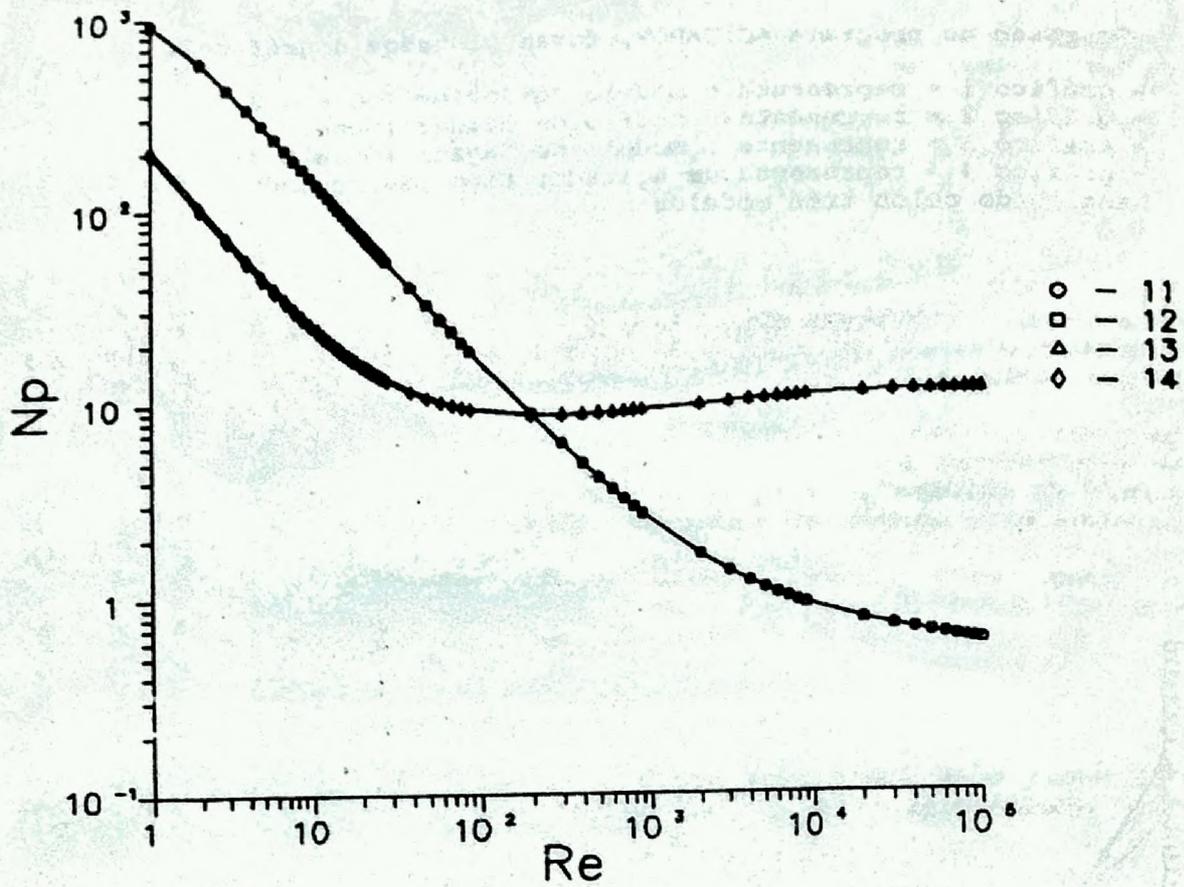


Gráfico 2: : Plotagem das curvas geradas pelo modelo de Brauer

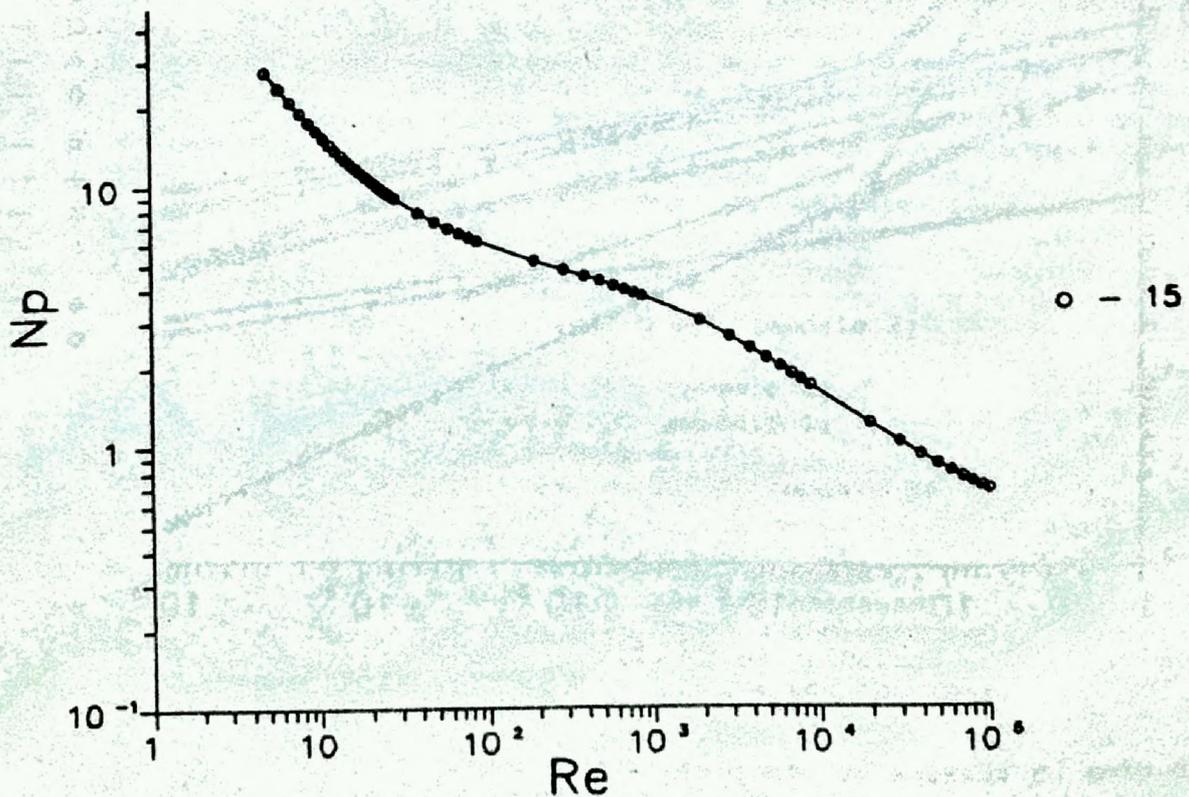


Gráfico 3: : Plotagem da curva gerada pelo modelo de Nagata

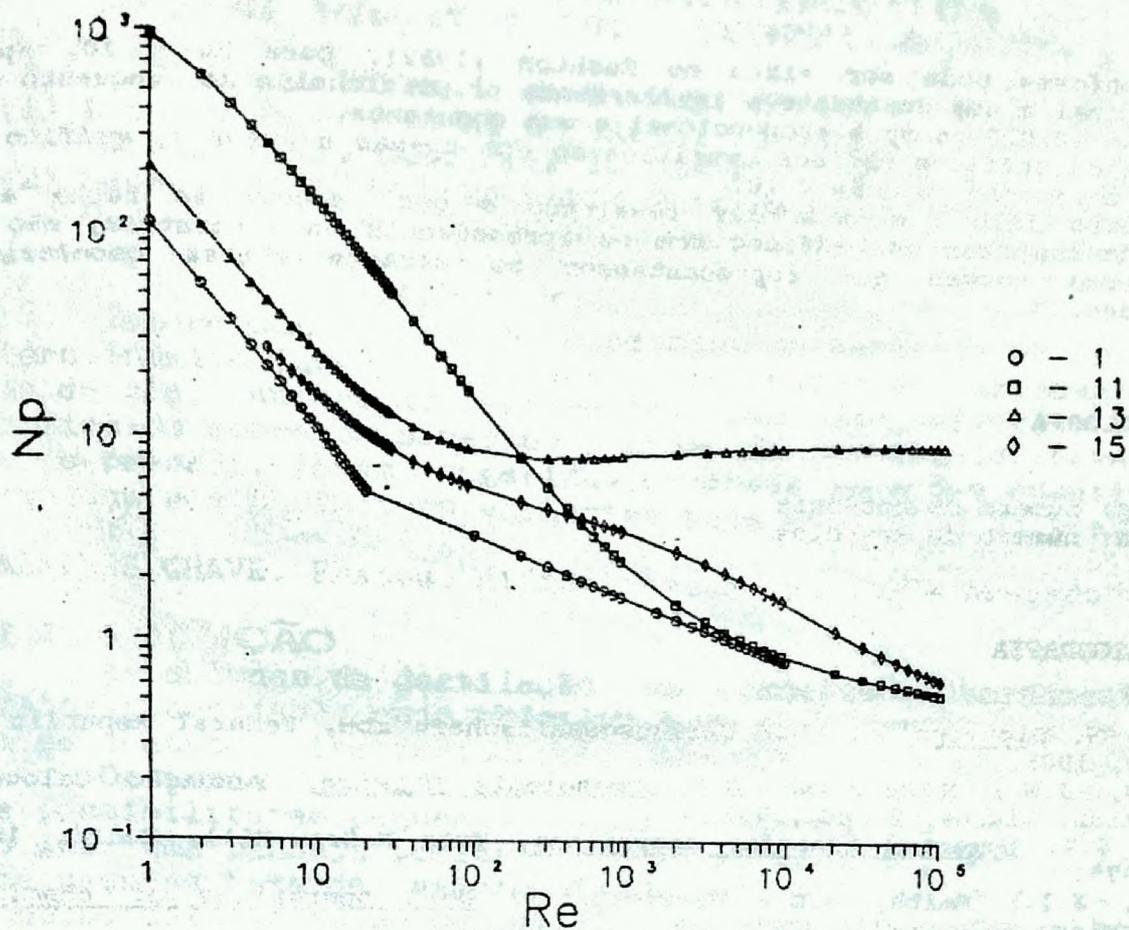


Gráfico 4: Comparação entre os equacionamentos para um agitador tipo pás

O gráfico 1 representa o equacionamento empírico mais simples. Nele podemos notar as seguintes características:

- 1- contrariamente ao apresentado em McCabe (1985), o  $N_p$  não tende a um valor constante após  $Re = 10$
- 2- não é feita nenhuma referência a presença ou não de chicanas.

O gráfico 2 apresenta as seguintes características:

- 1- já há uma maior aproximação com o comportamento das curvas apresentado em McCabe (1985);
- 2- as curvas 11 e 12 representam um agitador de pás e um de turbina, respectivamente, sem chicanas e os 13 e 14, com chicanas
- 3- observa-se também que, desde que as características geométricas sejam as mesmas para agitadores tipo pás e tipo turbinas, praticamente não há variação para as curvas, tanto no caso de haverem chicanas, como não.

Para o gráfico 3 são válidas as mesmas observações feitas ao gráfico 1.

Para o gráfico 4, pode-se notar que:

- 1- para  $Re < 100$  há uma grande variação de  $N_p$  dependendo da equação utilizada (até 800 %);
- 2- para  $Re > 1000$  e considerando-se que as curvas 11 e 15, do gráfico 4 referem-se a ausência de chicanas, vê-se que os modelos praticamente fornecem o mesmo valor de  $N_p$ , com uma variação máxima de 42 % para  $Re = 10.000$  e, após esse  $Re$ , os valores tendem a se igualar.

Assim pode-se supor que, quanto mais turbulento for o regime, menos complexo pode ser o modelo aplicado. O mesmo é válido para o regime laminar.

Desta forma compreende-se o equacionamento proposto por Rushton (1952) e apresentado por Terron (1992).

Conforme pode ser visto em Rushton (1952), para  $Re < 10$ ,  $N_p$  é proporcional a uma constante e inversamente proporcional a  $Re$ , enquanto que para  $Re > 10.000$ , o  $N_p$  é proporcional a uma constante.

Pelos gráficos obtidos, verifica-se que apenas a curva 1, gráfico 1, obedece a relação para  $Re < 10$ .

Outro fato que pode ser ressaltado é que, embora se tenha aqui procurado comparar os gráficos com os apresentados na literatura, não se encontraram curvas que representassem as características geométricas analisadas.

#### 4. SIMBOLOGIA

$N_p$ : número de potência  
 $Re$ : número de Reynolds

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- BRAUER, H. Biotechnology, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Federal Republic of Germany, 1985.
- COULSON, J.M.; RICHARDSON, J.F. Tecnologia Química, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2 ed., 1962.
- GUPTA, S.K. Momentum transfer operations, Tata McGraw-Hill, Delhi, 1st ed., 1979.
- McCabe, W.L.; Smith, J.C.; Harriott, P. Unit operations of chemical engineering, McGraw-Hill, USA, 4th ed., 1985.
- NAGATA, S. Mixing, A Halsted Press Book, Toquio, 1st ed., 1975.
- 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.
- RUSHTON, J.H. Mixing technology, Ind. Eng. Chem., nq 8, p. 55-58, Aug., 1952.
- TERRON, L.R. Conceitos fundamentais da agitação em líquidos, apostila do Curso PQI 816, EPUSP, 1992.
- TREYBAL, R.E. Mass-Transfer Operations, McGraw-Hill, USA, 5th pr., 1980.
- ULBRECHT, J.J.; PATTERSON, G.K. Mixing of liquids by mechanical agitation, Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1st ed., 1985.
- UHL, V.W.; GRAY, J.B. Mixing - Theory and Practice, AP, USA, 2nd. pr., 1966.
- WOOD, J.C.; WHITTEMORE, E.R.; BADGER, W.L. The measurement of performance, Chem. Met. Eng., v. 27, p. 1176, 1922.