

MODELO DINÂMICO DE BOMBA CENTRÍFUGA PARA
UTILIZAÇÃO EM APLICAÇÕES EM TEMPO REAL




LUIZ VALCOV LOUREIRO
ANTONIO CARLOS DE OLIVERIA BARROSO
COORDENADORIA PARA PROJETOS ESPECIAIS - COPESP

RESUMO

O modelo de bomba centrífuga desenvolvido, insere-se no contexto de um simulador em tempo real para uma planta de processo. Permite a simulação deste equipamento em situações de regime estacionário e transitório. Em regime estacionário foram utilizadas as curvas características fornecidas pelo fabricante e, durante os transitórios, as leis de afinidade em conjunto com a equação da quantidade de movimento angular resolvida através do método de Heun.

INTRODUÇÃO

Os transitórios decorrentes da partida/parada de bombas e da abertura/fechamento das válvulas associadas devem ser analisados quando do projeto e análise de sistemas termohidráulicos.

A modelagem e simulação de tais transitórios é abordada de diferentes maneiras em função das informações disponíveis a respeito dos equipamentos envolvidos e conforme a aplicação desejada. Diversos códigos computacionais para simulação de transitórios de bombas, sobretudo em instalações nucleares, são encontrados na literatura.

Daleas/1/ e Grandia/2/ simulam a evolução da vazão no circuito primário de um PWR durante a parada das bombas. A altura manométrica e a energia transferida ao fluido têm sua evolução descritas a partir das curvas de quatro quadrantes fornecidas pelos fabricantes das bombas.

O tratamento dado por Fuls/3/ é semelhante ao de Daleas e Grandia, sendo que a curva característica da altura manométrica é tratada através das leis de afinidade, e a transferência de energia para o fluido é avaliada através de métodos empíricos.

Wylie e Streeter/4/, Agrawal e Khatib-Rahbar/5/ e Vanni/6/ empregam tanto para a curva característica da altura manométrica, como para a do torque no eixo, as curvas homólogas utilizadas para bombas de mesma rotação específica.

Em todas as referências citadas acima, não há a preocupação com a simulação do transitório de partida e parada de bomba em tempo real.

O presente trabalho insere-se no contexto do desenvolvimento de um simulador em tempo real para uma planta de processo. Assim, a escolha do método numérico para a resolução do modelo e o tratamento conferido aos fenômenos em questão visam atender a condição de tempo real.

Testes realizados numa instalação experimental do IPEN foram comparados com resultados obtidos a partir do modelo proposto, sendo o transitório do sistema (tubos, válvulas, trocadores de calor) simulado como uma sucessão de estados "pseudo" estacionários.

DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo de bomba centrífuga aqui desenvolvido se aplica para simulação deste equipamento em situações de regime estacionário e transitório, tanto de partida como de parada da bomba.

Em regime estacionário foram utilizadas as curvas características fornecidas pelo fabricante, para o cálculo da vazão e altura manométrica transmitidas ao fluido pela bomba.

Durante os transitórios, foram empregadas as leis de afinidade em conjunto com as equações de conservação da quantidade de movimento angular do rotor para avaliar as variações da altura manométrica, vazão e velocidade de rotação da bomba. O método de Heun foi utilizado na resolução da equação de conservação da quantidade de movimento angular, por ser um método explícito e portanto veloz e permitir intervalos de integração maiores.

O fenômeno da cavitação não é simulado, assim como não foi considerada a possibilidade de fluxo reverso na bomba, devido à presença de válvulas de retenção nos sistemas para os quais este modelo será empregado. As situações de vazamento, extração e vazão para resfriamento de selo não foram também consideradas.

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

No caso de regime estacionário a bomba recebe energia através do motor que a aciona, sendo que o torque do motor elétrico é suficiente para manter a velocidade de rotação aproximadamente constante. Neste caso o comportamento da bomba pode ser avaliado diretamente através da curva característica que relaciona vazão e altura manométrica. A curva característica foi aproximada por um polinômio usando o método dos mínimos quadrados.

Quando da análise de transitórios, necessita-se conhecer o comportamento dos torques envolvidos, da vazão, da altura manométrica e da rotação no tempo. É através das leis de afinidade e da equação de conservação da quantidade de movimento angular

que pode-se avaliar o comportamento da bomba nestas circunstâncias.

Hipóteses. As principais hipóteses assumidas no desenvolvimento do modelo são as seguintes:

- fluido incompressível,
- escoamento adiabático,
- não há fluxo reverso na bomba,
- a variação da rotação nominal do motor é desprezível com a mudança de carga aplicada (baixo escorregamento).

Equação da Continuidade. Como o fluido é incompressível e assumindo que não há estocagem do mesmo no interior da bomba, a vazão mássica na sucção, W_s , é igual à na descarga da bomba, W_d .

$$W_s = W_d \quad (1)$$

Equação da Conservação de Energia. A altura manométrica é o acréscimo de energia transmitido ao fluido num processo adiabático. O rendimento efetivo da bomba é definido conforme a equação que segue:

$$Ref = \rho \cdot H \cdot g \cdot gc / (hd - hs) \quad (2)$$

onde Ref = rendimento efetivo, adimensional

ρ = massa específica, kg/m^3

H = altura manométrica, m

hs = entalpia do fluido na sucção, J/kg

hd = entalpia do fluido na descarga, J/kg

g = aceleração da gravidade, m/s^2

gc = fator de conversão, $1 kg \cdot m / N \cdot m^2$

Conservação da Quantidade de Movimento. A equação de conservação da quantidade de movimento angular para a bomba que inclui o motor elétrico, é a seguinte:

$$J \cdot dw/dt = \sum T \quad (3)$$

onde J = momento de inércia das partes girantes da bomba, m^2/s

dw/dt = derivada da velocidade angular da bomba, rad/s^2

$\sum T$ = somatória dos torques envolvidos, Nm

Os torques nas partes girantes incluem o torque no rotor, induzido pela transferência de energia para o fluido, o torque resistente nos mancais e no enrolamento do motor, este devido à resistência do ar e o torque elétrico. O torque magnético foi desprezado.

O torque no rotor, também denominado torque hidráulico, costuma ser dividido em dois termos, torque hidráulico útil e dissipado. A expressão do torque hidráulico útil, Thu , que corresponde à

energia transmitida ao fluido sob a forma de acréscimo de pressão, é apresentada abaixo.

$$Thu = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / w \quad (4)$$

onde Q = vazão volumétrica, m^3/s

w = velocidade angular do rotor, rad/s

Quanto ao torque hidráulico dissipado, Thd , que corresponde à energia perdida sob a forma de transferência de calor ao fluido, pelos efeitos da turbulência e viscosidade, é proporcional ao quadrado da velocidade relativa entre o rotor e o fluido. O torque hidráulico dissipado pode ser calculado a partir de uma condição nominal de funcionamento conhecida, segundo a expressão (5), estimando-se o rendimento hidráulico, Rhn , a partir da expressão (6) sugerida por Karassik et alli/7/.

$$Thd = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_n \cdot H_n}{w_n} (1/Rhn - 1) \frac{(Rr \cdot w - V)^2}{(Rr \cdot w_n - V_n)^2} \quad (5)$$

$$Rhn = 1 - 0,0713 \cdot (Q_n)^{-0,25} \quad (6)$$

onde Q_n = vazão volumétrica nominal, m^3/s

H_n = altura manométrica nominal, m

w_n = velocidade angular nominal, rad/s

Rr = raio do rotor, m

V = velocidade do fluido na descarga da bomba, m/s

V_n = velocidade do fluido na descarga da bomba nas condições nominais, m/s

O torque resistente, Tr , devido ao atrito nos mancais e a resistência do ar nos enrolamentos do motor, possui um comportamento que varia conforme a velocidade de rotação da bomba, como mostra as equações (7), (8), e (9).

O torque resistente, assim como o torque hidráulico dissipado, pode ser calculado a partir de uma condição nominal de funcionamento conhecida. O torque resistente nominal, Trn , é calculado segundo a expressão (10), onde o rendimento mecânico, Rm , é avaliado através de correlações obtidas a partir do gráfico sugerido por Karassik et alli.

$$Tr = Trn \cdot (w/w_n)^2 \quad \text{se } w^2 > 0,035 \cdot w_n^2 \quad (7)$$

$$Tr = 0,035 \cdot Trn \quad \text{se } 0 < w^2 \leq 0,035 \cdot w_n^2 \quad (8)$$

$$Tr = 0,1 \cdot Trn \quad \text{se } w = 0 \quad (9)$$

$$Trn = \rho \cdot g \cdot Q_n \cdot H_n \cdot Rm / w \quad (10)$$

O torque elétrico, necessário para análise da partida da bomba, pode ser avaliado através da curva característica do torque fornecida pelo fabricante.

Na ausência dessa informação, pode-se aproximar esta curva por trechos de reta entre seus pontos de conjugado com rotor bloqueado, mínimo, máximo e nominal, disponíveis na Norma NBR-7094, conforme a categoria do motor.

Curva Característica do Transitório. A partir das leis de afinidade deduz-se, conforme Fuls, a expressão abaixo para relacionar a altura manométrica com a vazão e a rotação da bomba, em situações de regime transitório.

$$H = \frac{(H_0 - H_1)(Q/Q_1)^2 + (H_1(Q_0/Q_2)^2 - H_0)(w/w_1)^2}{(Q_0/Q_1)^2 - 1} \quad (11)$$

onde 0,1 = índices correspondentes à dois pontos conhecidos da curva característica para regime estacionário

Método Numérico. A solução da equação diferencial ordinária (3), correspondente à conservação da quantidade de movimento angular, foi resolvida através do método de Heun, ou Euler modificado. A escolha deste método explícito se justifica devido à rapidez inerente a este tipo de processo de solução numérica e à possibilidade de utilização de um passo de integração superior ao do método de Euler puro.

RESULTADOS

O circuito experimental, descrito no fluxograma simplificado na figura 1, foi utilizado para levantar dados que permitiram a validação do modelo proposto. Este circuito consta, basicamente, além da bomba centrífuga, de um aquecedor-elétrico, de uma seção de testes, de um trocador de calor casco-tubo e de um pressurizador.

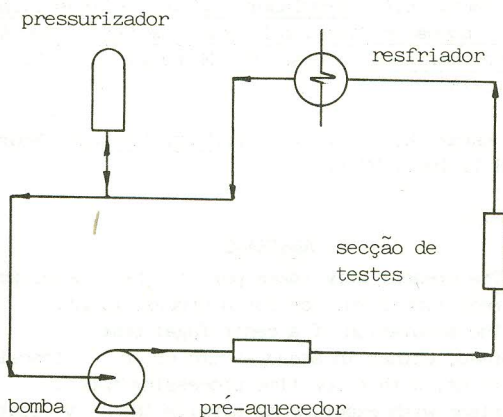


Figura 1. Fluxograma do circuito experimental.

As principais características do conjunto formado pela bomba e o motor elétrico, fornecidas pelo fabricante, encontram-se listadas a seguir:

- desempenho no ponto de rendimento máximo
 - . vazão volumétrica = 0,020 m³/s
 - . altura manométrica = 90 m
 - . rendimento efetivo = 22%
- altura manométrica com vazão nula = 103 m
- rotação nominal = 3540 rpm
- potência nominal do motor = 85 kW

Parâmetros Críticos. A validação do modelo proposto foi feita através da comparação dos valores experimentais e calculados dos parâmetros críticos do sistema de bombeamento. As variáveis escolhidas como parâmetros críticos levaram em conta a disponibilidade do sistema de medição da instalação experimental. Os parâmetros empregados foram a vazão mássica e altura manométrica da bomba. A rotação também é uma variável de interesse na validação, mas como a bomba é encapsulada, não foi possível ter acesso às partes girantes para efetuar sua medição.

Dados Experimentais. Os dados experimentais sobre a parada da bomba, foram obtidos na instalação experimental, sob as seguintes condições de operação: após o regime permanente ter sido atingido, iniciou-se o registro de dados por 10 segundos, quando então o motor elétrico de acionamento da bomba foi desligado, sendo, a partir daí, registradas as condições do circuito por um período de 100 segundos.

Quatro diferentes experiências foram realizadas para a mesma vazão mássica de 5 kg/s, em regime estacionário. Variaram-se as condições médias de temperatura e pressão no circuito, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1. Condições das experiências.

PARÂMETRO	EXPERIÊNCIA			
	A	B	C	D
Temperatura média (grau C)	160	70	180	90
Pressão média (bar)	19	19	70	70

Comparação de Resultados. Os cálculos de vazão, altura manométrica e rotação foram realizados com o modelo proposto. A condutividade hidráulica do circuito, Ch , definida em (12), foi avaliada através de uma correlação, onde o número de Reynolds, Re , é a variável independente. A correlação, levantada a partir dos dados dos quatro testes, é apresentada na equação (13).

$$Ch = w \cdot (\rho \cdot g \cdot H)^{-0,5} \quad (12)$$

$$Ch = 14,8832 \cdot Re^{-0,16485} \quad (13)$$

Os parâmetros críticos, vazão mássica e altura manométrica, foram normalizados com relação aos seus valores em regime estacionário. Foram levantadas curvas dos parâmetros em função do tempo, para o caso de parada da bomba, nas condições descritas na tabela 1. Devido ao comportamento semelhante dessas curvas nos quatro testes realizados, apresentam-se dois gráficos que correspondem aos testes B e C.

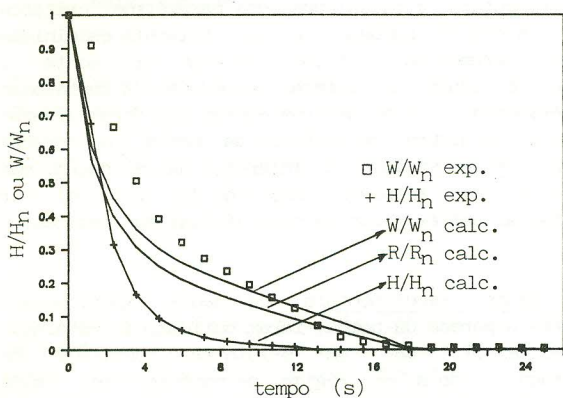


Figura 2. Evolução dos parâmetros críticos (Teste B).

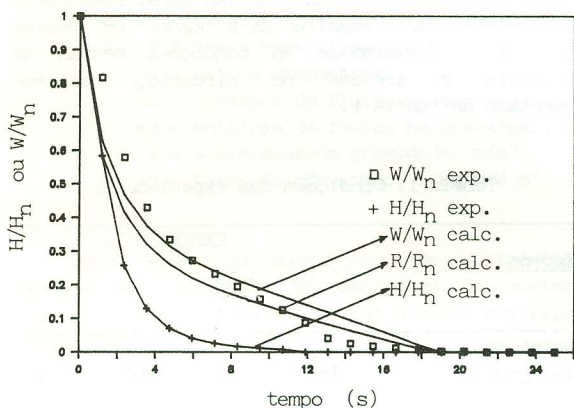


Figura 3. Evolução dos parâmetros críticos (Teste C).

As linhas contínuas representam os resultados obtidos através do modelo e os pontos os valores medidos experimentalmente.

Como pode-se observar nas figuras 2 e 3, verifica-se uma coincidência satisfatória entre os valores calculados e medidos da altura manométrica da bomba. No que concerne à vazão mássica, no início do transitório a vazão calculada cai mais rapidamente que a medida, situação que se inverte com a evolução do fenômeno. Pode-se observar além da curva da rotação normalizada que, em ambos os testes, os tempos de "coast-down", calculado e medido, coincidem.

CONCLUSÃO

A modelagem de parada de bomba, como uma sucessão de estados "pseudo" estacionários, com a utilização conjunta do método de Heun, de expressões simplificadas para os torques e para a curva característica da bomba em transitório - sem a utilização das curvas homólogas - proporciona uma simulação precisa do fenômeno.

O tempo médio de processamento para a simulação da parada da bomba da instalação experimental, em um micro-computador IBM PC-XT, compatível, com coprocessador aritmético 8087 e "clock" de 4,77 MHz, foi de 2,5 segundos, sendo que o fenômeno dura aproximadamente 17 segundos.

Uma vez que a diferença entre o tempo de processamento e a duração do fenômeno é grande, torna-se possível a simulação de sistemas hidráulicos complexos, atendendo à condição de tempo real.

REFERÊNCIAS

- /1/ Daleas, R.S., COAST Code Description. CENPD-98, Combustion Engineering, Inc. (1973).
- /2/ Grandia, M.R., Analog-Hybrid Reactor Coolant Hydraulic Transient Model. BAW-10073, Babcock & Wilcox (1973).
- /3/ Fuls, G.M., FLOTL - Flow Transient Analysis of a Pressurized Water Reactor During Flow Coastdown. WAPD-TM-428, Bettis Atomic Power Laboratory (1968).
- /4/ Wylie, E.B. e Streeter, V.L., Fluid Transients. McGraw-Hill Inc., NY (1978).
- /5/ Agrawal, A.K. e Khatib-Rahbar, M., Dynamic Simulation of LMFBR Systems. Atomic Energy Review, vol. 18, No. 2 (1980).
- /6/ Vanni, E.A., Simulador Digital do Pressurizador e Bomba do Circuito Primário de Reator com Água Pressurizada. Tese de Mestrado, I.M.E., RJ (1978).
- /7/ Karassik, I.J. et alli, Pump Handbook. McGraw-Hill Inc., NY (1972).

ABSTRACT

The present work takes part in the development of a real time simulator for a process plant.

The simulation of a centrifugal pump was performed, either in steady-state or in transient conditions, with a low time processing model. The comparison with experiments permits the validation of the proposed model.