Unisanta Science and Technology, **2013, 6, December**
Published Online 2013 Vol.2 N°2 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Ponto de operação em sistemas de bombeamento para tanques em cotas diferentes - aplicação de equações não lineares

Costa M. J. F , Roseno, K. T. C , Moraes Jr , D. e Santoro, A.

UNISANTA –Universidade Santa Cecília –Departamento de Pós-Graduação, Santos- SP, Brasil
Programa de Pós-Graduação – Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Santa Cecília.
E-mail: mjfcosta@sabesp.com.br
Received *July, 2013*

Resumo

O estudo algébrico de bombeamento alimentando apenas um ponto é vasto na literatura, porém, são raros os trabalhos sobre a alimentação simultânea de dois ou mais tanques em cotas diferentes. Os sistemas de bombeamento em redes ramificadas tem diversas aplicações, como no abastecimento público de água, na irrigação agrícola, nos sistemas de incêndio, no escoamento de petróleo e nas industrias em geral (PORTO, 2006). Dentro deste contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um método algébrico de simples resolução para o cálculo do ponto de operação de uma bomba centrífuga que alimenta dois tanques em cotas diferentes. O método algébrico foi comparado com os métodos gráfico tradicional e o computacional EPANET, além de ser comprovado experimentalmente em uma unidade de bancada. Um desvio de 9% e 2,5% para a vazão e altura manométrica, respectivamente, foi obtido entre os valores teóricos e experimentais sendo, então, sugerido um algoritmo algébrico para determinar o ponto de operação de uma bomba em rede ramificada. A aplicação deste algoritmo algébrico apresenta como vantagem, em relação ao processo gráfico, uma solução com menor acúmulo de erros, além da redução na demanda de tempo de execução para determinação das condições de operação do sistema de bombeamento.

Palavras-chave: bomba centrífuga. sistemas ramificados. método algébrico. curva da bomba. perda de carga.

Operating point in pumping systems for tanks in different dimensions-application of non-linear equations

Abstract

The algebraic study of pumping feeding only one point is vast in the literature, however, are rare work on simultaneous feeding of two or more tanks in different dimensions. The pumping systems in branched networks has several applications, such as in public water supply, agricultural irrigation, fire systems, oil flow and General industries (PORTO, 2006). Within this context, the present study aimed to develop a simple algebraic method for calculating the operating point of a centrifugal pump that feeds two tanks in different dimensions. The algebraic method was compared with the traditional graphic methods and computational method EPANET, besides being proven experimentally in a pilot unit. A diversion of 9% and 2.5% for the flow and head, respectively, was obtained between theoretical and experimental values being then proposed an algebraic algorithm to determine the operating point of a pump in branched network. The application of algebraic algorithm features as leverage, in relation to the graphic process, a solution with less accumulation

Copyright © 2013 ISESC.

of errors, in addition to the reduction in demand for run-time determination of the conditions of operation of the pumping system.

Keywords: centrifugal pump. branched systems. algebraic method. pump curve. load loss.

1. Introdução

As bombas são projetadas e construídas para trabalhar em sua máxima eficiência em um ponto conhecido como BEP (Best Efficient Point) (TABER, 2011). Assim, a determinação do ponto de funcionamento de uma bomba e a sua confirmação próximo do BEP é de grande importância para a melhoria da eficiência do sistema (CRUZ, 2009). O ponto de funcionamento de uma bomba centrífuga relativo a um sistema pode ser determinado a partir da intersecção da curva da bomba ("H" _"b") com a curva do sistema ("H" _"s"), as quais são plotadas em um gráfico de altura manométrica (H) em função da vazão (Q). Outra forma de obter o ponto de operação da bomba instalada no sistema é expressar matematicamente as curvas da bomba e do sistema e resolver simultaneamente essas equações (TALWAR, 1988).

No caso de circuitos hidráulicos complexos (ramificações e diferentes desníveis) a solução gráfica demanda tempo, requerendo traçar várias curvas pelas quais os erros se somam o que torna a solução matemática mais prática e com menor acúmulo de erros. Portanto, para se analisar os circuitos hidráulicos com bombas centrífugas, necessita-se de equações que descrevam a curva característica da bomba e a curva de perda de carga do sistema onde a mesma encontra-se instalada (ANDRADE e CARVALHO, 2001).

2. Objetivo

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um método algébrico de simples resolução para o cálculo do ponto de operação de uma bomba centrífuga alimentando dois tanques em cotas diferentes.

3. Unidade

3.1 Equipamentos e acessórios

A unidade experimental, mostrada na figura 1, consistiu de um tanque de alimentação em acrílico de 162,5 litros, uma bomba centrífuga acoplada a um motor com potência nominal de 2 CV, um inversor de frequência para controlar a rotação do motor, tubulação de PVC transparente na descarga da bomba com diâmetro nominal de 25 mm, um rotâmetro, um manômetro, e dois tanques de 72 litros, em acrílico, instalados em cotas diferentes na descarga da bomba. As saídas laterais dos dois tanques foram direcionadas para o tanque inferior através de calhas individuais, como reciclo, formando um sistema fechado. A medição do retorno do fluido de cada calha, pela técnica massa por tempo, permitiu obter a vazão em cada uma das ramificações.

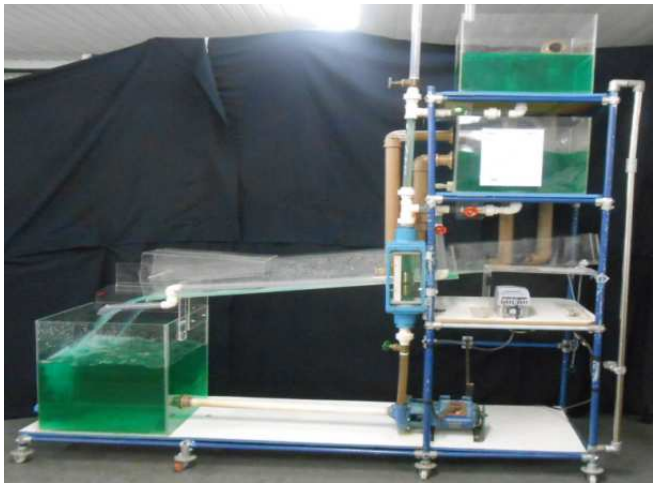


Figura 1 – Sistema de bombeamento em redes ramificadas, unidade em funcionamento.

3.2. Fundamentos teóricos

A) Método gráfico tradicional

A Figura 2 mostra um sistema de bombeamento ramificado onde é ilustrada a determinação do ponto de funcionamento pelo método gráfico tradicional (HOUGHTALEN, HWANG e AKAN, 2013). Este sistema é constituído de uma bomba centrífuga (Bo) succionando o fluido de um reservatório inferior (T1) e alimentando dois reservatórios em cotas diferentes, reservatório intermediário (T2) e reservatório superior (T3). Observam-se, ainda, três ramos de tubulações:

a) Ramo A, trecho de tubulação e acessórios do ponto de bifurcação 4 até 5, entrada do tanque intermediário (T2);

b) Ramo B, trecho de tubulação e acessórios do ponto de bifurcação 4 até 7, entrada do tanque superior (T3);

Copyright © 2013 ISESC.

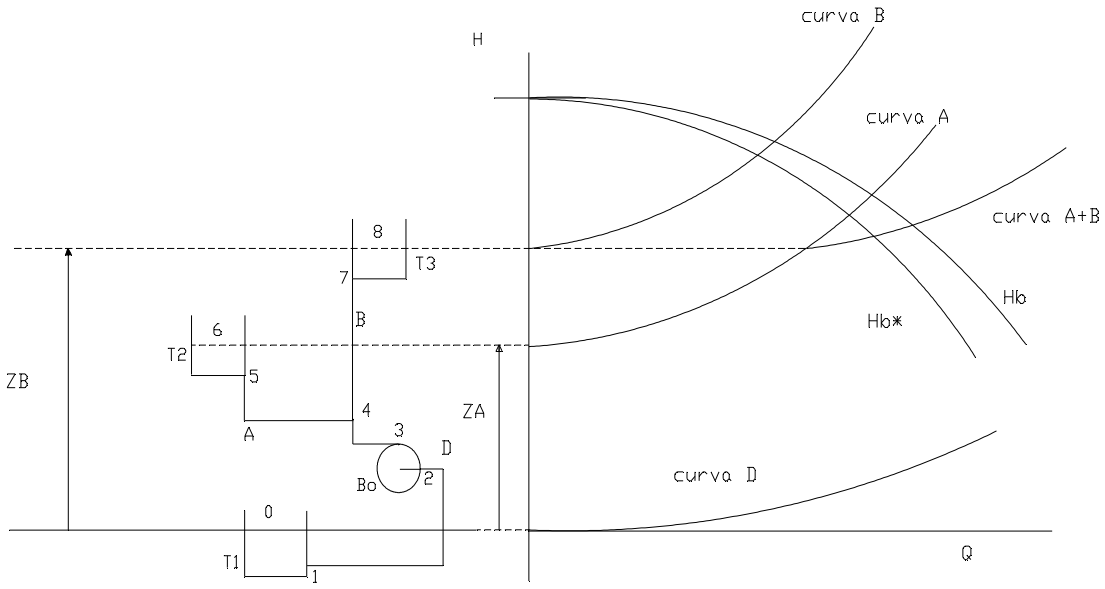


Figura 2 - Curvas de perdas de carga em sistemas com descarga para duas cotas diferentes
Fonte: HOUGHTALEN, HWANG e AKAN (2013, p.104)

c) Ramo D, trecho de tubulação e acessórios do ponto 1 (saída do tanque inferior (T1)), até a entrada da bomba, ponto 2 (ramal de sucção da bomba); e da saída da bomba (ponto 3) até o ponto de bifurcação 4 (ramal de recalque da bomba).

O nível do fluido no tanque T1 é denotado como 0 (referência) e nos tanques T2 e T3 como 6 e 8, respectivamente. A cota ZA é medida do nível do líquido do tanque inferior (T1) até o nível do líquido no tanque intermediário (T2) e a cota ZB é medida do nível do líquido do tanque inferior (T1) até o nível do tanque superior (T3). Ao lado direito da Figura 2 é constituído das curvas A, B, D e Hb, as quais correspondem, respectivamente as curvas manométricas do ramal A, ramal B, ramal D e da bomba. A curva Hb*, curva corrigida da bomba, é obtida subtraindo, a uma determinada vazão, da altura manométrica da bomba, a perda de carga do ramal D.

A curva de altura manométrica do sistema combinado (curva A+B) pode ser obtida somando-se as taxas de fluxo (abcissa) das curvas de altura manométrica dos sistemas individuais (curva A e curva B) para cada valor de altura.

B) Método algébrico

O método algébrico utiliza o mesmo princípio teórico do sistema gráfico, a diferença é que no método gráfico obtêm-se valores de vazão e altura manométrica para plotar a curva do sistema A+B e no algébrico obtêm-se valores para determinação da equação do sistema, equação H(A+B).

No método gráfico tradicional são desenvolvidas as equações manométricas indicadas resumidamente na Tabela 1.

Tabela 1 - Equações das curvas

CURVAS	EQUAÇÕES	
A	$HA=ZA+RA*Q^2$	(2)
B	$HB=ZB+RB*Q^2$	(3)
D	$HD=RD*Q^2$	(4)
BOMBA	$Hb=a*Q^2+bQ+c$	(5)
BOMBA CORRIGIDA	$Hb^*=Hb-HD$	(6)

Copyright © 2013 ISESC.

Para pequenas variações da vazão (Q), a equação da curva H(A+B) pode ser simplificada para uma equação similar à manométrica de sistemas simples de recalque, como apresentada na equação (1) (PORTO, 2006).

$$H(A+B) = a_0 + a_2.Q^2 \quad (1)$$

Os coeficientes a_0 e a_2 podem ser determinados, de um modo simples e rápido, pela substituição de dois pares de valores correspondentes da curva A+B, de vazão e altura manométrica, na equação (1).

Resolvendo o sistema de equações constituído pela equação (6) da curva corrigida da bomba e a equação da curva do sistema (1), determina-se a vazão do ponto de funcionamento e a altura manométrica utilizada para obter, através das equações (2) e (3), as vazões nos ramais A e B. A altura manométrica da bomba no ponto de funcionamento é determinada substituindo a vazão do ponto de funcionamento na equação (5) da bomba.

4. Resultados e Discussões

A Tabela 2 apresenta a comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos utilizados. Os valores determinados pelos métodos algébrico e gráfico foram próximos, pois são obtidos pelas mesmas equações. As diferenças dos valores são atribuídas a erros de visualização e construção dos gráficos.

O método computacional EPANET utiliza-see de um processo iterativo e foi o que apresentou os maiores desvios em relação ao experimental.Para os dados de entrada, como a constante de perda de carga singular (K) e rugosidade da tubulação (ε), foi utilizado valores da literatura. Esses valores não representam os reais do experimento, pois não leva em consideração o número de Reynolds (tipo de escoamento). Outros fatores observados durante o experimento que contribuíram para os desvios entre os métodos teóricos e os verificados no experimento foram: a) diferença de nível entre o tanque intermediário (T2) e superior (T3) irrelevante para os cálculos realizados (0,38 m); e b) a curva do sistema, curva H(A+B) é, praticamente, horizontal, pois a perda de carga nos ramais A e B são reduzidas em função da variação da vazão.

5. Conclusões

O presente trabalho permitiu as conclusões que seguem: a) o algoritmo proposto para determinação do ponto de operação de sistemas de bombeamento ramificados além de ter simples resolução apresentou desvios inferiores a 9% em relação aos valores experimentais da vazão; b) os resultados com o algoritmo fornecem exatidão de solução matemática; c) o sistema gráfico requer que se tracem várias curvas, pelas quais os erros podem se acumular; d) o método algébrico forneceu desvios menores que o sistema computacional EPANET, o qual utiliza método iterativo; e) o método algébrico tem como limite o tipo de bomba (limitado às bombas radiais) e o tipo de fluxo, que deve ser turbulento.

Tabela 2 - Comparação dos resultados obtidos pelos métodos: gráfico, EPANET, algébrico e experimental.

		Métodos						
		Gráfico		EPANET		Algébrico		Experimental
		valor	erro relativo (%)	valor	erro relativo (%)	valor	erro relativo (%)	valor
Bomba	Q (m^3/h)	3,55	9	3,3	15,40	3,55	9	3,9
	H (mca)	2,05	2,5	2,23	11,50	2,05	2,5	2
Bomba corrigida	Q (m^3/h)	3,55	9	3,3	15,40	3,55	9	3,9
	H (mca)	1,77	X	2,04	X	1,77	X	X
Tanque inferior	QA (m^3/h)	2,95	9,30	2,84	5,20	2,95	9,30	2,7
Tanque superior	QB (m^3/h)	0,7	42	0,46	62	0,84	30	1,2

Copyright © 2013 ISESC.

6. Referências bibliográficas

PORTO, R. M. Hidráulica Básica. Publicações EESC-USP. São Carlos. 2006.

TABER, G. Improving Pump Efficiency. HPAC Engineering – april 2011

TALWAR, M. Análisis de circuitos de bombas centrífugas. Bombas Selección, uso y mantenimiento. McGran-Hill. 1988. Madrid.

ANDRADE, L.; CARVALHO, J.A. Desenvolvimento de Software para Dimensionamento de Sistemas de Recalque. Revista Brasileira de Agrocomputação, V1, N1, p 22-29, jun 2001.

HOUGHTALEN, R. J.; HWANG, N. H. C.; AKAN, A. O. Engenharia Hidráulica – PARSON – SP - 2013

Copyright © 2013 ISESC.