

## **AValiação de Duas Bombas Centrífugas Associadas em Série e Paralelo**

**GIULIANI DO PRADO<sup>1</sup> E TIAGO BARROS DA SILVA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Maringá, Cidade Gaúcha - PR, CEP 87.820-000. e-mail(s): gprado@uem.br; tiagobr18@hotmail.com

### **1 RESUMO**

As curvas características de duas bombas centrífugas operando separadamente e em associação em série e paralelo foram determinadas no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Estadual de Maringá, em Cidade Gaúcha/PR. Para interpolação dos dados (altura total de bombeamento versus vazão) obtidos em laboratório com as bombas centrífugas operando separadamente, foram ajustados os coeficientes do interpolador spline cúbico. Os valores de altura total de bombeamento da associação em série e vazão da associação em paralelo, das curvas observadas nos ensaios, foram relacionados aos valores das curvas determinadas pelo processo de composição de curvas de bombas operando separadamente. Houve uma tendência dos valores das curvas obtidas pelo processo de composição serem subestimados em relação aos valores observados nos ensaios, com erros médios de 1,42 mca e 1,22 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente, para a associação em série e paralelo. Apesar das diferenças, foi observado, nas regressões lineares, valores de coeficientes de correlação próximos a unidade e pelo teste t de *Student*, verificou-se que a média da diferença entre os valores obtidos nos ensaios de laboratório e pelo processo de composição de curvas de bombas não foram significativamente diferentes de zero, com probabilidades de 68,8% (série) e 61,0% (paralelo).

**PALAVRAS-CHAVE:** curva característica, altura total de bombeamento, vazão

**Do PRADO, G.; da SILVA, T. B.**

### **EVALUATION OF TWO CENTRIFUGAL PUMPS ASSOCIATED IN SERIES AND PARALLEL**

### **2 ABSTRACT**

The characteristic curves of two centrifugal pumps working separately and associated in series and parallel were measured at Hydraulic and Irrigation Laboratory of the State University of Maringá at Cidade Gaúcha, State of Paraná, Brazil. For interpolation of data (total pump head versus flow rate) of the centrifugal pumps operating separately in the laboratory tests was adjusted the set of coefficients of the cubic spline interpolation. From the curves observed in the laboratory tests, the values of total pump head from association in series and of flow rate from association in parallel were related to the values of the curves determined through the process of characteristic curves composition from pumps operating separately. There was a tendency of curve values obtained by the process of composition being underestimated comparing to the curve values observed in laboratory tests. The average

errors were 1.42 mca and 1.22 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, respectively, for the association in series and parallel. Despite the differences between the curves, in the linear regressions, were observed correlation coefficients near unity and at Student's t test, it was found that the difference in mean values observed in the laboratory tests and for process of curve composition were not significantly different from zero, with probabilities of 68.8% (series) and 61.0% (parallel).

**KEYWORDS:** characteristic curve, total pump head, flow rate

### 3 INTRODUÇÃO

As bombas hidráulicas são máquinas de fluxo utilizadas para aumentar a energia total (geométrica, piezométrica e cinética) do fluido a partir da energia recebida de uma fonte externa, normalmente um motor elétrico ou de combustão interna.

A seleção de uma bomba centrífuga é realizada com base na curva característica que relaciona a vazão (Q) versus a altura total (H) de bombeamento. Os fabricantes de bombas, normalmente, desconsideram o valor da energia cinética e apresentam nos catálogos, a curva característica da bomba relacionando vazão versus altura manométrica de bombeamento. Conforme Schmidlin Júnior (2006), para facilitar a seleção da bomba, os fabricantes disponibilizam gráficos de cobertura hidráulica, que mostram toda a região de vazão versus altura manométrica de bombeamento compreendida por seus diferentes modelos de bombas e que podem ser disponibilizados para diferentes diâmetros de rotores.

As curvas características das bombas centrífugas são obtidas através de ensaios normatizados (NBR-6400, 1989) realizados em laboratórios pelos fabricantes. De acordo com Mesquita et al. (2006), nos modelos de simulação costuma-se ajustar a curva característica da bomba centrífuga por meio de um polinômio do segundo grau. Entretanto, para evitar a obtenção de valores errôneos de altura total de bombeamento, os polinômios quadráticos não devem ser utilizados para toda a faixa de funcionamento da curva característica constante do catálogo da bomba (Gaio, 2005). Andrade et al. (2001) citam que uma forma alternativa para descrever as curvas características (Q x H) de bombas é a utilização do polinômio interpolador spline cúbica.

Os sistemas de abastecimento urbanos e de irrigação, normalmente operam numa faixa ampla de vazões, devido a mudanças na demanda, variações no nível de reservatórios ou nas posições das laterais ou, simplesmente, devido a mudanças nas perdas de carga decorrentes da operação de válvulas ou do processo de envelhecimento das tubulações (Andrade et al., 2001; Thin et al., 2008). Nessas situações, a curva característica da bomba centrífuga operando separadamente pode não abranger toda a faixa de vazão e altura total de bombeamento exigida pelo sistema, sendo desejável a utilização de mais de uma bomba combinada em série ou em paralelo. Gaio (2005) também comenta que nem sempre é possível encontrar no mercado uma bomba que funcione no ponto de trabalho desejado e próximo ao ponto de máximo rendimento, no entanto, as associações de bombas podem levar a um melhor desempenho operacional do sistema.

Uma associação de bombas centrífugas operando em série é obtida conectando-se a tubulação de recalque da primeira bomba na sucção da segunda, de forma que para cada vazão, a altura total de bombeamento será a soma da altura de bombeamento de cada bomba operando separadamente (Denículi, 2005; Gaio, 2005; Azevedo Netto et al., 1998). Este tipo de associação é empregado quando se deseja uma curva característica para a associação muito

inclinada, de forma que, a vazão se mantenha praticamente constante, mesmo para mudanças bruscas na pressão (Andrade et al., 2001).

Na associação de bombas centrífugas operando em paralelo duas ou mais bombas, simultaneamente, promovem o recalque do fluido para uma única tubulação. A curva característica deste tipo de associação é obtida somando-se, para cada altura total de bombeamento, as vazões indicadas nas curvas características de cada bomba da associação (Denículi, 2005; Gaio, 2005; Azevedo Netto et al., 1998). Conforme Andrade et al. (2001), este tipo de associação é empregado sempre que se necessita uma curva característica da associação praticamente plana, de modo que, a pressão de bombeamento se mantenha praticamente constante com a variação da vazão.

O levantamento da curva característica de bombas operando em uma associação (série e paralelo) é essencial para uma adequada seleção e operação dos sistemas de bombeamento. Desta forma, a partir de duas bombas centrífugas, o presente trabalho teve como objetivos: I) levantar as curvas características das bombas centrífugas operando isoladamente; II) levantar as curvas características das bombas operando em associação (série e paralelo); III) comparar as curvas características levantadas para as bombas operando em associação (série e paralelo) com as curvas estimadas pelo processo de composição de curvas de bombas operando em associação (série e paralelo) descrito por Carvalho & Oliveira (2008), Denículi (2005), Gaio (2005), Andrade et al. (2001), Azevedo Netto et al. (1998) e Macintyre (1987).

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

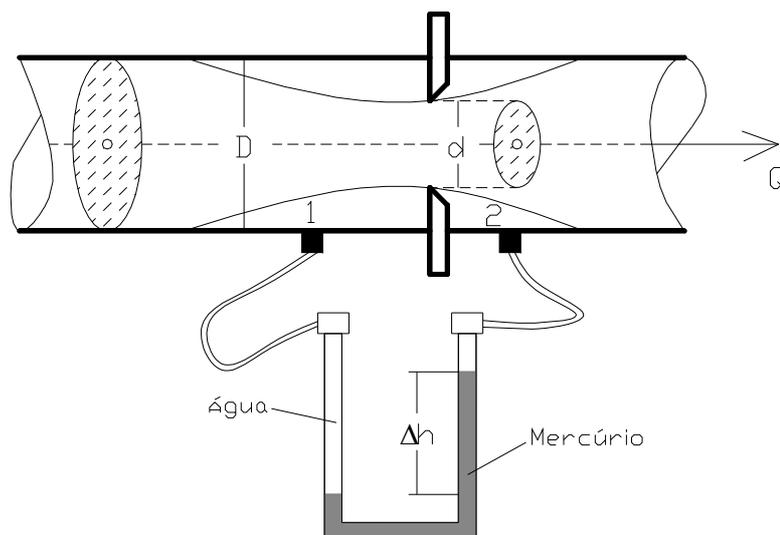
O trabalho foi conduzido na bancada de ensaios de bombas em série e paralelo do Laboratório de Hidráulica e Irrigação do curso de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Maringá situado em Cidade Gaúcha no estado do Paraná. Conforme a Figura 1, a bancada de teste é constituída de: I) reservatório de água de 1000 L; II) dois conjuntos motobombas centrífugas da marca Schneider, modelo BC91-S; III) tubulação de sucção e recalque; IV) vacuômetro; V) tomadas de pressão para acoplamento de manômetro; VI) registros de gaveta; VII) registros de esfera; VIII) medidor de vazão tipo placa de orifício e; IX) manômetro diferencial. As bombas centrífugas utilizadas são idênticas, com rotor fechado de 111 mm de diâmetro e operam com rotação de 3.500 rpm, porém, os motores elétricos apresentam potências nominais distintas, um de 0,368 kW e outro de 0,735 kW.



**Figura 1.** Bancada de ensaios de bombas centrífugas do Laboratório de Hidráulica e Irrigação da UEM/CAR, em Cidade Gaúcha/PR.

O medidor de vazão utilizado nos ensaios das bombas é do tipo placa de orifício. Esta placa de orifício (Figura 2), construída em termoplástico (Technyl®), foi montada transversalmente ao sentido de fluxo da tubulação de 43,00 mm de diâmetro interno (D), cujo orifício apresenta um diâmetro de 21,62 mm (d).

Para determinar a deflexão manométrica causada pela placa de orifício, foi instalada uma tomada de pressão a montante e a jusante à placa, distanciadas desta, respectivamente, de um diâmetro (43,0 mm) e de meio diâmetro (21,5 mm) interno do tubo, as quais foram conectadas a um manômetro diferencial através de uma mangueira de 8 mm de diâmetro.



**Figura 2.** Esquema do medidor de vazão tipo da placa de orifício.

A vazão da placa de orifício, determinada a partir da deflexão manométrica acusada no manômetro diferencial, foi calibrada pelo método de pesagem (NBR-6400, 1989). A partir da calibração da placa de orifício foi ajustada uma equação potencial para determinação da vazão em função da deflexão manométrica, dada por:

$$Q = 0,432 \cdot \Delta h^{0,5147} \quad r^2 = 0,9983 \quad (1)$$

em que: Q é a vazão ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) e  $\Delta h$  a deflexão manométrica (mmHg).

A energia na forma de pressão e velocidade por unidade de peso que o fluido recebe ao passar pela bomba representa a altura total de bombeamento (H). Este valor pode ser obtido aplicando-se a equação de conservação de energia de Bernoulli entre a tubulação de sucção e de recalque próximos à entrada e a saída da bomba. Desta forma, a altura total de bombeamento é expressa por:

$$H = \frac{p_m - p_v}{\gamma} + \frac{V_r^2 - V_s^2}{2 \cdot g} \quad (2)$$

sendo:  $V_r = \frac{4 \cdot Q}{3600 \cdot \pi \cdot D_r^2}$  e  $V_s = \frac{4 \cdot Q}{3600 \cdot \pi \cdot D_s^2}$

em que: H é a altura total de bombeamento (mca;  $\text{J N}^{-1}$ );  $p_m$  a pressão no manômetro (mca);  $p_v$  a pressão no vacuômetro (mca);  $\gamma$  o peso específico da água ( $1.000 \text{ kgf m}^{-3}$ );  $V_r$  a

velocidade de recalque ( $m s^{-1}$ );  $V_s$  a velocidade de sucção ( $m s^{-1}$ );  $D_r$  o diâmetro da tubulação de recalque (m) e;  $D_s$  o diâmetro da tubulação de sucção (m).

Na determinação da altura total de bombeamento (H), a pressão de entrada na bomba foi determinada com o vacuômetro instalado na tubulação de sucção de 34,95 mm de diâmetro e a pressão na saída da bomba foi medida com o manômetro instalado na tubulação de recalque de 27,80 mm de diâmetro.

Considerando que a curva característica relaciona a vazão (Q) versus a altura total de bombeamento (H), para cada bomba centrífuga, os valores dos pares Q x H foram obtidos com o auxílio de um registro de gaveta. As vazões foram determinadas através da equação 1 e, os respectivos valores de altura total de bombeamento foram determinados através da equação 2.

Para determinação dos valores de altura total de bombeamento, em função da vazão das bombas centrífugas operando separadamente, foi utilizado o interpolador spline cúbico, dado por:

$$H_j(Q) = a_j + b_j \cdot (Q - Q_j) + c_j \cdot (Q - Q_j)^2 + d_j \cdot (Q - Q_j)^3 \quad (3)$$

sendo  $j = 0, 1, \dots, n - 1$

em que,  $n$  é o número de pares de valores da vazão versus a altura total de bombeamento, sendo  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  e  $d_j$  coeficientes de ajuste, identificados pelo índice  $j$ , do interpolador spline cúbico.

De acordo o algoritmo descrito por Burden & Faires (2003), os coeficientes de ajuste ( $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  e  $d_j$ ) do interpolador spline cúbico foram obtidos por:

ENTRADA:  $n$ ;  $Q_0, Q_1, \dots, Q_n$ ;  $H(Q)_0, H(Q)_1, \dots, H(Q)_n$ ;

Passo 1: Para  $i = 0, 1, \dots, n - 1$

$$\text{faça: } h_i = Q_{i+1} - Q_i$$

Passo 2: Para  $i = 0, 1, \dots, n - 1$

$$\text{faça: } \alpha_i = \frac{3}{h_i} \cdot (a_{i+1} - a_i) - \frac{3}{h_{i-1}} \cdot (a_i - a_{i-1})$$

Passo 3: Faça:  $l_0 = 1$ ;  $\mu_0 = 1$ ;  $z_0 = 1$

Passo 4: Para  $i = 1, 2, \dots, n - 1$

$$l_i = 2 \cdot (Q_{i+1} - Q_{i-1}) - h_{i-1} \cdot \mu_{i-1};$$

$$\text{faça: } \mu_i = \frac{h_i}{l_i};$$

$$z_i = \frac{(\alpha_i - h_{i-1} \cdot z_{i-1})}{l_i}$$

Passo 5: Faça:  $l_n = 1$ ;  $c_n = 0$ ;  $z_n = 0$

Passo 6: Para  $j = n - 1, n - 2, \dots, 0$

$$c_j = z_j - \mu_{i-1} \cdot c_{j+1};$$

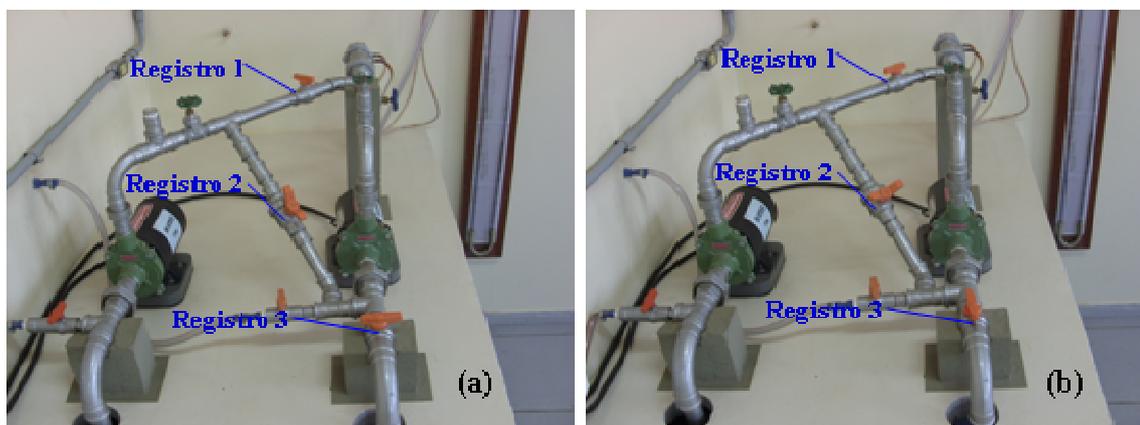
$$\text{faça: } b_j = \frac{(a_{j+1} - a_j)}{h_j} - h_j \cdot \frac{(c_{j+1} + 2 \cdot c_j)}{3};$$

$$d_j = \frac{(c_{j+1} - c_j)}{3 \cdot h_j}$$

SAÍDA:  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  e  $d_j$ , para  $j = 0, 1, \dots, n - 1$

Os coeficientes de ajuste ( $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  e  $d_j$ ) do interpolador spline cúbico da altura total de bombeamento, em função da vazão da bomba, foram determinados através da planilha eletrônica *Excel*.

Para os ensaios das bombas centrífugas operando em associação (série e paralelo), os registros de esfera, mostrados na Figura 3, foram manobrados da seguinte forma: I) associação em série (Figura 3a): registros 1 e 3 fechados e registro 2 aberto; II) associação em paralelo (Figura 3b): registros 1 e 3 abertos e registro 2 fechado.



**Figura 3.** Bancada de bombas centrífugas operando em associação em série (a) e em paralelo (b).

O procedimento de ensaio para determinação das curvas características das bombas centrífugas operando em associação (série e paralelo) foi similar ao utilizado no ensaio das bombas centrífugas operando separadamente. Desta forma, a partir da abertura dos registros de gaveta, localizados no recalque das bombas centrífugas, foram determinados os valores de vazão com auxílio da placa de orifício, enquanto os valores de altura total de bombeamento foram obtidos pela aplicação da equação 2.

As curvas características das bombas associadas (série e paralelo), obtidas em laboratório, foram confrontada com as curvas características determinadas pelo processo de composição de curvas descrito por Carvalho & Oliveira (2008), Deniculi (2005), Gaio (2005), Andrade et al. (2001), Azevedo Netto et al. (1998) e Macintyre (1987).

Para a composição da curva característica das bombas centrífugas operando em série foram somados, para um mesmo valor de vazão observado no ensaio das bombas operando em série, com auxílio do interpolador spline cúbico (equação 3), os valores de altura total de bombeamento. Na composição da curva característica das bombas centrífugas operando em paralelo foram somados, para um mesmo valor de altura total de bombeamento observado no ensaio das bombas operando em paralelo, os valores de vazão.

De modo a verificar a aderência entre as curvas características; na associação em série, os valores de altura total de bombeamento das curvas determinadas pelo processo de composição foram relacionados, através de uma regressão linear, aos valores de altura total de bombeamento das curvas obtidas nos ensaios, já para a associação em paralelo, os valores relacionados entre as curvas foram os valores de vazão. Para essa análise foram aplicadas as seguintes estatísticas: I) erro médio (EM), dado pela equação 4; II) coeficiente de correlação ( $r$ ) e; III) valor da probabilidade (P - value) pelo teste t de *Student* sob a hipótese da diferença média entre os valores ser igual a zero.

$$EM = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right] \quad (4)$$

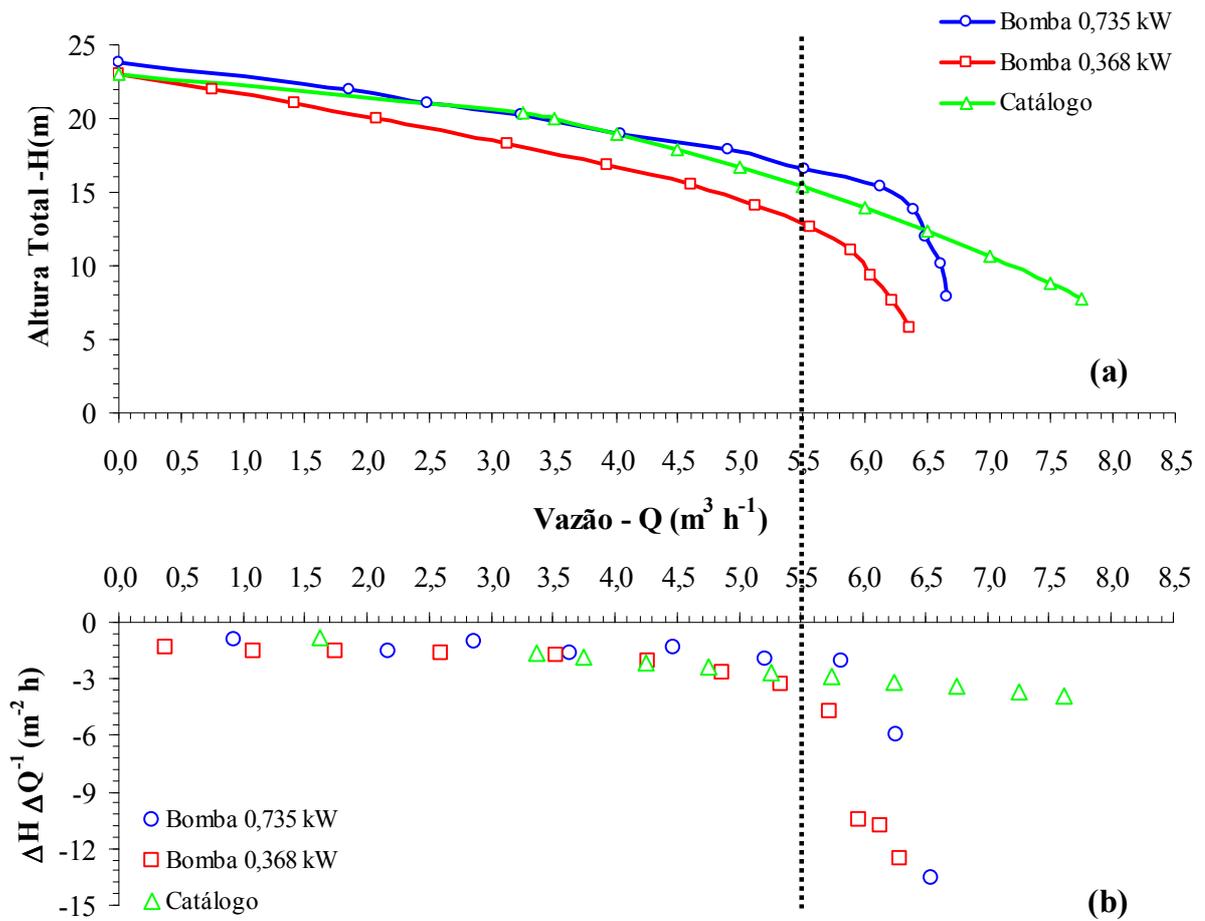
em que: EM é o erro médio entre os valores estimados ( $P_i$ ) e observados ( $O_i$ ) de altura total de bombeamento (mca) para a associação em série ou de vazão ( $m^3 h^{-1}$ ) para a associação em paralelo e; N o número de pares de valores.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4a são apresentadas as curvas características das bombas, obtidas no catálogo do fabricante e nos ensaios de laboratório dos conjuntos motobomba com potências nominais de 0,368 e 0,735 kW, operando separadamente. A curva da bomba operando com o motor elétrico de 0,368 kW apresentou valores de altura total de bombeamento inferiores aos valores obtidos com motor elétrico de 0,735 kW. Os valores de altura total de bombeamento, obtidos em laboratório com a bomba centrífuga operando com motor elétrico de 0,735 kW, até a vazão de  $5,5 m^3 h^{-1}$  (linha pontilhada), ficaram muito próximos da curva do catálogo fornecida pelo fabricante. Schmidlin Júnior (2006) ensaiando uma bomba centrífuga, também observou discrepâncias entre os valores da curva de bomba obtida nos ensaios de laboratório e os valores fornecidos no catálogo do fabricante.

As taxas de variação ( $\Delta H \Delta Q^{-1}$ ) da altura total de bombeamento em função da vazão das curvas características, obtidos em catálogo e nos ensaios de laboratório dos conjuntos motobomba com potências nominais de 0,368 e 0,735 kW, são mostradas na Figura 4b. Observa-se nesta figura que até a vazão de  $5,5 m^3 h^{-1}$  (linha pontilhada), a taxa de variação, para as três curvas características, apresenta um decréscimo linear justificando até este ponto o ajuste de polinômio quadrático para interpolação dos valores de altura total de bombeamento. Conforme Gaio (2005), a utilização de polinômios quadráticos para representar toda a faixa de funcionamento da bomba centrífuga pode gerar erros na obtenção dos valores de altura total de bombeamento.

O uso de polinômio de segundo grau para representar as curvas características para toda faixa de utilização das bombas centrífugas não representaria de maneira satisfatória os valores de altura total de bombeamento, em função da vazão, obtidos nos ensaios de laboratório. Desta forma, o uso do interpolador spline cúbico, coeficientes apresentados nas Tabelas 1 e 2, para obtenção de valores intermediários de altura total de bombeamento em função da vazão, levam a valores intermediários mais precisos (Andrade et al., 2001).



**Figura 4.** Curvas características da altura total de bombeamento versus vazão obtidas em catálogo e nos ensaios dos conjuntos motobombas de 0,735 e 0,368 kW (a) e variação da altura total de bombeamento em relação a variação de vazão das curvas da bomba obtidas em catálogo e nos ensaios (b).

**Tabela 1.** Coeficientes do interpolador spline cúbico da curva característica da bomba centrífuga operando com motor elétrico de 0,735 kW.

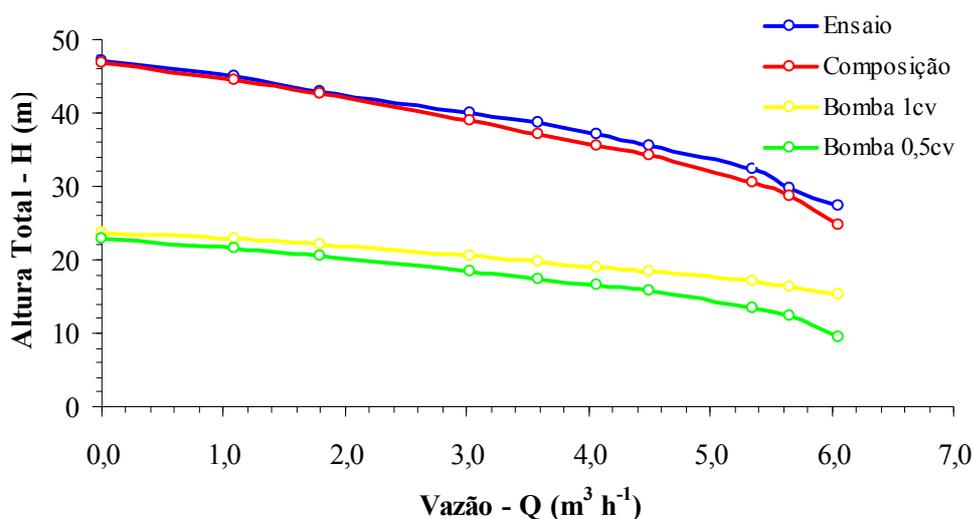
j	$Q_j$ (m³ h⁻¹)	$Q$ (m³ h⁻¹)	a	b	c	d
1	$Q_{j=1} = 0,00$	$0,00 \leq Q < 1,86$	23,800	-0,660	0,000	-0,086
2	$Q_{j=2} = 1,86$	$1,86 \leq Q < 2,49$	22,022	-1,553	-0,481	0,749
3	$Q_{j=3} = 2,49$	$2,49 \leq Q < 3,24$	21,040	-1,266	0,936	-0,826
4	$Q_{j=4} = 3,24$	$3,24 \leq Q < 4,04$	20,271	-1,251	-0,917	0,611
5	$Q_{j=5} = 4,04$	$4,04 \leq Q < 4,90$	18,989	-1,538	0,561	-0,358
6	$Q_{j=6} = 4,90$	$4,90 \leq Q < 5,52$	17,854	-1,367	-0,362	-0,983
7	$Q_{j=7} = 5,52$	$5,52 \leq Q < 6,13$	16,643	-2,934	-2,180	5,953
8	$Q_{j=8} = 6,13$	$6,13 \leq Q < 6,40$	15,396	1,094	8,757	-130,903
9	$Q_{j=9} = 6,40$	$6,40 \leq Q < 6,48$	13,798	-22,420	-96,493	1292,892
10	$Q_{j=10} = 6,48$	$6,48 \leq Q < 6,62$	11,968	-9,846	241,002	-1955,517
11	$Q_{j=11} = 6,62$	$6,62 \leq Q < 6,66$	10,116	-53,893	-562,575	5543,414

Para a composição das curvas características das bombas operando em série (Figura 6) e paralelo (Figura 7), conforme as recomendações de Andrade et al. (2001), foram utilizados os coeficientes do interpolador spline cúbico das bombas centrífugas com potência nominal de 0,368 kW (Tabela 1) e 0,735 kW (Tabela 2) operando separadamente.

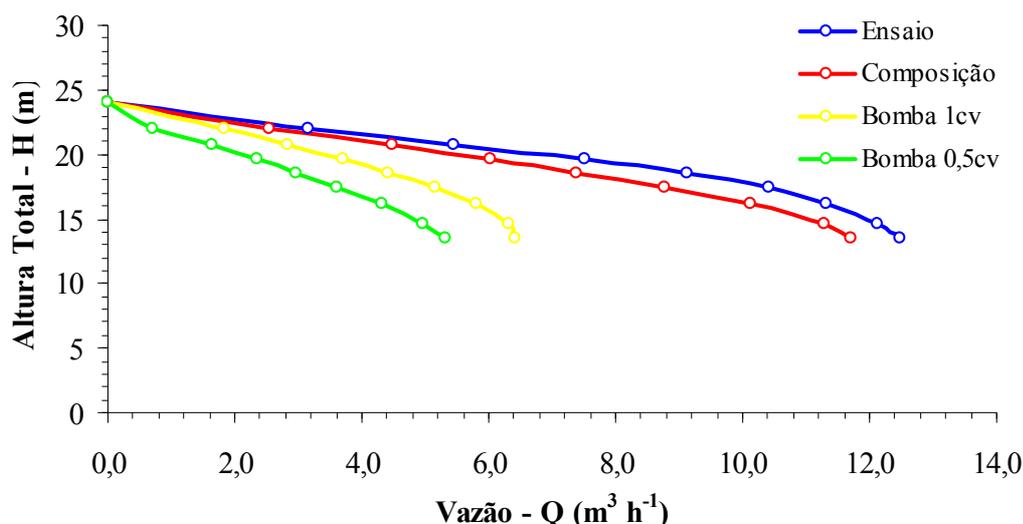
Na Figura 6 é apresentada a curva característica das bombas centrífugas operando em uma associação em série obtidas em laboratório e pelo processo de composição descrito por Carvalho & Oliveira (2008) e Denículi (2005). Nesta figura é possível observar que para valores de vazão acima de  $3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , as alturas total de bombeamento dos pontos ensaiados apresentaram valores um pouco acima dos valores obtidos pelo processo de composição das curvas características das bombas operando separadamente. Também na associação em paralelo (Figura 7), os valores obtidos nos ensaios de laboratório mostraram-se superiores em relação aos valores obtidos pelo processo de composição das curvas características das bombas operando separadamente, para a mesma altura total de bombeamento, as maiores diferenças foram observadas nas vazões variando de  $6,0$  a  $11,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

**Tabela 2.** Coeficientes do interpolador spline cúbico da curva característica da bomba centrífuga operando com motor elétrico de 0,368 kW.

j	$Q_j (\text{m}^3 \text{ h}^{-1})$	$Q (\text{m}^3 \text{ h}^{-1})$	a	b	c	d
1	$Q_{j=1} = 0,00$	$0,00 \leq Q < 0,76$	23,00	-1,246	0,000	-0,111
2	$Q_{j=2} = 0,76$	$0,76 \leq Q < 1,41$	22,00	-1,438	-0,252	0,199
3	$Q_{j=3} = 1,41$	$1,41 \leq Q < 2,07$	21,01	-1,513	0,137	-0,176
4	$Q_{j=4} = 2,07$	$2,07 \leq Q < 3,13$	20,03	-1,561	-0,210	0,091
5	$Q_{j=5} = 3,13$	$3,13 \leq Q < 3,93$	18,24	-1,698	0,081	-0,123
6	$Q_{j=6} = 3,93$	$3,93 \leq Q < 4,60$	16,87	-1,803	-0,213	-0,158
7	$Q_{j=7} = 4,60$	$4,60 \leq Q < 5,12$	15,53	-2,299	-0,529	-0,463
8	$Q_{j=8} = 5,12$	$5,12 \leq Q < 5,56$	14,12	-3,230	-1,254	2,324
9	$Q_{j=9} = 5,56$	$5,56 \leq Q < 5,89$	12,66	-2,998	1,787	-20,966
10	$Q_{j=10} = 5,89$	$5,89 \leq Q < 6,06$	11,11	-8,696	-19,017	49,962
11	$Q_{j=11} = 6,06$	$6,06 \leq Q < 6,22$	9,35	-10,853	6,193	-33,991
12	$Q_{j=12} = 6,22$	$6,22 \leq Q < 6,36$	7,58	-11,563	-10,521	24,636

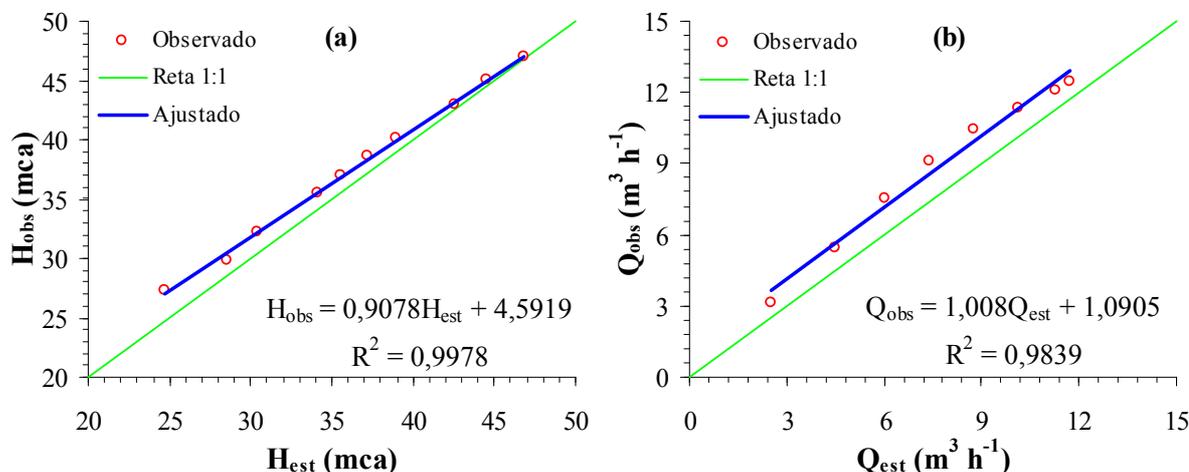


**Figura 6.** Curvas características da altura total de elevação versus vazão para os conjuntos motobombas associados em série.



**Figura 7.** Curvas características da altura total de elevação versus vazão para os conjuntos motobombas associados em paralelo.

Na Figura 8 é apresentada a relação entre os valores de altura total de bombeamento (Figura 8a) e vazão (Figura 8b) das curvas das bombas, respectivamente, operando em série e paralelo, obtidas pelo processo de composição e ensaios de laboratório. Nas equações de reta ajustadas e mostradas na Figura 8, observaram-se coeficientes de determinação próximos a unidade. De acordo com Fernandes et al. (2011), a correlação (Tabela 3) entre os dados das curvas obtidas pelo processo de composição e nos ensaios de laboratório é classificada como quase perfeita ( $0,9 \leq r \leq 1,0$ ).



**Figura 8.** Relação entre valores de altura total de bombeamento (a) e vazão (b) observados para as curvas características obtidas pelo processo de composição e ensaiadas com as bombas operando em associação série e paralelo.

Conforme apresentado na Figura 8, a tendência dos valores obtidos pelo processo de composição é de serem subestimados em relação aos valores observados nos ensaios de laboratório, com erros médios (Tabela 3) de 1,42 mca e 1,22 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente, para a associação em série e paralelo. Apesar das diferenças entre os dados das curvas, pelo teste de *t* de Student, verificou-se que a média da diferença entre os valores obtidos nos ensaios de

laboratório e pelo processo de composição de curvas de bombas não são significativamente diferentes de zero, existindo uma probabilidade (Tabela 3) dos valores das curvas, apresentadas nas Figuras 6 e 7, serem iguais.

**Tabela 3.** Erro do médio (EM), coeficientes de correlação (r) e probabilidades (P - value) do teste t de *Student* das curvas características das bombas centrífugas operando em associação (série e paralelo).

Parâmetro	Série	Paralelo
EM*	1,420	1,220
r	0,998	0,992
P(t)	0,688	0,610

\* EM expresso em mca na associação em série e em  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  na associação em paralelo.

## 6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que: I) o uso do interpolador spline cúbico, para representar toda a extensão da curva característica dos conjuntos motobombas, leva a dados intermediários mais precisos do que polinômios quadráticos; II) o processo de composição de curvas de bombas operando separadamente pode ser utilizado para determinar a curva característica de bombas centrífugas operando em associação série e paralelo.

## 7 REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. L. T.; ALLEN, R. G.; WELLS, R. D. PUMPCOM - Um modelo para combinação de curvas e análise do desempenho de bombas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 403-410, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR -6400**. Bombas hidráulicas de fluxo (classe C) – ensaios de desempenho e cavitação. Rio de Janeiro. 1989. 26 p.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Manual de hidráulica Azevedo Netto**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 670 p.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Análise numérica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 740 p.

CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA, L.C. **Instalações de bombeamento para irrigação**. Lavras: Editora UFLA. 2008. 354 p.

DENICULI, W. **Bombas Hidráulicas**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV. 2005. 152 p.

FERNANDES, A. L. T. et al. Avaliação do método de Penman-Piche para estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 270-276, 2011.

GAIO, M. M.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás. 2005. 272 p.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois. 1987. 782 p.

MESQUITA, A. L. A. et al. Aspectos importantes na utilização de bombas centrífugas em velocidade variável para a redução do consumo de energia. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 6., 2006, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: UFPB, 2006.

SCHMIDLIM JÚNIOR, C. R. **Operação do conjunto motobomba centrífuga, motor de indução trifásico e conversor de frequência visando a eficiência no uso da energia elétrica**. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

THIN, K. C.; KHAING, M. M.; AYE, K. M. Design and performance analysis of centrifugal pump. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, New Mexico, v. 46, p. 422-429, 2008.