

RENDIMENTO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA ACIONADA EM DIFERENTES ROTAÇÕES

Douglas da Silveira de Lima^{1}; Marcelo Giulian Marques²; Eduardo Pedro Eidt³; Luiz Augusto Magalhães Endres⁴; Joice Cristini Kuritza⁵; Elisa Alberton Machado⁶; Rafael Guerra Ortiz⁷; Jessica Borges Posterari⁸; Marcelo Travassos de Mattos⁹*

Resumo – Na operação de adutoras, devido à demanda variável de vazão, a rotação dos motores pode ser ajustada de acordo com a necessidade de bombeamento momentâneo com o uso de conversores de frequência. A busca pela otimização da operação objetiva um incremento no rendimento dos sistemas (o que ocasiona menos gastos energéticos) e o conjunto pode ser operado de maneira mais proveitosa. As características de funcionamento das bombas centrífugas estão relacionadas por leis de semelhança, que permitem, conhecido um ponto de funcionamento em determinada rotação, estimar o funcionamento da máquina em outras condições. Utilizando essas leis e conhecendo a curva da máquina, fornecida pelo fabricante, pode-se calcular rapidamente curvas características para outras rotações ou diâmetros de rotor. Caracterizar o quanto os resultados obtidos pelas leis da semelhança se aproximam dos dados práticos é importante não só para melhorar os índices de eficiência, mas, também, para subsidiar os casos de projeto em que somente as curvas fornecidas pelo fabricante estiverem disponíveis, o que normalmente ocorre.

Palavras-Chave – Operação de adutoras, curvas características de bombas, leis de semelhança.

ANALYSIS OF PERFORMANCE OF A CENTRIFUGAL PUMP DRIVEN AT DIFFERENT SPEEDS

Abstract – In operation pipelines due to varying flow demand, the engine speed can be adjusted according to the momentary need for pumping through the use of frequency converters. The search for operation optimization objective an increase in the income of systems (which causes less energy expenditure) and the set can be operated more profitably. The operating characteristics of the centrifugal pump are related by the laws of similarity, which allow a known operating point at a certain rotation estimate the machine is operating at other conditions. Using these laws the curve and knowing the machine, supplied by the manufacturer can quickly compute curves or turns to other rotor diameters. Characterize how the results obtained by the laws of the similarity approach the practical data is important not only to improve efficiency ratios, but also to subsidize the project cases in which only the curves provided by the manufacturer are available, which usually occurs.

Keywords - operation of pipelines, pump characteristics curves, laws of similarity.

¹ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: douglasdasilveiradelima@gmail.com.

* Autor Correspondente.

² IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: mmarques@iph.ufrgs.br.

³ ULBRA, Canoas-RS, Brasil; e-mail: eduardopedroeidt@gmail.com.

⁴ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: endres@ufrgs.br.

⁵ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: joicekuritza@yahoo.com.br.

⁶ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: elisaalbertonmachado@gmail.com.

⁷ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: ortizgrafael@gmail.com.

⁸ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: jessicaposterari@gmail.com.

⁹ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: mtm5587@gmail.com.

INTRODUÇÃO – Este trabalho apresenta parte do desenvolvimento de projeto de pesquisa, que analisa o comportamento de uma bomba centrífuga, acionada em diferentes rotações, o que é fundamental para definir a regra de controle de operação em um sistema real. Através das leis de semelhança, em função dos dados fornecidos pelo fabricante, é possível prever características de funcionamento do equipamento em diferentes rotações supondo rendimento constante. Porém sabe-se, pela teoria de máquinas de fluxo, MACINTYRE (1997), que a variação da velocidade tangencial influencia o rendimento do conjunto. Quantificar as variações de rendimento experimental para pontos de operação semelhantes, isolinhas, é o principal objetivo deste trabalho. Outro aspecto interessante é comparar os rendimentos para diferentes rotações e para diferentes diâmetros de rotor, em pontos de operação calculados pela lei da semelhança. Os dados de rendimento da bomba variando rotação foram obtidos de forma experimental, enquanto que os rendimentos da bomba com variação de diâmetro de rotor foram informados pelo fabricante. Pretende-se, desta forma, quantificar as diferenças de rendimento entre os dois métodos de variação do ponto de operação para comprovar que é mais eficiente utilizar a variação de rotação do que a usinagem de rotor, principalmente quando as variações de operação são maiores do que 20%.

MÉTODO – A aquisição de dados foi feita com a utilização da bancada de ensaios do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), mostrada na figura 1.



Figura 1: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - LENHS/UFRGS

Os ensaios foram realizados com uma bomba marca KSB modelo Meganorm 40-200 em oito frequências de abastecimento da rede elétrica diferentes (60Hz, 57Hz, 54Hz, 51Hz, 48Hz, 45Hz, 42Hz, 39Hz) controladas por meio de um conversor de frequências, marca Vacon modelo RS-485 . As rotações equivalentes, obtidas para cada frequência, são apresentadas na tabela 1.

Por tratar-se de um motor assíncrono há um escorregamento. No entanto, o mesmo foi desprezado já que apresentou valores baixos, próximos a 2%, fazendo-se então uma média das rotações de cada frequência. Para cada frequência, foram ensaiados entre 8 e 10 pontos de trabalho.

Tabela 1: Rotações equivalentes

Frequência (Hz)	Rotação Equivalente (rpm)	Frequência (Hz)	Rotação Equivalente (rpm)
60(100%)	1762	48(80%)	1421
57(95%)	1681	45(75%)	1333
54(90%)	1596	42(70%)	1246
51(85%)	1509	39(65%)	1156

Na figura 2 é apresentada uma visão geral esquemática das instalações do laboratório, com controle de forma remota dos equipamentos por meio de *software* supervisor e, em destaque, os equipamentos e circuito utilizados na fase da pesquisa e relatados neste trabalho.

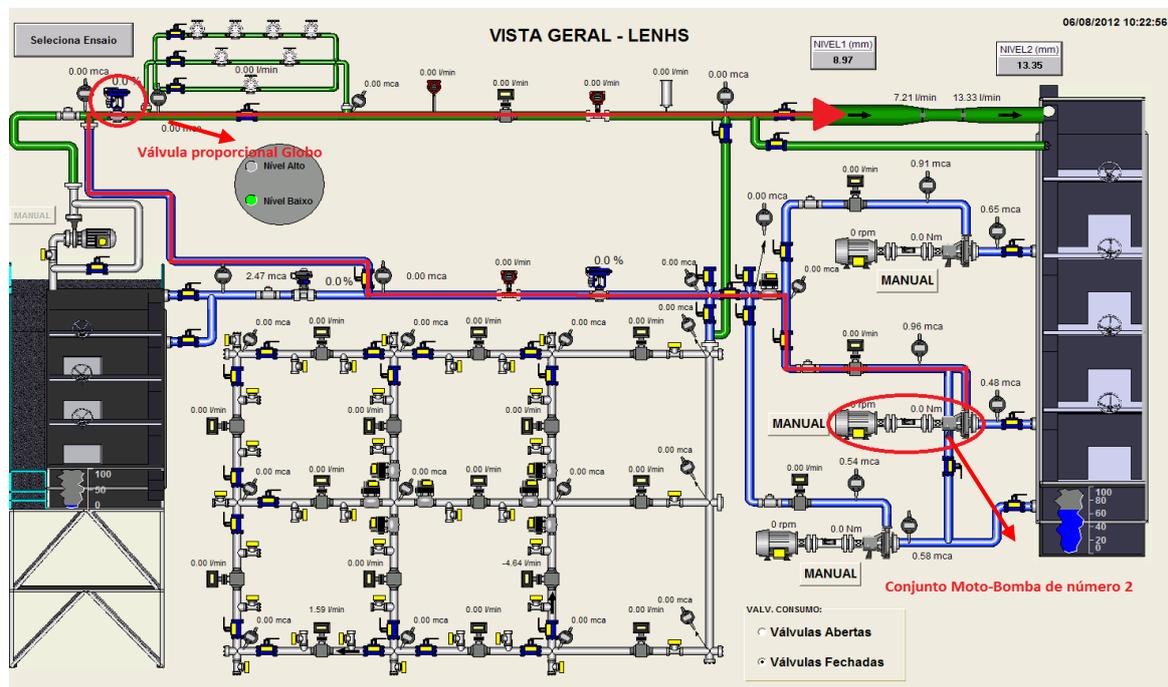


Figura 2: Circuito utilizado, visão do supervisor LENHS.

Para medir as grandezas necessárias foram utilizados medidores de vazão volumétrica, torque sobre o eixo da bomba, rotação do conjunto, pressão de sucção e recalque, todos próprios da planta do LENHS. Os dados foram coletados através do *software* supervisor, através do qual, também, foi possível controlar todas as condições de ensaio. Dados instantâneos de cada medidor são enviados ao supervisor a cada dois segundos. Identificação e erro esperado de cada equipamento são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Equipamentos utilizados na pesquisa

Grandeza	Marca/modelo	Erro Máximo em relação ao fundo de escala
Vazão	Sitrans FM Magflo 5100W	0,25%
Rotação	Balluff BES516	0,05%
Torque	HBM T22	0,3%
Pressão	Sitrans P DSIII	0,12 mca

Cálculo das Grandezas utilizadas: a seguir são apresentadas as equações utilizadas para cálculo da altura manométrica, potência e rendimento das máquinas.

Altura Manométrica (H_b): Para cálculo da altura manométrica foi utilizada a equação 1.

$$H_b = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + z \quad (1)$$

Onde:

p_1 e p_2 : pressão na sucção e descarga da bomba, respectivamente, em Pa;

v_1 e v_2 : velocidades na sucção e descarga da bomba, respectivamente, em m/s;

z : diferença de cota entre os transdutores de pressão na sucção e descarga da bomba, em m;

γ : peso específico da água (9800 N/m³)

g : aceleração da gravidade (9,8 m/s²)

Potência Mecânica (P): Para cálculo da potência mecânica foi utilizada a equação 2.

$$P = T \times n \quad (2)$$

Onde:

T: torque, em N.m;

n: rotação, em rad/s;

Rendimento da Bomba (η): Para calcular o rendimento global da bomba, utilizaram-se os dados das seguintes grandezas segundo equação 3.

$$\eta = \frac{Q \times \gamma \times H_b}{T \times n} \quad (3)$$

Onde:

H_b : altura manométrica, em m;

T: torque, em N.m;

n: rotação, em rad/s;

Q: Vazão, m³/s;

Leis de Semelhança: As leis de semelhança de bombas podem ser utilizadas para prever suas características de funcionamento, fora das condições nominais normalmente fornecidas pelos fabricantes, tanto para variações de rotação como de diâmetro de rotor. Considerando o diâmetro do rotor constante e variando a rotação da bomba de n_1 para n_2 os novos valores obtidos para vazão, altura manométrica e potência mecânica são definidos de acordo com as equações apresentadas na tabela 3.

Tabela 3: Leis de Semelhança

Vazão (Q)	Altura Manométrica (H_b)	Potência Mecânica (P)
$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$	$\frac{H_{b1}}{H_{b2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$	$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$

RESULTADOS – São apresentados, a seguir, os resultados obtidos na fase experimental do projeto de pesquisa no qual este trabalho está inserido.

Isolinhas de Rendimento - A partir das leis de semelhança, foram calculados pontos de trabalho para rotações diferentes. Tendo como base o rendimento obtido para frequência de 60 Hz experimental, aproximadamente 1762 rpm, sabendo que nessa rotação os dados se aproximaram satisfatoriamente do rendimento informado pelo fabricante.

Na figura 3, podemos comprovar que as isolinhas, construídas utilizando as leis de semelhança, são uma boa aproximação para estipular pontos de funcionamento para demais

rotações. Na curva de 1762 rpm estão os rendimentos obtidos para frequência 60 Hz, sendo este o ponto de partida por ser a maior rotação alcançada. As isolinhas estão representadas pelas linhas pretas e seu valor escrito acima da curva de 1762 rpm e circulado em azul. Nos nós, interseção das linhas pretas (isolinhas de rendimento) com as curvas estão os rendimentos reais obtidos através dos ensaios. Pode ser visto, por exemplo, que na isolinha de rendimento 58,5 % há uma variação máxima absoluta de 3,5% de rendimento em relação ao experimental obtido.

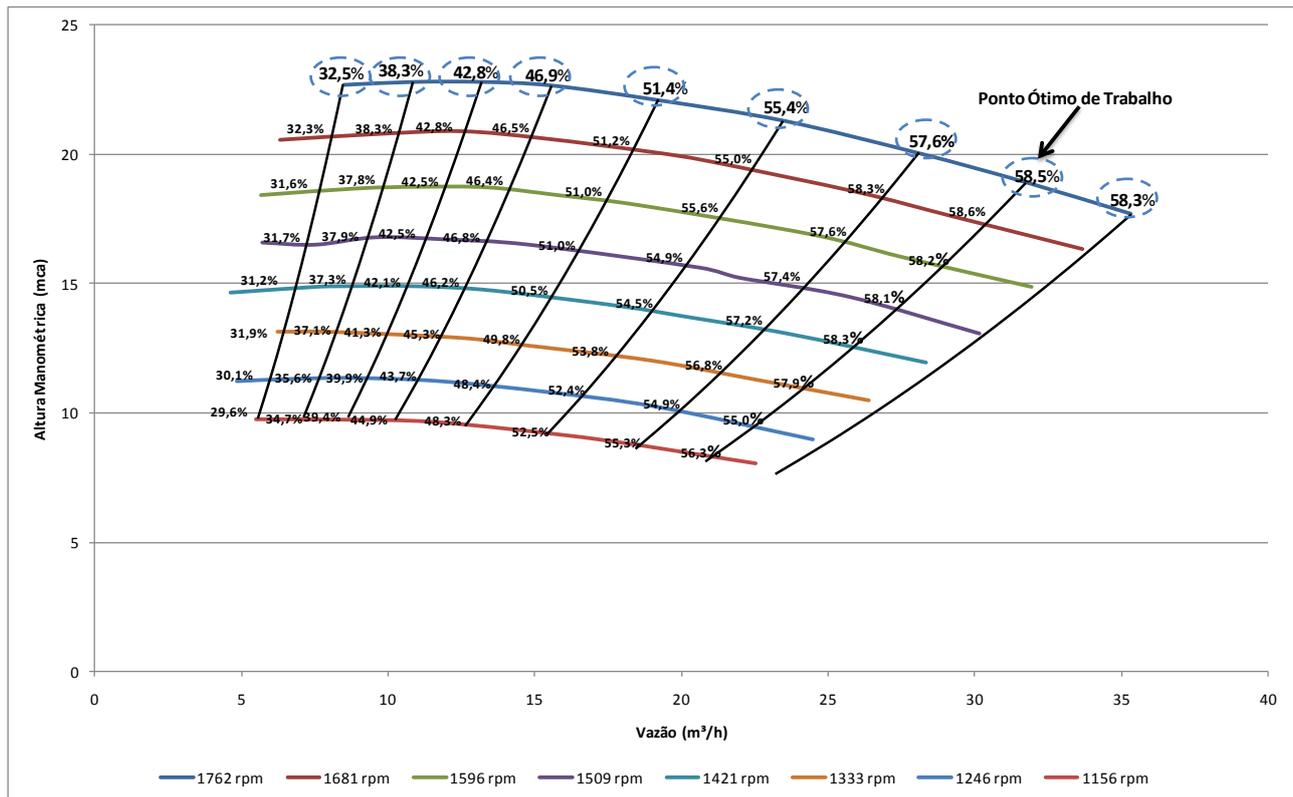


Figura 3: Isolinhas de rendimento, nos nós rendimento real obtido.

Curvas de rendimento fornecidas pelo fabricante - Na figura 4 estão apresentadas as curvas de rendimento do fabricante para diâmetros de rotor. Com isso foi possível analisar até que ponto a combinação de variação da velocidade tangencial, efeitos de choque e recirculação causada pela usinagem do rotor afetam o rendimento da bomba.

Com base nessa informação e considerando os mesmos pontos de vazão e altura manométrica utilizados nos ensaios práticos, alterando a rotação, podemos comparar a diferença de rendimento, neste caso, mantendo a rotação fixa e variando o diâmetro do rotor, em determinado ponto da curva.

O fabricante fornece essas curvas para que, havendo necessidade de operação da bomba em um ponto de funcionamento específico, seja possível calcular o diâmetro de rotor correspondente a tal ponto, sem a necessidade de mudança na rotação.

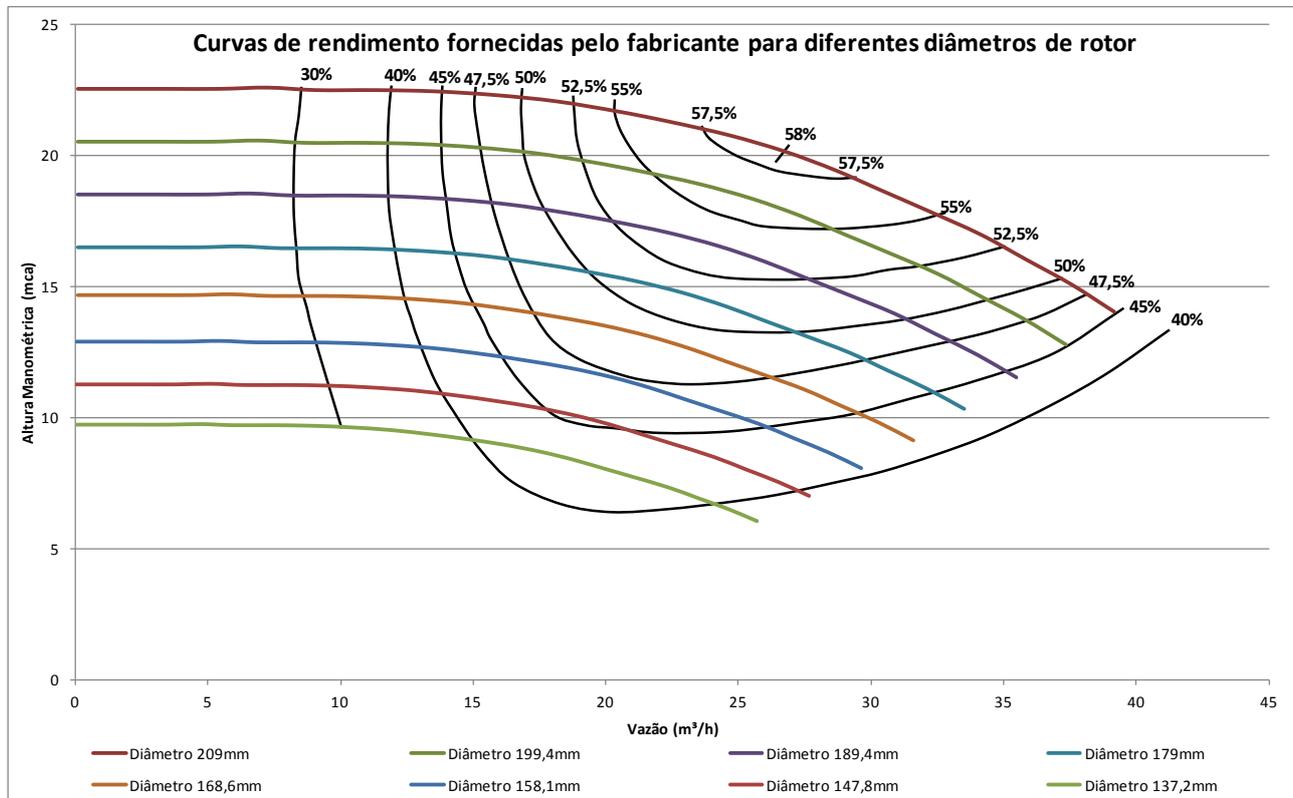


Figura 4: Curvas de rendimentos fornecidas pelo fabricante para diferentes diâmetros.

Comparação de Rendimentos das Isolinhas - Os rendimentos calculados pelas linhas e os rendimentos experimentais se aproximaram bastante. Nota-se que a discrepância tende a aumentar a medida que nos afastamos do ponto usado como base.

A diferença absoluta máxima encontrada foi de 3,51% e média de 3,06%, as maiores diferenças acontecem nos pontos de maior e menor vazão, como mostrado na tabela 4.

Tabela 4: Diferenças encontradas para variação de rotação

Rotação (rpm)	Diferença Máxima (%)	Diferença Média (%)
1762 rpm	Base do Cálculo	0,00%
1596 rpm	0,91%	0,38%
1421 rpm	1,31%	0,77%
1246 rpm	3,51%	3,06%

Comparação de Rendimento da Usinagem - Foi comparado o rendimento obtido para diferentes frequências com o rendimento para os mesmos pontos de trabalho, em diferentes diâmetros de rotor.

A diferença absoluta máxima chegou a 10,1% na rotação de 1421 rpm. Comprovou-se que há uma perda significativa causada pela diminuição do diâmetro do rotor (perdas por recirculação), o que pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5: Diferenças de rendimento variando o diâmetro do rotor

Diâmetro do Rotor (mm)	Diferença Máxima (%)	Diferença Média (%)
209 mm	Base do Cálculo	0%
189,4 mm	5,72%	2,85%
168,6 mm	10,09%	6,74%
147,8 mm	9,94%	9,13%

CONCLUSÃO

O cálculo do rendimento por isolinhas de rendimento se mostrou adequado, como esperado, para uma variação de 35% da rotação a diferença média máxima de uma rotação foi de 3,1% de rendimento absoluto em relação ao obtido nos pontos semelhantes experimentais. As isolinhas de rendimento se mostraram uma boa forma de aproximação do rendimento real.

Utilizando as curvas de rendimentos fornecidos pelo fabricante para diferentes diâmetros de rotor, os rendimentos caíram bastante, considerando pontos semelhantes de vazão e altura manométrica obtidos utilizando o conversor de frequências. Para variação de 20% do diâmetro do rotor, a queda de rendimento chegou a até 10,1%, nesse caso com rotação constante. Lembrando que não é aconselhável rebaixar o rotor a mais de 20% em relação ao nominal.

Esses resultados comprovam que é mais eficiente utilizar a variação de rotação ao invés da variação de diâmetros de rotor, principalmente quando se pretende variar mais o ponto de trabalho em relação à curva nominal. Na variação de rotação, além de obter se um melhor rendimento ainda há a questão de que o mesmo permite uma maior faixa de operação.

REFERÊNCIAS

GUIMARÃES, R. (2008). Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2008. Uberlândia: UFU, 2008.

HENN, Érico A. L. (2006). Máquinas de fluido. Santa Maria: UFSM, 2006. 2 ed.

LENGSFELD, F. L.; DUARTE, R.; ALTIERI, C. (1991) – Manual de treinamento Seleção e aplicação de bombas centrífugas. São Paulo: KSB Bombas Hidráulicas S/A, 2003, 5 ed.

MACINTYRE, A. .J (1997). Bombas e instalações de bombeamento. Rio de Janeiro: LTC, 1997. 2 ed.

PIMENTEL, H. (2009). Sistemas de bombeamento - Eficiência Energética. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. Editora Universitária, 2009.

SOUZA, L. A. F. CARMO, D. T.; LOPES, I. F.; PINTO, D. P. (2008). Utilização do inversor de frequência como agente no aumento da eficiência energética em sistemas de bombeamento. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 8., 2008, Poços de Caldas. Anais... Poços de Caldas: INDUSCON, 2008.

TSUTIYA, M. T.; DAVID, A. C. (2005). Eficiência energética em sistema de abastecimento de água da cidade de Ubatuba, Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. Anais... Campo Grande: ABES, 2005