

## XI-100 – DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS

**David Maycon Schmitt Rosa<sup>(1)</sup>**

Graduando em Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

**Ana Carolina Aparecida Bastos**

Graduando em Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

**Camila Caroline Braun da Cruz**

Graduando em Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

**Thayná Albuquerque Silva**

Graduando em Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

**Welitom Ttatom Pereira da Silva**

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Mestre em Ciências Florestais e Ambientais pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Doutor em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília (PTARH/UnB). Atualmente é Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (DESA/UFMT).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Fernando Corrêa da Costa, No. 2367 – Bairro Boa Esperança – Cuiabá – MT – CEP 78060-900 – Brasil – Tel: (65) 3615-8723 – e-mail: [david\\_maycom@hotmail.com](mailto:david_maycom@hotmail.com)

### RESUMO

Sabe-se que os conjuntos elevatórios são componentes essenciais para sistemas de abastecimento de água e que estes componentes também são responsáveis pelo custo considerável de manutenção destes sistemas, devido ao consumo de energia elétrica. Em procedimentos de cálculo, é comum empregar-se margens de segurança nestes tipos de obras para a altura manométrica, assim, o conjunto escolhido apresentará uma margem de segurança para este fator. No entanto, em algumas situações, pode-se encontrar conjuntos elevatórios superdimensionados tanto para a altura manométrica, quanto para a vazão bombeada. Isto se dá geralmente, devido a insegurança ou falta de um relatório mais elaborado acerca dos custos benefícios da escolha do conjunto ou até mesmo, devido à agregação de inexperiência profissional. O fato é que existem diversas estações elevatórias, onde o procedimento de escolha, poderia ter sido mais acurado, com o intuito de reduzir os custos com a manutenção. Bombas superdimensionadas podem oferecer potências desnecessárias ao sistema, conhecidas como “destrutivas” que a médio longo prazo, podem danificar o sistema de recalque, juntamente com peças e tubulações, devido às altas pressões exercidas por estes sistemas. Desta forma, energias desnecessárias ao sistema, além da margem, devem ser evitadas, visando o aumento da vida útil destes conjuntos. Com base nesta problemática, foi desenvolvido um algoritmo, capaz de avaliar a eficiência de estações elevatórias, com base na quantidade de potência destrutiva aplicada ao sistema. Assim pode-se avaliar estações elevatórias já instaladas e testa-las quanto à percentagem deste superdimensionamento. Para teste do algoritmo criado, utilizou-se de dados reais de uma pequena estação elevatória, para a inserção dos dados de entrada e posterior avaliação dos resultados, apresentando o algoritmo para a situação descrita cerca de 15,87% de potência destrutiva.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia Elétrica, Estações Elevatórias, Algoritmo, Eficiência, Potência Destrutiva.

### INTRODUÇÃO

Sabe-se que as estações elevatórias são componentes essenciais nos sistemas de abastecimento de água, tendo utilização geralmente em captações, aduções, tratamento e distribuição de água. Sabe-se também que o avanço destes componentes se dá justamente em razão do aprimoramento de tubulações de altas pressões, dispositivos necessários a sua proteção, aperfeiçoamento de novos tipos de bombas e também pela maior disponibilidade de energia elétrica (Tsutiya, 2006). O uso intenso de conjuntos elevatórios representa para os operadores, grandes custos de energia elétrica, sendo um dos principais componentes de custo de companhias de abastecimento de água. Em conjuntos elevatórios é comum a adoção de um valor de segurança quanto à altura manométrica calculada, isto se dá em razão do envelhecimento de peças e tubulações ao longo do tempo, bem como possíveis obstruções por materiais sedimentares, resultando assim em um aumento da perda de carga do

sistema (Tsutiya, 2006). Embora seja custosa a manutenção de bombas de alta potência nestes componentes elevatórios, é comum também encontrar conjuntos elevatórios com elevados valores de segurança tanto para altura manométrica, quanto para a vazão de recalque, isto pode ser devido à insegurança de projeto ou da experiência profissional adotada. A literatura nos traz que nestas situações, potência aplicada no sistema muito maior que o necessário para suprir o sistema, há o surgimento de potência destrutiva, que além de causar maiores custos à operação do conjunto elevatório, também prejudicam o sistema. Segundo Karassik *et al.* (2001), a potência destrutiva ocorrer quando a bomba opera em um ponto abaixo do ponto de melhor eficiência. Nessa região, uma série de problemas podem ocorrer entre eles: (i) irregularidade no escoamento; (ii) baixo rendimento; (iii) aumento de empuxo radial; (iv) aumento de empuxo axial; (v) elevação da temperatura (Macintyre, 2011). Um breve exemplo dos efeitos possíveis desta destrutividade seria o aparecimento de defeitos, tanto do sistema hidráulico, quanto no conjunto motor-bomba.

Apesar da escolha do conjunto motor-bomba superdimensionado causar variados danos, muitas vezes, o desconhecimento por parte do projetista deste efeito destruidor, ou até mesmo a despreocupação quanto ao consumo de energia elétrica, os levam a fazê-lo. Uma análise mais profunda acerca do memorial de cálculo deveria ser tecido, junto a escolha destes sistemas, descrevendo todas as informações acerca das necessidades do sistema e um comparativo entre modelos motor-bombas visando o melhor custo benefício, tanto na instalação, quanto à manutenção destes conjuntos. Pensando nisto, este trabalho visou desenvolver um algoritmo de cálculo de eficiência de conjuntos elevatórios, já instalados, quanto a potência destrutiva empregada. Para tanto, este trabalho também buscou conhecer as características dos sistemas elevatórios, os erros gerais comumente cometidos durante a execução dos mesmos e por fim também se atentou à aplicação em uma situação real.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do trabalho foram utilizadas as seguintes etapas: revisão da literatura; desenvolvimento da lógica funcional; desenvolvimento da interface usuário; realização de simulações; e, análise dos resultados.

Para a revisão da literatura, buscou-se em artigos técnicos da área e áreas correlatas, com o intuito de conhecer a importância da operação destes conjuntos, em sistemas de abastecimento de água. O desenvolvimento da lógica funcional consiste basicamente na determinação de pontos de funcionamento de sistemas hidráulicos (curvas de bomba e curva de tubulações) para as condições (i) transporte de vazão conforme necessidade de projeto (condição ideal) e (ii) transporte de vazão superdimensionado (condição real). Para isso, fez-se uso de um algoritmo de otimização não linear, presente no pacote MS-Excel, denominado de GRG em complemento a outros códigos gerados no ambiente VBA. Essa técnica é baseada em uma movimentação iterativa de um ponto “x” qualquer, até que seja atingido um ponto “ $x+\Delta x$ ”, que otimiza a função objetivo e satisfaz as restrições do problema (ROSAL, 2007). O desenvolvimento da interface usuário se deu em MS-Excel no ambiente VBA, através do arranjo de caixas de diálogo e de textos, bem como seus respectivos botões (formulários) contendo as ações do algoritmo criado. Para a realização das simulações, e posterior teste do algoritmo, foi utilizado dados de uma pequena estação elevatória que, conhecidamente, opera em condições de superdimensionamento. A análise do resultado apresentado consiste, análise crítica e de concordância com a situação, na observância da coerência do mesmo.

## RESULTADOS

O custo relacionado a sistemas de recalque em estações elevatórias é considerado significativo, uma vez que o funcionamento do sistema de recalque (bombas) depende de parcelas consideráveis de energia, variando o custo em razão da tarifa de energia elétrica de região para região. Conhecendo-se as características do sistema (tubulações, reservatórios, bombas) é possível criar um “modelo de controle”, que aliado a algoritmos de otimização podem fornecer operações mais econômicas do ponto de vista energético (Figueiredo, 2007). Também, da revisão de literatura, foi possível perceber razoável quantidade de referências e materiais relacionados à eficiência de operação de estações elevatórias em sistemas de abastecimento de água, comprovando a importância do tema.

A lógica funcional do sistema solicita informações do sistema (tubulações e conjunto motor-bomba) junto ao usuário e através de informações como a vazão desejada, coeficiente de perda de carga (K) e altura geométrica

(Hg), do sistema, é possível construir a curva do sistema. O algoritmo também necessita de alguns pontos de plotagem da curva da bomba, a serem fornecidos pelo usuário, para a reprodução da curva da bomba. Para a construção da curva do sistema o algoritmo deriva, em cinco partes iguais, à vazão desejada pelo usuário até o valor zero e realiza o mesmo procedimento para além do ponto desejado, projetando assim uma sequência de pontos que representam exatamente a curva do sistema. Quanto ao cálculo do algoritmo, ponto de funcionamento do sistema é alcançado de forma sistêmica através da geração das equações de ambas as curvas e tratadas de forma algébrica para encontrar o ponto comum de vazão, o qual provê o funcionamento do sistema. A geração destas equações é feita graças a aplicação do algoritmo de otimização em um modelo matemático quadrático que representa a expressão geral da equação, onde os valores obtidos são os coeficientes da equação quadrática. O modelo matemático possui como função objetivo o mínimo erro quadrado do sistema, tendo como variáveis, os coeficientes. Desta forma, o algoritmo é capaz de extrair as duas curvas do conjunto elevatório, sistema e bomba, e assim iguala-las e encontrar o fator comum ou intersecção da curva, a vazão de funcionamento. As Equações 1, 2, 3 e 4 apresentam funções genéricas da curva do sistema de tubulações, da bomba e da potência destrutiva, respectivamente.

$$H_B = C_1 - C_2 \cdot Q - C_3 \cdot Q^2 \quad (1)$$

$$H_S = H_g + K \cdot Q^n \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_{HID}}{P_{MOT}} \quad (3)$$

$$P_{DES} = (1 - \eta) \cdot P_{MOT} \quad (4)$$

Nas quais:  $H_B$  é a altura manométrica da bomba;  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são coeficientes do polinômio de segunda ordem que representa a curva da bomba;  $Q$  é a vazão;  $H_s$  é a altura manométrica do sistema de tubulações;  $K$  é o coeficiente de perda de carga;  $\eta$  é o rendimento do conjunto motor-bomba no ponto atual de operação;  $P_{HID}$  é a potência hidráulica;  $P_{MOT}$  é a potência no eixo do motor;  $P_{DES}$  é a potência destrutiva.

A Figura 1 exemplifica os pontos de plotagem bem como as curvas do sistema e da bomba. Após encontrado a intersecção das curvas, ou seja, o ponto de funcionamento do conjunto elevatório, pode-se então através da fórmula da potência, dada em kW, calcular a potência destrutiva do conjunto elevatório, dado em porcentagem, isto é, quanta potência a mais está sendo injetada no conjunto além do necessário.

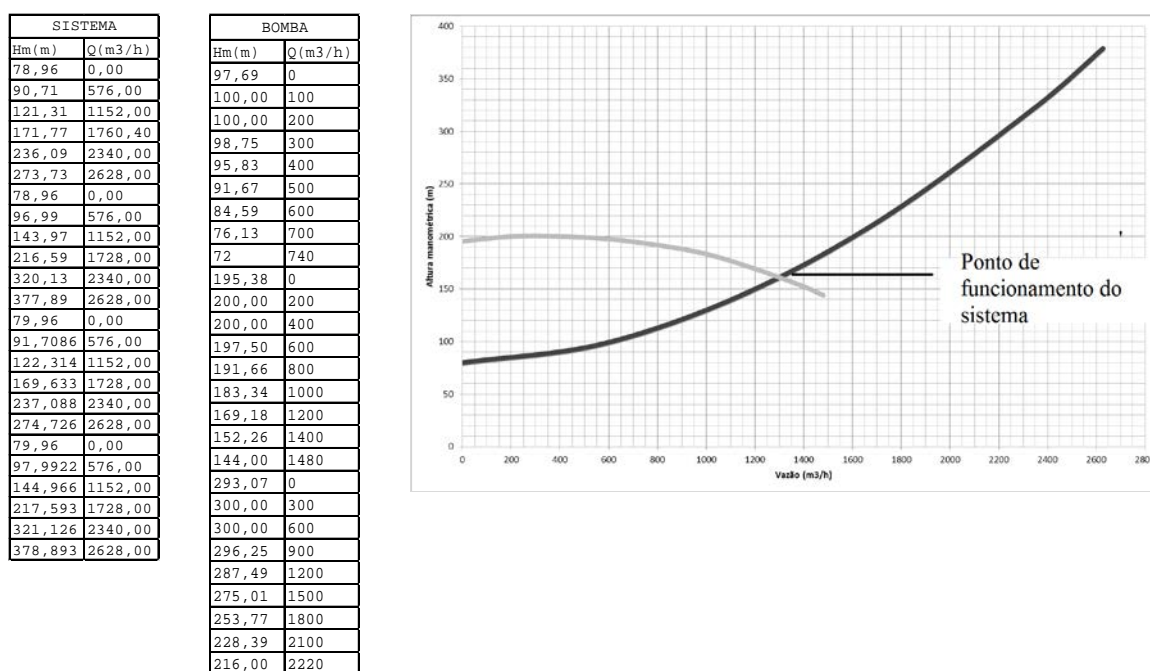


Figura 1: Exemplos de tabelas e gráficos gerados na simulação (ponto de funcionamento)

A partir das características da estação elevatória e do uso das Equações 1, 2, 3 e 4, o algoritmo desenvolvido, intitulado “ELEVASAN”, estima a eficiência de estações elevatórias buscando analisar a potência destrutiva do conjunto elevatório. Assim esta ferramenta pode auxiliar na análise destes tipos de sistemas de forma mais rápida, confiável e segura. O algoritmo foi desenvolvido em linguagem Visual Basic for Applications (VBA) para MS-Excel. Quanto ao funcionamento do sistema em desenvolvimento é importante salientar que o mesmo não informa o custo operacional do sistema, propondo uma solução, somente expressa a superestimação ou subestimação do sistema em relação à potência necessária para atender a demanda do sistema.

Da etapa desenvolvimento da interface usuário obteve-se, através de formulários, um conjunto de telas de entrada e saída, onde deverão: (i) ser fornecidos dados do conjunto elevatório; (ii) ser acionados comando de solicitação de processamento; e, (iii) obtenção de resultados. Na tela de entrada são apresentadas três opções: “Gerar novo caso”, “Resultado” e “Ajuda”. Na opção “Gerar novo caso” deverão ser fornecidas as informações necessárias já apresentadas para a inferência da lógica funcional. Na opção “Resultado” é realizado o cálculo da lógica funcional. Por último, na opção “Ajuda” são apresentadas instruções de uso e preenchimento do algoritmo “ELEVASAN”. A seguir são apresentadas, nas Figura 2 e 3, imagens do algoritmo impementado em ambiente VBA.



**Figura 2: Tela inicial do algoritmo “ELEVASAN”**

Figura 3: Tela de alimentação dos dados do algoritmo “ELEVASAN”

Para a realização das simulações foram adotados dados de uma pequena estação elevatória contida no campus Cuiabá, da UFMT. Entre estes dados, estão os necessários para a atuação do algoritmo, como a vazão desejada do sistema, o coeficiente de perda de carga (K) e a altura geométrica ( $H_g$ ). Também estão presentes informações da bomba utilizada no sistema, as quais com o auxílio de um catálogo foi possível identificar cinco ponto de vazão e altura manométrica para inserir nos dados de alimentação do algoritmo. Desta forma foi possível realizar o cálculo do previsto no algoritmo, com a construção das duas equações (sistema de tubulações e bomba) e a análise do ponto de funcionamento com a vazão desejada. As Figuras 4(a) e 4(b) apresentam os dados utilizados para a alimentação do algoritmo.

Valores inseridos	
Hg :	29
K :	209627,66
Qdes:	15
Valores gerados	
Q (m³/s)	Hm (m)
0	29,00
3	29,42
6	30,52
9	32,22
12	34,48
15	37,28
18	40,60
21	44,43
24	48,76
27	53,56
30	58,85

(a)

Valores inseridos	
N :	0,75
Q (m³/s)	Hm (m)
0	40,5
5	40,8
10	40,7
15	39,8
20	38

(b)

Figura 4: (a) Valores o sistema de tubulações; (b) valores para a bomba

A seguir são apresentadas nas Tabelas 1 e 2 os resultados fornecidos pelo algoritmo, bem como o valor apresentado de vazão pelo algoritmo e o gráfico da associação da curva do sistema de tubulações com a curva da bomba (Figura 5), para efeito de comparação.

**Tabela 1: Eficácia do procedimento de cálculo do algoritmo para a equação da bomba**

Hm (m) observado	Hm (m) calculado	erro	somaerro	r	R <sup>2</sup>
40,50	40,83	-0,3341	1,1351	0,9654	0,9321
40,80	40,80	0,0001			
40,70	40,32	0,3838			
39,80	39,38	0,4171			
38,00	38,00	0,0000			

erro = (observado – estimado)<sup>2</sup>; somaerro =  $\Sigma$ erro

r é o coeficiente de correlação; R<sup>2</sup> é o coeficiente de determinação

**Tabela 2: Eficácia do procedimento de cálculo do algoritmo para a equação da bomba**

Hm (m) observado	Hm (m) calculado	erro	somaerro	r	R <sup>2</sup>
40,50	40,83	-0,3341	1,1351	0,9654	0,9321
40,80	40,80	0,0001			
40,70	40,32	0,3838			
39,80	39,38	0,4171			
38,00	38,00	0,0000			

erro = (observado – estimado)<sup>2</sup>; somaerro =  $\Sigma$ erro

r é o coeficiente de correlação; R<sup>2</sup> é o coeficiente de determinação

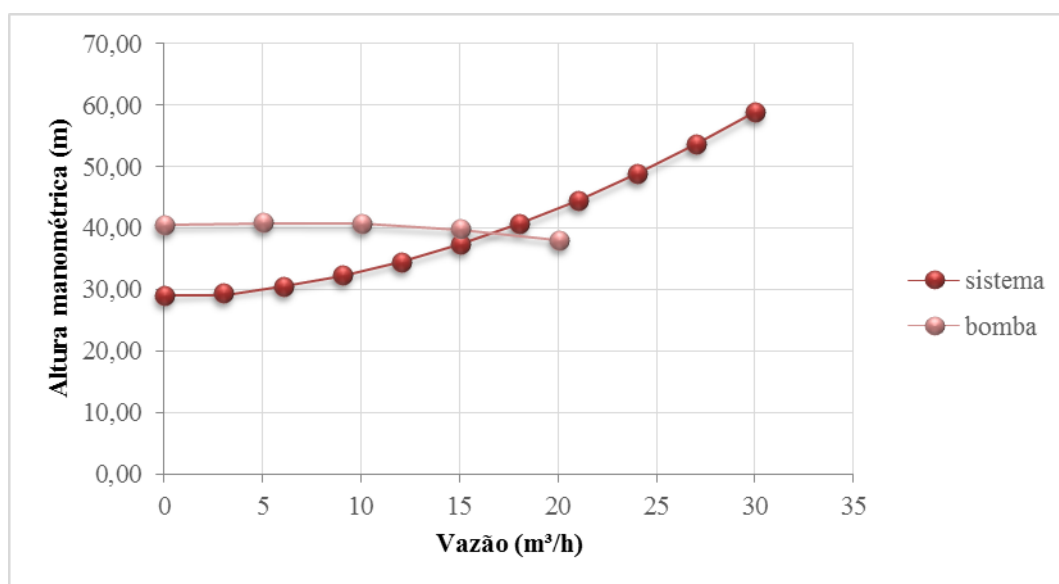
**Tabela 2: Eficácia do procedimento de cálculo do algoritmo para a equação do sistema de tubulações**

Hm (m) observado	Hm (m) calculado	erro	somaerro	R	R <sup>2</sup>
29,00	28,82	0,1826	0,3999	1,0000	0,9999
29,42	29,42	-0,0001			
30,52	30,57	-0,0481			
32,22	32,26	-0,0383			
34,48	34,49	-0,0073			
37,28	37,26	0,0207			
40,60	40,57	0,0278			
44,43	44,43	-0,0001			
48,76	48,83	-0,0747			
53,56	53,77	-0,2059			
58,85	59,25	-0,4021			

erro = (observado – estimado)<sup>2</sup>; somaerro =  $\Sigma$ erro

r é o coeficiente de correlação; R<sup>2</sup> é o coeficiente de determinação





**Figura 8: associação da curva sistema com a curva da bomba**

O resultado apresentado pelo algoritmo “ELEVASAN”, foi para os dados utilizados encontrou uma potência destrutiva de cerca de 15,87%, ou seja, o conjunto elevatório está fornecendo cerca de 15,87% a mais que o necessário para atender a demanda do sistema.

Na verificação da vazão de funcionamento encontrada pelo algoritmo, foi notável a proximidade com a vazão que pode ser encontrada pela intersecção do gráfico de associação da curva do sistema com a curva da bomba, apresentado neste trabalho. Esta vazão foi de cerca de 16,62 m³/hora. A análise dos resultados, mediante a apresentação do mesmo pelo algoritmo, se mostrou satisfatória, uma vez que apresenta uma solução coerente, segundo o teste apresentado, confirmando assim a eficácia e eficiência do algoritmo na análise da eficiência de estações elevatórias, quanto à potência destrutiva empregada no conjunto.

## CONCLUSÕES

Um estudo para criação de um algoritmo para auxiliar na análise de estações elevatórias foi desenvolvido. Os principais problemas de operação de sistemas elevatórios relacionados a custo de operação bem como as dificuldades das operações ótimas foram pesquisados.

Recomenda-se a continuidade destes estudos, com vistas a um aperfeiçoamento das técnicas levantadas neste trabalho, para a resolução de problemas mais complexos, encontrados em campo, bem como para a evolução do algoritmo, com a finalidade que este tenha maiores ferramentas de apoio a avaliação destes conjuntos elevatórios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FIGUEIREDO, M. M. P; MARTINS, P. J. Minimização do custo da energia em estações elevatórias de abastecimento de água. I CONFERÊNCIA INSSAA MODELAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: Implementação Sustentada e Integração na Indústria da Água. 2007. Anais. Barcelos, 2007.
- MACINTYRE, A. J. Bombas e instalações de recalque. 2 ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2011.
- KARASSIK, I. J.; Messina, J. P.; Cooper, P; Heald, C. C. Pump Handbook. 3 ed. New York, EUA: McGRAW-HILL, 2001.
- ROSAL, M.C.F. (2007) Programação não-linear aplicada à otimização de redes pressurizadas de distribuição de água. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 3 ed. São Paulo, Brasil: DEHS/EP/USP, 2006.