



EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO CONTROLE DA ADMISSÃO DE ÁGUA EM CAIXAS D'ÁGUA

Palavras-Chave: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, BOMBAS HIDRÁULICAS, OTIMIZAÇÃO

Autores(as):

Luiz Gustavo Honório Prado

Prof. Dr. Vinicius de Carvalho Neiva Pinheiro

INTRODUÇÃO:

O consumo de energia elétrica é um dos principais custos operacionais das empresas de saneamento, especialmente na etapa de bombeamento para distribuição de água. Muitas vezes, o sistema funciona de forma contínua, acionando as bombas sempre que há demanda, sem considerar o nível real dos reservatórios ou o custo da energia naquele horário. Como grandes consumidores, essas empresas estão sujeitas à tarifa azul, em que os preços são mais altos nos horários de pico.

Diante desse cenário, esta pesquisa busca avaliar a possibilidade de tornar o sistema mais eficiente a partir do controle da admissão de água nas caixas d'água residenciais. A ideia é restringir o abastecimento aos horários em que a energia elétrica é mais barata, aproveitando a capacidade de armazenamento dos reservatórios domiciliares. Através de um estudo de caso fictício e da construção de um modelo computacional, o trabalho compara o desempenho energético do sistema convencional com uma operação otimizada baseada em horários programados.

METODOLOGIA:

Foi realizada a modelagem de um sistema de abastecimento de água com base em dados técnicos de um projeto de ampliação no município de Cristais Paulista – SP, obtido por meio da análise de

documentação pública. O sistema é composto por uma adutora que alimenta um reservatório central com as seguintes características:

Parâmetro	Valor
Capacidade do Reservatório (N)	500 m ³
Nível Mínimo Permitido (Nmin)	200 m ³
Vazão bombeada (Qb)	93,4 m ³ /h
Vazão demandada (Qd)	Perfil de consumo
Altura Manométrica (HM)	65 m
Eficiência da Bomba (η)	75% (0,75)
Densidade da Água (ρ)	1000 kg/m ³
Aceleração da Gravidade (g)	9,81 m/s ²
Comprimento da Adutora (L)	1007 m
Diâmetro adutora (D)	200mm
Material	PVC

Tabela 1: Parâmetros do sistema de abastecimento

A demanda de água foi estimada por meio de um coeficiente aplicado sobre a vazão da bomba em cada hora do dia, gerando um perfil de consumo teórico. O padrão horário de consumo foi mantido constante para todos os dias simulados.

Hora	Coeficiente	Hora	Coeficiente	Hora	Coeficiente	Hora	Coeficiente
00:00	0,83	06:00	0,64	12:00	0,89	18:00	1,00
01:00	0,64	07:00	0,76	13:00	0,91	19:00	0,97
02:00	0,60	08:00	0,75	14:00	0,89	20:00	0,97
03:00	0,65	09:00	0,83	15:00	0,95	21:00	0,97
04:00	0,56	10:00	0,87	16:00	0,90	22:00	0,85
05:00	0,56	11:00	0,96	17:00	0,95	23:00	0,82

Tabela 2: Coeficiente de consumo

Para o custo da energia, foi adotada a tarifa azul, correspondente a consumidores do grupo A2 (88 a 138 kV), com valores diferenciados para horário de ponta e fora de ponta. As tarifas consideradas foram inicialmente às de abril de 2025, posteriormente atualizadas com base em dados mais recentes da concessionária local (data a ser confirmada).

- Horário normal (00h - 16h e 21h - 23h): R\$ 0,377 kWh
- Horário de pico (18h - 20h): R\$0, 542 kWh

A modelagem computacional foi desenvolvida no Microsoft Excel, com uso do Solver e o algoritmo GRG Nonlinear. A função objetivo foi a minimização do custo total de energia elétrica no mês, com o tempo de operação da bomba como variável de decisão. No modelo convencional, o volume do reservatório foi mantido fixo em 500 m³, e o tempo de operação variou entre 0 e 1 hora por intervalo. No modelo otimizado, o volume pôde variar entre 200 e 500 m³, com volumes inicial e final do dia fixados em 350 m³. As restrições garantem o suprimento da demanda sem exceder os limites do reservatório.

O custo de energia elétrica foi calculado por hora de operação, com base na seguinte equação:

$$C_t = k \cdot E$$

Em que C_t é o custo no intervalo, E é a energia consumida e k é a tarifa horária vigente. A energia elétrica consumida em cada intervalo foi estimada por:

$$E = \frac{1000 \cdot \rho \cdot g \cdot Q_b \cdot H}{n \cdot 3600} \cdot top$$

em que:

- ρ é o peso específico da água (9.810 N/m³);
- Q_b é a vazão da bombeada (m³/h);
- H é a altura manométrica (m);
- n é a eficiência da bomba;
- top é o tempo de operação no intervalo.

O tempo de operação da bomba em cada hora, quando não otimizado, foi calculado diretamente com base na relação entre a demanda horária e a vazão da bomba:

$$top = \frac{Qd}{Qb}$$

No modelo otimizado, esse tempo foi ajustado pelo Solver para minimizar o custo total, obedecendo aos limites de volume do reservatório.

Devido a limitações do Excel quanto ao número de células que o Solver pode manipular, a modelagem foi feita para dois dias representativos e, em seguida, os custos foram multiplicados por 15 para estimar o consumo mensal. O perfil de consumo diário foi considerado idêntico ao longo dos 30 dias:

$$C_T = \sum_{t=1}^{48} C_t \cdot 15$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A simulação do sistema de abastecimento foi realizada para dois cenários: um modelo sem otimização e outro com otimização do tempo de operação das bombas, considerando a variação horária da tarifa de energia. O objetivo foi avaliar o impacto econômico da operação ao longo de um dia representativo, com projeção mensal.

No modelo não otimizado, a bomba operou por quase toda a extensão do dia, mantendo o volume do reservatório constantemente no nível máximo de 500 m³. Essa estratégia, apesar de garantir segurança no abastecimento, resultou em operação contínua inclusive durante os períodos de tarifa mais elevada (ponta), como das 18h às 20h, o que aumentou o custo total. O custo mensal estimado nesse cenário foi de R\$ 5.221,92.

Já no modelo otimizado, o tempo de operação das bombas foi ajustado para priorizar os horários de tarifa reduzida. O reservatório passou a operar com volumes variáveis entre os limites de 200 m³ e 500 m³, mantendo o equilíbrio do sistema e respeitando as restrições de segurança. A bomba operou por tempos menores em horários de tarifa mais alta, entrando em funcionamento nesses períodos apenas quando necessário para evitar que o volume atingisse o mínimo permitido. Essa estratégia resultou em um custo mensal estimado de R\$ 4.852,77, representando uma economia de aproximadamente 7%.

Embora a diferença de custo possa parecer modesta, é importante destacar que o estudo foi aplicado a um único reservatório alimentado por uma única adutora. Em sistemas completos de abastecimento urbano, compostos por múltiplas unidades e ramificações, o impacto da otimização tende a ser significativamente ampliado. Além disso, o comportamento observado no modelo otimizado comprova o potencial de estratégias de controle baseadas na demanda e no custo de energia para melhorar a eficiência operacional e econômica de sistemas de abastecimento

CONCLUSÕES:

Mesmo com uma diferença de custo relativamente pequena entre os dois modelos, os resultados mostram que o controle do tempo de operação das bombas pode ajudar a reduzir o gasto com energia elétrica. A simulação foi feita para apenas uma adutora e um reservatório, mas em um sistema completo de abastecimento o impacto dessa economia tende a ser bem maior.

A metodologia utilizada se mostrou simples e eficiente. Com poucos dados e usando apenas o Excel, foi possível simular a operação do sistema respeitando as restrições de volume e aproveitando melhor os horários de tarifa mais barata. Por outro lado, vale destacar que o perfil de consumo foi construído de forma teórica e igual para todos os dias, e que o cálculo mensal foi uma projeção a partir de dois dias modelados. Essas limitações interferem na precisão, mas não invalidam a utilidade do modelo.

BIBLIOGRAFIA

1 GUANAIS, Ana Luiza Rezende; COHIM, Eduardo Borges; MEDEIROS, Diego Lima. Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 1187-1196, nov./dez. 2017.

2 .PREFEITURA MUNICIPAL DE CRISTAIS PAULISTA. Relatório Técnico: Sistema de Abastecimento de Água. Cristais Paulista, SP, 2013.

3. GUANAIS, Ana Luiza Rezende; COHIM, Eduardo Borges; MEDEIROS, Diego Lima. **Avaliação** energética de um sistema integrado de abastecimento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 1187-1196, nov./dez. 2017.

4. CPFL Paulista. Tarifas de Energia Elétrica Vigentes a partir de 8 de abril de 2024.

5. *Otimização de Sistemas de Abastecimento de Água para Redução do Custo com Energia Elétrica* de Clayton Alexandre Pereira:

6. *Otimização em Estação Elevatória de Sistemas de Abastecimento de Água Buscando a Eficiência Energética* de Hudson Tiago dos Santos Pedrosa

7. LIMA, G. M.; BRENTAN, B. Uso racional de energia em sistemas de abastecimento de água. *Revista da UFMG*, Belo Horizonte, v. 26, n. 1 e 2, p. 108-135, jan./dez. 2019.