

I-141 – DEFINIÇÃO DA SOLUÇÃO ÓTIMA GLOBAL NO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS

Luís Henrique Magalhães Costa⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutor em Recursos Hídricos (UFC). Professor Adjunto da Universidade Estadual Vale do Acaraú.

Marco Aurélio Holanda de Castro⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade de Brasília (UnB). Doutor em Engenharia (Drexel University). Professor Titular da Universidade Federal do Ceará(UFC).

Endereço⁽¹⁾: Rua Raimundo Newton Xeres Ribeiro, 1419, Colinas da Boa Vista, CEP: 620001000. Sobral(CE).

RESUMO

Em geral, as regras operacionais dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAAs) visam à garantia da continuidade do abastecimento público, sem a consideração da variação da tarifa energética ao longo do dia. Entretanto, além da utilização eficiente da tarifa energética, outros aspectos devem ser considerados na operação de um SAA tais como, a gama de combinações possíveis de regras operacionais, a variação da demanda hídrica e a manutenção dos níveis dos reservatórios dentro de seus limites pré-estabelecidos. Isto motivou o desenvolvimento desta pesquisa, que tem como objetivo fornecer ao operador condições de operacionalidade nas estações elevatórias do sistema de forma racional, não dependendo somente de sua experiência profissional. Desta forma, apresenta-se neste trabalho um modelo computacional de apoio à tomada de decisão com vistas à minimização dos gastos com energia elétrica. Para tanto, fundamenta-se na junção do algoritmo Branch-and-Bound (BB) e do simulador hidráulico EPANET. O BB é responsável pela enumeração de todas as estratégias operacionais viáveis, enquanto que a avaliação da viabilidade hidráulica dessas estratégias é feita pelo EPANET. Neste trabalho apresenta um estudo de caso hipotético com uma estação elevatória com três bombas. As soluções ótimas globais são apresentadas para diferentes cenários de restrições.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência Energética, Estação Elevatória, Branch-and-Bound.

INTRODUÇÃO

Nas empresas de saneamento, as principais ações envolvendo a redução dos gastos com energia elétrica se concentram na operação de estações elevatórias. Inúmeros autores (Polito,2006; Bahia,1998; Tsutiya,2001; Gomes,2009) afirmam que o consumo de energia elétrica é, na maioria dos casos, o segundo item de custo operacional dos prestadores de serviços de saneamento, sendo que o primeiro está relacionado às despesas com pessoal.

As principais oportunidades de economia de energia elétrica são encontradas nas melhorias de procedimentos operacionais, no redimensionamento de elementos hidráulicos (e.g. tubulações, bombas e reservatórios) e no uso de tecnologias eficientes.

Dentre as medidas práticas que podem levar à redução do custo de energia elétrica, a alteração dos procedimentos operacionais de bombeamento demonstra ser bastante eficaz, pois não necessita de nenhum investimento e, além disso, a economia, devido a essa redução ocorre em curto prazo. Entretanto, a determinação de estratégias operacionais que gerem custos energéticos reduzidos e que mantenham a qualidade no atendimento aos clientes é uma tarefa complexa. Objetivos distintos estão envolvidos neste processo como, por exemplo, a utilização eficiente da tarifa energética e a manutenção de variáveis hidráulicas dentro dos limites pré-estabelecidos (Costa et al.,2010).

Com os avanços e aprimoramentos dos algoritmos de otimização, inúmeros trabalhos visando à redução do custo energético de operação de sistemas de abastecimento de Água (SAA) têm sido desenvolvidos nos últimos anos. Os primeiros trabalhos envolvendo a otimização do custo energético de bombeamento utilizaram-se de técnicas de pesquisa operacional e do algoritmo genético como, por exemplo, programação linear (JOWITT; GERMANOPOULOS, 1992), programação linear inteira (LITTLE; MCCRODDEN, 1989), programação não-linear (BURGSCHWEIGER et al, 2005), programação dinâmica (LANSEY; AWUMAH, 1994) e algoritmo genético (BRION; MAYS, 1991 e Wood e Reddy, 1994).

A limitação da utilização dos modelos que se baseiam em técnicas de pesquisa operacional em casos reais se deve principalmente a complexidade das resoluções das equações que garantem o equilíbrio hidráulico da rede e a dificuldade de generalizar esses modelos em qualquer SAA. Já o uso dos algoritmos genéticos e demais modelos estocásticos é a tendência em demandar um tempo computacional excessivo no encontro de boas soluções em problemas deste tipo (extremamente restritivos), além da não garantida do ótimo global.

Contudo, apresenta-se o método BB aplicado ao problema de otimização de estratégias de rede de distribuição de água. As suas duas principais vantagens é a garantia do ótimo global e que quanto mais restritivo o problema mais eficiente se torna o modelo. Como principal desvantagem é a limitação da quantidade de bombas. Para estações elevatórias com uma quantidade de bombas maior que três a metodologia apresentada se torna computacionalmente inviável.

METODOLOGIA

A determinação de soluções ótimas na operação de bombas em um SAA é considerado um problema complexo por envolver um grande número de variáveis de decisão e muitas restrições pertinentes a cada sistema. As variáveis de decisão são os estados operacionais das bombas. Para representar essas variáveis em cada passo de tempo, utiliza-se a notação binária. A configuração da bomba é representada por um bit onde 0 e 1 representam os estados desligado e ligado, respectivamente.

O problema de otimização desse trabalho apresenta a estrutura clássica de um problema de otimização em que se procura minimizar uma função objetivo sujeita a um conjunto de restrições que representam os limites operacionais do sistema. A função objetivo é bem definida e equaciona a minimização dos custos de energia elétrica relativos ao bombeamento de um SAA.

O objetivo principal do modelo é encontrar a configuração de bombas que proceda no menor custo energético possível no horizonte operacional. Sendo assim, a função objetivo pode ser definida como o somatório da energia gerada pelas bombas, em todo horizonte operacional, devido à potência originada com o atendimento aos pontos de consumos e o abastecimento dos reservatórios. Pode ser expressa de acordo com a equação:

$$MinCE = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} C_{nt} E_{nt} (X_{nt}) \quad (1)$$

Onde: n: bomba selecionada;

t: passo de tempo;

CE: custo energético diário (\$);

Cnt: custo tarifário (\$/kWh);

Ent: energia consumida (kWh);

Xnt: estado de funcionamento da bomba;

N: quantidade de bombas do SAA;

As tarifas energéticas podem variar de acordo com o tipo de consumidor (e.g., residencial, industrial, comercial), valor da potência contratada, período do ano, da semana e da hora do dia.

O estado de funcionamento da bomba (Xnt) é a variável de decisão da função objetivo (Equação 1). Tal variável se caracteriza por um vetor solução e é representada por um vetor binário (0/1) que determina se a bomba está desligada ou ligada, a cada hora, durante um dia de operação. A equação a seguir expõe mais detalhadamente a representação do vetor ora citado para o caso de um SAA com duas bombas:

$$X_{nt} = (X_{1,1}, X_{2,1}, X_{1,2}, X_{2,2}, X_{1,3}, X_{2,3}, \dots, X_{1,24}, X_{2,24}) \quad (2)$$

Dessa forma, no processo de otimização, os vetores soluções que representam as estratégias operacionais diárias para n bombas deverá ter a dimensão 24 x n, onde, conforme citado anteriormente, n representa o número de bombas.

As restrições do problema estão relacionadas às variáveis hidráulicas como os níveis dos reservatórios e também com a quantidade máxima de acionamentos permitido por bomba (Costa et al.,2010)

Objetivando uma avaliação mais completa e refinada das soluções propõe-se a utilização de uma técnica enumerativa que possibilite a avaliação de todas as soluções do espaço de busca para o problema de estudo apresentado.

Como as variáveis de decisão representam o estado da bomba a cada hora e a reação hidráulica do sistema é dependente do estado das bombas nas horas anteriores, é possível utilizar o algoritmo branch and bound na busca de todas as soluções do espaço de busca. O esquema da metodologia proposta para uma bomba é apresentado na figura 1.

A cada hora é verificado se alguma solução terá violada alguma restrição (e.g. níveis dos reservatórios). Caso isto ocorra é realizado o corte desta solução no referido horário. Dessa forma, todas as soluções que forem avaliadas até o horário final (24 horas) serão soluções factíveis. Contudo, o algoritmo proposto garantirá o encontro de todas as soluções viáveis do espaço de busca.

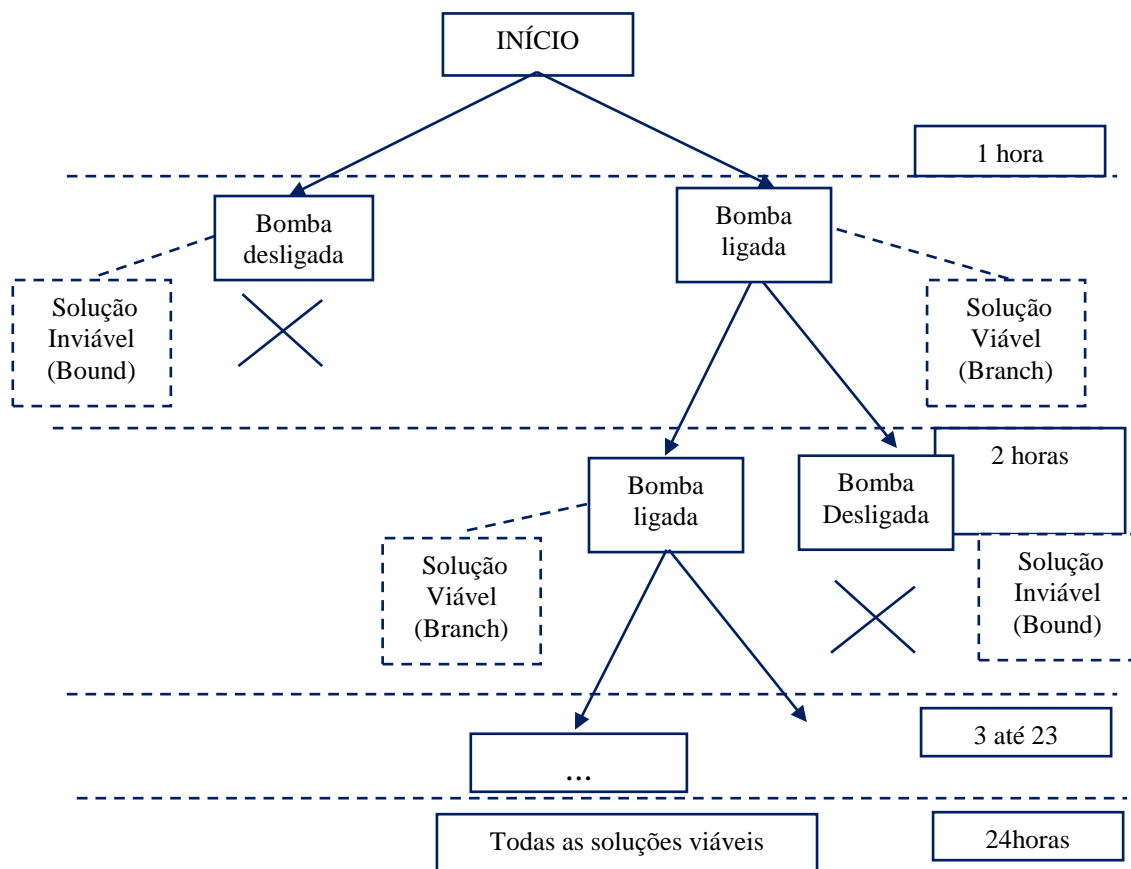


Figura 01: Esquema das ramificações e cortes das soluções

Da hora 1 até a hora 23, temos soluções parciais (incompletas) onde as simulações são feitas com durações de uma hora. Na hora 24 temos soluções completas com simulações de duração de 24 horas. Seguindo a figura 1, temos que na primeira hora foram geradas duas soluções parciais (0 e 1). Neste momento foram realizadas duas simulações com duração de 1 hora cada e verificou-se que para a solução 0 (bomba desligada de 0 a 1 hora) ocorreu uma inviabilidade (ex: o nível do reservatório menor que mínimo). A solução 0 será cortada (bound) no ramo da árvore de busca. Já a solução 1, por ser uma solução parcial viável, será expandida para duas soluções parciais 10 e 01 e, em seguida, uma simulação de 1 a 2 horas, será realizada para verificar a viabilidade das mesmas. A cada simulação, os níveis dos reservatórios finais são armazenados em um banco de dados para que possam ser iniciados na hora seguinte.

O procedimento é continuado até a hora 24. Neste momento, já que as soluções se encontram todas completas, são realizadas simulações com durações de 24 horas. Todas as soluções viáveis encontradas são enviadas a um banco de dados e, em seguida, é definida a solução ótima global.

ESTUDO DE CASO

A rede que servirá de base para o presente estudo de caso foi utilizada por Rao e Salomons (2007) que, por sua vez, também empregaram Algoritmo Genético na otimização da operação de sistemas de bombeamento, visando à redução do custo energético, e consideraram o mesmo formato (codificação binária) das variáveis de decisão.

Rao e Salomons (2007), atualizando a rede criada por Walski et al (1987), denominaram-na de Any Town (modificada) ou AT(M). Esta é composta por uma fonte de abastecimento, três bombas com velocidades constantes, três reservatórios de armazenamento e três nós com pressões críticas. A Figura 5.18 e a Tabela 5.3 apresentam a topologia e as características físicas da rede, respectivamente.

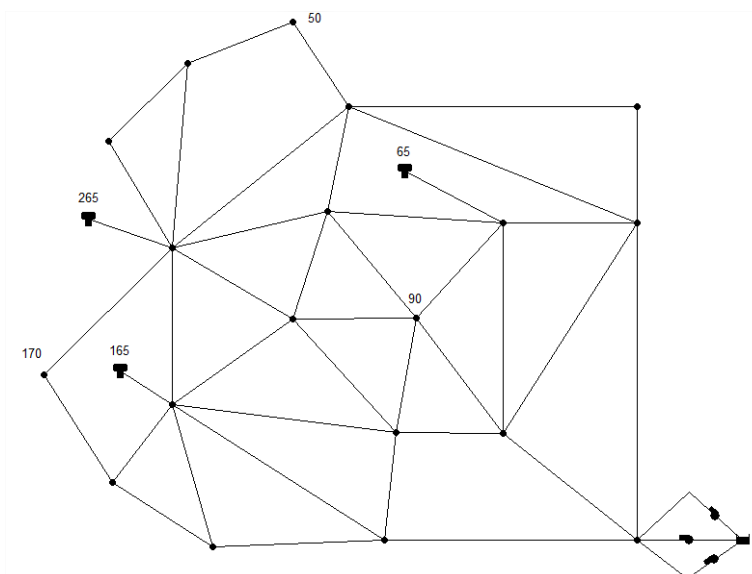


Figura 02: Topologia da rede AT(M)

As limitações dos níveis dos reservatórios, das pressões dos nós críticos e das vazões das bombas compõem as restrições do problema. Os níveis máximos e mínimos dos três reservatórios são de 71.53m e 66.53m, respectivamente. As pressões mínimas para os nós críticos são 51m (nó 90), 42m (nó 55) e 30m (nó 170). Os padrões de demanda (Figura 5.19), a curva característica das bomba, as restrições e o custo tarifário (Figura 5.4) aplicados na rede são os mesmos utilizados por Rao e Salomons (2007).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A metodologia foi desenvolvida no ambiente de programação Lazarus (<http://www.lazarus.freepascal.org/>). Foi utilizado um Desktop com processador i7-4771 CPU 3.50GHz e 32GB de memória. A evolução das soluções por meio da árvore de busca pode ser visto na tabela 1.

Na primeira hora, considerando três bombas, são geradas quatro soluções parciais: 0,1,2 e 3. Após as simulações hidráulica, verificou-se que das quatro soluções parciais, três são viáveis e uma inviável, conforme ilustrado na tabela 1. Na solução 0 (todas as bombas desligadas) ocorreu de ser inviável devido os reservatórios ficarem com níveis inferiores ao mínimo. Portanto, esta solução parcial será corta e não haverá ramificação, ou seja, não haverá avaliações de soluções parciais com início 0. Esta corte reduz em 25% o espaço de busca.

Nas soluções parciais viáveis (1,2 e 3) na primeira hora, devido a viabilidade das mesmas, ocorrem as ramificações, surgindo 9 novas soluções parciais 10,11,12,13,20,21,22,23,30,31,32 e 33. Destas 12 soluções parciais viáveis, verificou-se que as soluções 10 e 33 apresentaram inviabilidade devido ultrapassarem os limites do reservatório. Estas soluções foram cortadas e as demais ramificadas (estendidas). O processo é continuado até a hora 24, onde todas as soluções são completas e, após as simulações destas, foram encontradas 27843662 soluções viáveis e armazenadas em um banco de dados. A restrição de quantidade máxima de acionamentos neste cenário foi de 3 acionamentos. O procedimento total durou 81.12 horas.

Tabela 1: Quantidade de soluções parciais e completas para 3 acionamentos

Hora	Solução Viável	Soluções Inviáveis	Soluções totais	Hora	Solução Viável	Soluções Inviáveis	Soluções totais
1	3	1	4	13	194904	71499	266403
2	10	2	12	14	412249	172463	584712
3	27	13	40	15	910649	326098	1236747
4	75	33	108	16	2111104	620843	2731947
5	197	103	300	17	4414277	1919035	6333312
6	511	277	788	18	6817056	2011498	8828554
7	1436	608	2044	19	10522678	3111434	13634112
8	3639	669	4308	20	13714154	396367	14110521
9	7872	3045	10917	21	19648694	7779614	27428308
10	18989	4627	23616	22	37009232	41585544	78594776
11	40991	15976	56967	23	73182809	74854119	148036928
12	88801	34172	122973	24	27843662	264887574	292731236

Pode-se perceber que a redução de soluções viáveis da hora 23 para a 24. Esta redução ocorreu devido a uma restrição do nível do reservatório onde o nível final deva ser superior ou igual ao nível inicial. Também pode-se perceber para o cenário de quantidade máxima de acionamento igual a três, de todas soluções possíveis, (292731236), apenas 10% (27843662) são viáveis.

Quanto mais restritivo o problema mais eficiente será o método BB. Por isto foram verificados dois novos cenários de restrição onde as quantidades máximas de acionamento são 2 e 1. Os resultados são mostrados na figura 3 seguir.

Tabela 2: Resultados para os cenários de restrição (* quantidade máxima de acionamentos)

Nmax	Solution Time(sec) Cost (\$)	pumps	hour																							
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
3	12121111002222121000210	1																								
	292040	2																								
	3578,67	3																								
2	122111111022212121000111	1																								
	36914	2																								
	3618,59	3																								
1	122111111112221111100111	1																								
	425	2																								
	3916,98	3																								

Pela tabela acima, pode-se confirmar a relação entre o nível de restrição do problema e a eficiência do algoritmo BB. O tempo computacional baixou para 10.25 horas para o cenário de quantidade máxima de 2 acionamentos e para 3 o tempo reduziu para aproximadamente 7 minutos.

CONCLUSÕES

A técnica enumerativa Branch-and-Bound possibilitou a enumeração de todas as soluções viáveis no estudo de caso apresentado e, conseqüentemente, a definição da solução ótima global. Esta determinação é impossível com o uso dos algoritmos estocásticos, bastante utilizados neste tema.

Apesar do alto tempo computacional para os cenários menos restritivos, o uso desta técnica viabiliza o armazenamento de todas as soluções viáveis, possibilitando, sua utilização para diferentes estudos de casos com diferentes cenários de demanda para que, após obtidas todas as soluções viáveis, torne-se viável o uso de otimização em tempo real, já que as possíveis soluções viáveis e seus custos já estariam todas definidas.

A aplicação da metodologia é recomendada para sistemas com até três bombas, entretanto, com o uso de programação paralela o problema pode ser aplicado em sistemas elevatórios com uma quantidade de bombas maior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAHIA, S. R. (1998). *Eficiência Energética nos Sistemas de Saneamento*. Rio de Janeiro: IBAM - ELETROBRÁS/PROCEL.
2. BRION, L. M., MAYS, L. W. (1991). *Methodology for Optimal Operation of Pumps Stations in Water Distribution Systems*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 117, n. 1, p.1551-1568.
3. BURGSCHEWIGER, J.; GNÄDIG, B.; STEINBACH, M. C. (2005). Nonlinear programming techniques for operative planning in large drinking water networks.
4. COSTA, L.H.M.; RAMOS H.M.; CASTRO, M.A.H. (2010). "Hybrid genetic algorithm in the optimization of energy costs in water supply networks". Water Science & Technology 10.3, pp. 315-326.
5. GOMES, H.P. (2009). *Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento – Análise Econômica de Projetos*. Editora ABES.
6. JOWITT, P. W., GERMANOPOULOS, G. (1992). *Optimal Pump Scheduling in Water-Supply Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 118, n. 4, p.406-422.
7. LANSEY, K. E., AWUMAH, K. (1994). Optimal Pump Operations Considering Pump Switches. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 120, n. 1, p.17-35.
8. LITTLE, K. W., McCRODDEN, B. J. (1989). *Minimization of Raw Water Pumping Cost Using MILP*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 115, n. 4, p.511-522.
9. POLITO, R. (2006). *Eficiência Energética: bom Negócio para Todos*. Revista Brasil Energia, Rio de Janeiro, nº 305, p. 92-103.

10. RAO, Z.; SALOMONS, E. “*Development of a real-time, near-optimal control system for water-distribution networks.*” *Journal of Hydroinformatics*, v. 9, n. 1, p. 25-38, 2007.
11. TSUTIYA, M. T. (2001). *Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água*. Editora ABES.
12. WOOD, D. J., REDDY, L. S. (1994) .*Control de Bombas de Velocidad Variable y Modelos en Tiempo Real para Minimizar Fugas y Costes Energéticos*, In: *Mejora del Rendimiento y de La Fiabilidad en Sistemas de Distribucion de Agua*. Valência, Espanha: Editores E. Cabrera, U. D. Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, A. F. Vela e Universitat Jaume I de Castellón, p.173-207.
13. WALSKI, T. M.; BRILL Jr., E. D.; GESSLER, J.; GOULTER, I. C.; JEPPSON, R. M.; LANSEY, K.; LEE, H.; LIEBMAN, J. C.; MAYS, L.; MORGAN, D. R.; ORMSBEE, L. (1987). *Battle of the network models: epilogue*. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 113, No. 2, p.191-203.