



CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ABASTECIMENTO PÚBLICO DE ÁGUA: OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DO SISTEMA DE MACAPÁ

Cynthia Santos Andrade

Paulo de Barros Correia

Universidade Estadual de Campinas / FEM / Departamento de Energia

Cx. Postal 6122 – 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

cynthia@fem.unicamp.br; correia@fem.unicamp.br

***Resumo.** Este trabalho apresenta um modelo de otimização do bombeamento de sistemas públicos de abastecimento de água, com um estudo de caso em Macapá. O modelo possui uma formulação multiobjetivo e as funções a serem minimizadas são o consumo e o custo da energia elétrica. Para a avaliação dos resultados advindos da operação otimizada da rede de água de Macapá, realizou-se uma simulação operacional, brevemente discutida neste trabalho. Esta simulação visa representar a gestão operacional atual do sistema, com as mesmas restrições consideradas na elaboração do modelo de otimização. Os resultados da análise comparativa apontaram um potencial de redução no consumo de energia elétrica da rede de distribuição de água de Macapá da ordem de 5,5 %. Nos custos operacionais a redução variou de 5,5 % à 24%, de acordo com as condições adotadas.*

***Palavras-chave:** Otimização, Bombeamento, Abastecimento de água, Energia elétrica*

1. INTRODUÇÃO

Genericamente, os sistemas públicos de abastecimento de água são compostos por captações, adutoras, reservatórios, estações de bombeamento e rede de distribuição. Nestes sistemas, cerca de 80% da energia elétrica consumida destina-se às bombas (Oliver & Putnam, 1997), utilizadas para impulsionar a água a lugares distantes ou elevados. Nos sistemas de saneamento, os gastos com energia elétrica chegam a 10% dos custos operacionais das empresas; excluindo o pagamento de pessoal, estes gastos atingem 25% do total.

Algumas medidas podem ser aplicadas no abastecimento público de água visando a conservação da energia elétrica e redução dos gastos operacionais. Entre elas, uma medida bastante eficaz é a otimização da operação de chaveamento, que determina qual a melhor configuração horária de chaveamento (liga-desliga) das bombas de forma a minimizar o consumo de energia elétrica.

Nas redes de abastecimento de água o processo de otimização do bombeamento se viabiliza devido à existência dos reservatórios, que lhes proporcionam flexibilidade operacional. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos em todo mundo utilizando modelos de

otimização na operação de abastecimentos públicos de água, com mais ênfase na Europa, Israel e mais recentemente nos Estados Unidos. No Brasil, tem-se trabalhado com menor intensidade nesta área. Há um desinteresse das companhias de abastecimento de água no que concerne a conservação de energia elétrica. Pois, além de ser um insumo relativamente barato, a principal preocupação da administração das empresas é garantir o suprimento de água à população independente do custo, e isto já consiste em uma tarefa complexa visto as atuais condições de funcionamento das empresas.

Este trabalho apresenta um modelo de otimização do bombeamento para o sistema de abastecimento de água de Macapá, capital do estado do Amapá, que tem como captação principal o rio Amazonas.

A dificuldade de obtenção de dados específicos do comportamento da rede de Macapá fez com que fosse necessário se elaborar uma simulação operacional, com o intuito de assimilar o comportamento atual do sistema e que levasse em conta todas as considerações feitas no modelo de otimização. Os resultados da simulação foram utilizados para a avaliação comparativa dos resultados do modelo de otimização.

2. MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Diversas técnicas podem ser utilizadas na formulação de modelos de otimização operacional de sistemas de abastecimento de água. O uso de programação dinâmica é bastante difundido neste segmento e foi utilizada em diversos estudos: Ormsbee *et al.* (1989); Zessler & Shamir (1989), Lansey & Awumah (1994) e Nittivattananon *et al.* (1996). A grande limitação deste tipo de formulação é a capacidade reduzida quanto ao número de variáveis de estado, dificultando sua aplicação a sistemas, com vários reservatórios.

Diba *et al.* (1995) apresentaram um modelo de otimização que emprega duas ferramentas principais de análise: teoria de grafos e programação linear (Luenberger, 1984). Os resultados, deste estudo, indicaram que a combinação destas duas metodologias resultam em um algoritmo muito versátil para a solução de problemas de larga escala. Na mesma época, Sun *et al.* (1995) também apresentaram um modelo de otimização das operações de bombeamento, que faz o uso da combinação das mesmas ferramentas; testes demonstraram que o modelo proposto era de 11 a 117 vezes mais rápido que os códigos tradicionais.

Para a elaboração do modelo de otimização da rede urbana de água de Macapá, utilizou-se o algoritmo SCODA (Correia, 1988) que possui uma formulação de programação linear em redes e teoria de grafos. A otimização operacional é realizada no curto-prazo (24 horas), dividido em oito intervalos de análise de três horas cada. As restrições do problema são o balanço de fluxo nos nós e os limites físicos dos elementos da rede de distribuição de água. O modelo é multiobjetivo (Steuer, 1989) e as funções a serem minimizadas são o consumo e custo da energia elétrica no sistema principal de água de Macapá.

2.1 Sistema de água da CAESA em Macapá

A Figura 1 apresenta um esquema topológico do sistema principal de suprimento de água de Macapá, sendo esta a rede considerada no modelo de otimização.

Os traçados mais fortes da Fig. 1 representam os arcos em que a condução da água se realiza através do auxílio de bombas, que são as captações e recalques. Nesta representação, distribuição de água foi agrupada por pontos, identificados pela letra D seguida de um algarismo. Os reservatórios foram nomeados de forma a facilitar a identificação de cada um, e excluindo-se os dois grandes reservatórios R1 e R2, os demais se identificam pela abreviação

do nome original de cada região de distribuição de água que compõe o sistema principal de Macapá, citadas a seguir:

- ETAM Estação Central - rio Amazonas
- PAC Sistema Pacoval
- PEP Sistema Perpétuo Socorro
- CUB Sistema Cuba do Asfalto
- COG Sistema Congós
- MUC Sistema Muca

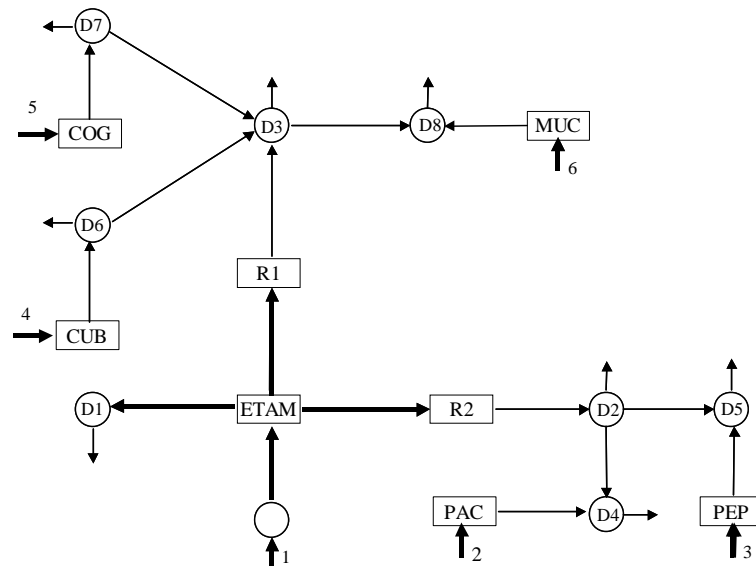


Figura 1 - Rede principal de abastecimento de água de Macapá

Sintetizando as informações obtidas a partir da Fig.1, o sistema urbano principal de água em Macapá possui:

- 6 captações (bombeamento captação / reservatório), numeradas de 1 a 6;
- 3 adutoras por recalque (bombeamento reservatório / reservatório), ETAM→R2, ETAM→R1 e ETAM→D1;
- 13 condutos de distribuição por gravidade (reservatório / distribuição);
- 8 reservatórios de distribuição;
- 8 pontos de distribuição (concentração do consumo);
- 1 decantador.

Os dados relativos ao comportamento da demandas de água e limites operacionais do sistema de água em Macapá foram fornecidos pela CAESA.

Consumo específico de energia elétrica nas bombas. O consumo específico de cada bomba foi calculado de acordo com as características das máquinas. Considerando todas as bombas trabalhando com a vazão nominal, o consumo específico de cada uma foi obtido através da divisão da potência da bomba (kW) pela vazão d'água nominal da mesma (m³/h).

As estações de bombeamento dos recalques que partem do reservatório ETAM possuem três bombas iguais operando em paralelo. Devido as perdas de carga no encanamento, a vazão de descarga não é linearmente proporcional ao número de bombas em operação. O ponto em que cada associação de bombas (uma, duas ou três) opera é obtido através da interseção da curva característica da associação com a curva da perda de carga do encanamento.

O sistema de água de Macapá não possui medição e monitoramento da rede necessários para o conhecimento da curva de perda de carga do encanamento, deste modo foi necessário que o comportamento da mesma fosse estimado. Os valores utilizados foram revisados por especialistas da própria companhia de água de Macapá.

A Figura 2 apresenta os valores, utilizados no modelo, correspondentes às parcelas de vazões de cada associação de bombas. A primeira curva característica de bomba refere-se a operação de apenas uma bomba, a segunda representa o resultado da associação de duas bombas em paralelo e por fim a terceira refere-se a situação da operação simultânea das três bombas.

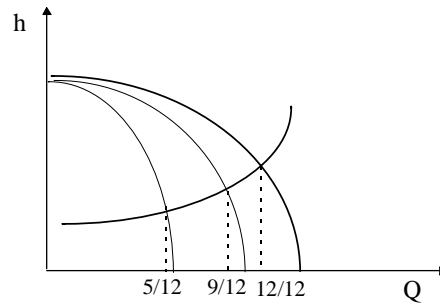


Figura 2 - Vazão \times altura manométrica do conjunto de bombas de recalque

Tomando a vazão total das três bombas operando em paralelo como referência, observa-se (Fig.2) que duas bombas em paralelo produzem juntas 9/12 desta vazão, e que apenas uma bomba é responsável por 5/12 da vazão total de saída.

A Figura 3 apresenta o gráfico de Potência \times Vazão dos conjuntos de bombeamento dos recalques, utilizando as proporções de vazão anteriormente apresentadas. Pelo gráfico (Fig. 3) observa-se que o consumo específico de energia do conjunto de bombas não é constante, e sim varia de acordo com a quantidade de bombas em operação; sendo menor para o uso de uma bomba e maior no caso de se ter as três bombas operando, originando desta forma um comportamento linear por partes da eficiência energética dos bombeamentos de recalque. Este fato sugere um procedimento para reduzir o consumo de eletricidade: acumular água nos reservatórios quando a demanda for baixa procurando evitar, desta forma, a operação simultânea das três bombas no horário de pico do sistema elétrico. O modelo desenvolvido busca exatamente otimizar este procedimento, minimizando o consumo de energia elétrica do sistema.

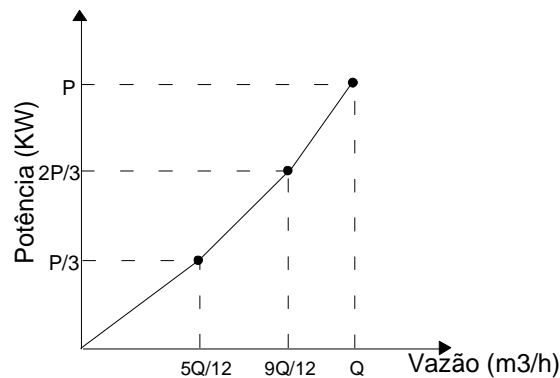


Figura 3 - Vazão \times Potência dos bombeamentos de recalque

Tarifa de energia elétrica. A CAESA paga à concessionária de energia elétrica local uma tarifa única, independente do horário de funcionamento das bombas, de R\$ 59,45/MWh.

A fim de verificar o comportamento do modelo face a uma tarifa horosazonal, ele também é resolvido com uma tarifa horosazonal de referência, que foi calculada com base na tarifa única que a CAESA paga à ELETRONORTE e proporcionalmente à *tarifa verde/A4 período úmido* cobrada pela CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz), mantidas as proporções entre o custo da energia elétrica na ponta e fora dela. Os valores da tarifa de referência encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Tarifa horosazonal de referência

Período	Tarifa (R\$/MWh)
Fora de ponta	28,28
Ponta	299,55

2.2 Resultados

Tarifa única. Utilizando-se a tarifa única de energia elétrica que a CAESA paga à ELETRONORTE, o modelo de otimização foi executado. Os resultados obtidos, de consumo de energia elétrica diário nas bombas e custo da energia elétrica que seria consumida pelo sistema, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados: caso base

Consumo (KWh)	14.042
Custo (R\$)	835

A Figura 4 mostra o comportamento da captação ETAM, do Rio Amazonas, derivado do modelo de otimização, e dos recalques ETAM→R2, ETAM→R1 e ETAM→D1, numerados respectivamente como 1, 2 e 3.

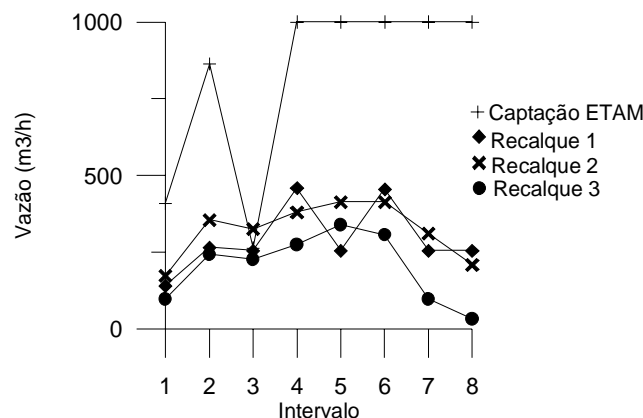


Figura 4 - Variação do bombeamento - caso base

A Figura 5 fornece informações quanto ao comportamento da variação no nível de água armazenado nos três grandes reservatórios (ETAM, R1 e R2).

Fazendo com que o limite mínimo admissível de água armazenado nos grandes reservatórios fosse estabelecido em 50% de sua capacidade máxima, a execução do modelo de otimização obteve os valores de consumo e custo de energia elétrica apresentados na Tabela 3. O limite mínimo de armazenagem dos reservatórios fornece uma medida de segurança da rede; quanto maior o volume armazenado menor o risco do sistema em uma situação emergencial.

Tabela 3 – Resultados: caso base com armazenagem mínima = 50%

Consumo (KWh)	14.085
Custo (R\$)	837

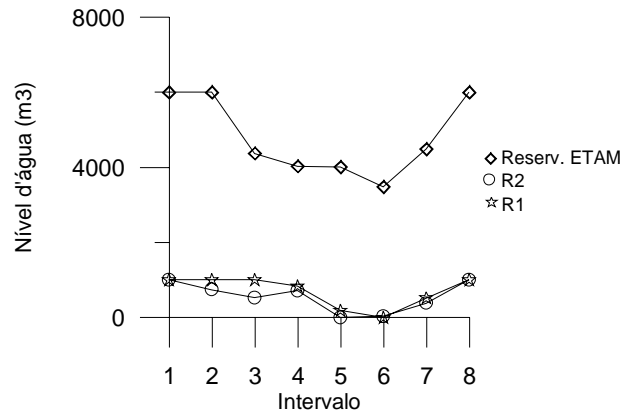


Figura 5 - Comportamento da armazenagem - caso base

Tarifa horosazonal. Com a utilização da tarifa horosazonal de referência a execução do modelo de otimização foi feita através de uma análise multiobjetivo, com o uso do método dos pesos (Steuer, 1989) para a busca das curvas de *tradeoff* Consumo × Custo de Energia Elétrica no sistema de água de Macapá.

O primeiro caso refere-se ao uso do modelo de otimização utilizando a tarifa horosazonal de referência, sem o estabelecimento de limites mínimos admissíveis de armazenagem nos reservatórios; os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados: caso horosazonal

Consumo (KWh)	14.042	14.095	14.113
Custo (R\$)	888	824	816

O primeiro par de resultados da Tabela 4 refere-se a execução do modelo dando prioridade para a minimização do consumo de energia elétrica, enquanto o terceiro, e último, par refere-se ao caso em que se prioriza a minimização dos custos da energia. Se o estudo fosse realizado pela empresa de energia elétrica na busca de economia de energia, provavelmente esta recomendaria à companhia de água operar no primeiro par da tabela, onde o consumo de energia elétrica é menor. Em contrapartida, se o interesse da companhia de água fosse a minimização dos custos, então a mesma escolheria operar no último par da Tabela 4.

A Figura 6 apresenta o comportamento da captação principal, ETAM, e dos bombeamentos de recalque deste caso. Sendo que novamente os recalques ETAM→R2, ETAM→R1 e ETAM→D1, foram numerados respectivamente como 1, 2 e 3. E o comportamento do nível de água armazenado nos grandes reservatórios encontra-se plotado na Figura 7.

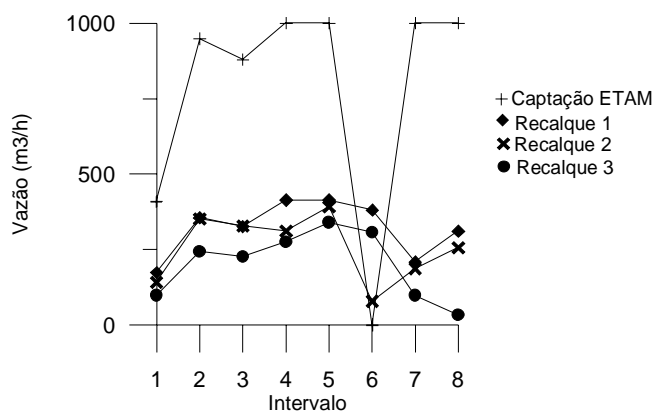


Figura 6 - Variação do bombeamento - caso horosazonal

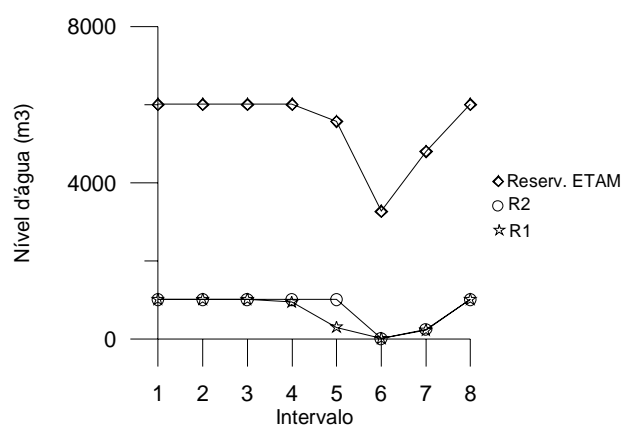


Figura 7 - Comportamento da armazenagem - Caso Horosazonal

Uma comparação entre os traçados das curvas dos bombeamentos e dos reservatórios, utilizando respectivamente a tarifa única de energia elétrica (Fig. 4) e uma tarifa horosazonal (Fig. 6), ajuda na compreensão sobre a metodologia de operação adotada pelo modelo. Quando se utiliza a tarifa horosazonal de referência, observa-se que no intervalo 6, em que a tarifa de energia é muito mais cara, o bombeamento na captação ETAM e no recalque 2 atingem seus valores mínimos. Isto é, neste intervalo o modelo faz com que estes bombeamentos não operem, utilizando a água anteriormente armazenada nos reservatórios, o que pode ser confirmado através de uma análise na Fig. 7. Por esta figura, observa-se que o modelo faz com o nível de água nos grandes reservatórios do sistema principal de água de Macapá se mantenham no máximo, para que, no horário em que a tarifa de energia elétrica é alta, a água armazenada possa ser utilizada, minimizando o bombeamento neste intervalo.

Fazendo com que o limite mínimo admissível de água armazenado nos grandes reservatórios, tomado como uma medida de segurança da rede, seja mantido em 50% de sua capacidade máxima, a execução do modelo com a utilização da tarifa horosazonal de referência gerou os valores de consumo e custo de energia elétrica, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados: caso horosazonal, lim. mín. = 50%

Consumo (KWh)	14.085	14.090	14.106
Custo (R\$)	923	902	878

3. SIMULAÇÃO OPERACIONAL

O modelo de otimização da rede de Macapá busca o uso racional de eletricidade através da minimização do consumo de energia elétrica no bombeamento. Para a verificação da funcionalidade do modelo faz-se necessário que os resultados, obtidos à partir do mesmo, sejam confrontados com os valores de consumo e custo da energia elétrica no sistema, derivados da atual regra de operação.

A companhia de água de Macapá possui apenas o histórico dos consumos anuais de energia elétrica do seu sistema, não estando estes valores discretizados em parcelas destinadas aos vários fins como iluminação e bombeamento. Com o intuito de avaliar o modelo, seria necessário o conhecimento do atual consumo médio diário de energia elétrica destinado particularmente às bombas. Outra dificuldade apresentada, reside no fato da CAESA não possuir os dados setorizados do consumo de energia elétrica na sua rede, o que seria de grande importância, dado que o modelo de otimização trabalha apenas com a parte principal do sistema de água de Macapá.

Visando a elaboração de um estudo comparativo coerente, o comportamento da operação do sistema de água de Macapá foi simulado. Para a simulação operacional utilizou-se uma política freqüentemente adotada, levando em conta todas considerações feitas no modelo, de forma a se obter valores que possam ser confrontados com os resultados obtidos através do modelo de otimização.

A política de operação adotada na simulação estipula que os reservatórios iniciem e terminem o dia completamente cheios e cada vez que o nível de água armazenada nos reservatórios esteja abaixo de 50% de sua capacidade total o operador toma a decisão de enchê-los novamente. Os sistemas periféricos (pequenos reservatórios) foram operados de forma independente, ou seja toda a demanda de água destas partes foram supridas pela captação relacionada a cada um deles. Acredita-se que esta política ainda esteja, em se tratando de eficiência, superior à atual feita pela companhia.

No estudo de simulação, o período diário foi dividido em oito intervalos de três horas cada, semelhante ao adotado no modelo de otimização e a execução da simulação foi manual. Tomou-se a representação topológica do sistema principal de abastecimento de água de Macapá nos oito intervalos diários analisados, para cada representação os dados de entrada utilizados foram as demandas diárias em cada ponto de distribuição. A partir daí, respeitando-se os limites operacionais do sistema e seguindo as metodologias adotadas, obteve-se os valores de consumo de água em cada ponto da rede de abastecimento. Os valores relativos aos bombeamentos foram posteriormente lançados em uma planilha do *software Excel*, de modo a se obter os respectivos consumo e gastos diários com energia elétrica no sistema.

3.1 Resultados

Efetuada a simulação operacional, os valores obtidos de consumo e custo diário com energia, utilizando a tarifa única que a CAESA paga à ELETRONORTE de R\$ 59,45/MWh encontram-se à seguir: energia (kWh) = 14.909; custo (R\$) = 886.

Realizando novamente a simulação, mas fazendo-se uso da tarifa horosazonal de referência (Tabela 1) os valores obtidos foram: energia (KWh) = 14.909; custo (R\$) = 1161.

4 – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A verificação da utilidade do modelo de otimização se faz através da comparação entre seus resultados, e aqueles advindos da simulação operacional, realizada com o fim de

representar o comportamento atual da operação na companhia de água de Macapá.

Tarifa única. Considerando que o limite mínimo admissível de água nos reservatórios seja equivalente a 50% da capacidade de cada um, a operação de acordo com o modelo traria, em relação aos resultados da simulação operacional, reduções no consumo e no custo da energia elétrica na ordem de 5.5%.

Deve ser ressaltado que a avaliação dos resultados provenientes do modelo de otimização foi feita através da comparação com resultados de uma simulação, que se acredita mais eficiente do que a atual gestão operacional da companhia de água de Macapá. Desta forma, espera-se que a redução real de consumo e custo de energia elétrica a ser obtida com a utilização do modelo, adaptado às condições reais, seja superior aos valores apresentados. Todavia a redução de, aproximadamente, 5% apresentada já seria desejável. Dado que em 1996, a companhia de água de Macapá teve um gasto de R\$ 480.327,00 com energia elétrica, uma economia de mais de R\$ 24.000,00 (5%), advinda apenas de uma adequada operação da maquinaria existente, deve ser bem recebida pela empresa.

Tarifa horosazonal. O uso da tarifa horosazonal de referência permite que seja feita uma análise multiobjetivo entre as funções de consumo e custo de energia elétrica. Considerando que o limite mínimo admissível de água nos reservatórios seja equivalente a 50% da capacidade de cada um, a operação de acordo com o modelo traria, em relação aos resultados da simulação operacional, reduções no consumo de energia elétrica na ordem de 5.5%, enquanto nos custos a redução varia de 20 a 24%.

No uso de uma tarifa com variação horária, o que se observa é que o modelo tem uma capacidade maior de redução de custos. Conforme discutido anteriormente, a partir do estabelecimento de um período em que a tarifa de energia elétrica seja mais cara, o modelo adota uma política de operação que faz com que as bombas minimizem os trabalhos nestes horários, utilizando a água armazenada ao longo do dia nos reservatórios.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os testes apresentados observa-se que a otimização operacional do bombeamento, em sistemas de abastecimento de água, constitui uma medida eficaz e rentável de conservação de energia elétrica. A operação otimizada do sistema proporcionaria à companhia de água um potencial considerável de redução nos custos operacionais sem a necessidade de investimentos de capital, como a aquisição de novas máquinas, por exemplo. Toda redução é conseguida somente através da operação adequada do maquinário já instalado.

Além de se apresentar como uma medida de conservação de energia, o modelo de otimização ainda pode ser utilizado como uma ferramenta de conhecimento da rede de água. Através do modelo é possível se prever o aumento dos custos em relação ao aumento da capacidade de armazenagem dos reservatórios, ou em relação ao aumento do nível de segurança do sistema, entre diversas outras aplicações.

Estudos futuros poderão sofisticar o modelo de otimização, de modo representar o comportamento da pressão na rede através das equações de perda de carga, desconsideradas na atual formulação, entretanto isto requer pelo menos um cadastro completo e atualizado da rede. Mesmo possuindo um caráter simplificado, o modelo de otimização deparou-se com grandes dificuldades em termos de seus requisitos de dados de entrada, exigindo a estimação de vários parâmetros, o que foi realizado em conjunto com o corpo técnico da CAESA.

REFERÊNCIAS

- Correia, P.B., 1988 Um modelo multisetorial para otimização do suprimento de energia : eletricidade, gás natural e cogeração com biomassa, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas / SP
- Diba, A., Louie P.W.F., MAhjouh M., Yeh W.W., 1995 Planned operation of large-scale water distribution system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, May/June v. 121, n° 3, pp. 260-269.
- Lansley, K.E., Awunah, K., 1994 Optimal pump operations considering pump switches. *Journal of Water Resources Planning and Management*, January/February v. 120, n° 1, pp. 17-35.
- Luenberger, D. G. 1984 *Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley Publishing Company: USA, Second Edition
- Nittivattananon, V., Sadowisk, E.C., Quimpo R.G., 1996 Optimization of water supply system operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Sept./Oct. v. 122, n° 5, pp. 374-384.
- Oliver, J., Putnam, C., 1997 Energy Efficiency: Learning how to avoid taking a bath on energy costs. *Water/Engineering & Management*, July v. 144, p. 22-25.
- Ormsbee, L.E., Walski, T. M., Chase, D.V., Sharp, W.W., 1989. Methodology for improving pump operation efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management*, March v. 115, n° 2, pp. 148-164.
- Sun, Y., Yeh, W.W., Hsu, N., Louie, P.W.F., 1995 Generalized network algorithm for water-supply-system optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Sept./Oct v. 121, n° 5, pp. 392-398.
- Steuer, R.E. 1989 *Multiple criteria optimization: theory, computation, and application*, Malabar : Krieger
- Zessler, U., Shamir, U., 1989 Optimal Operation of Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, November v. 115, n° 6, pp. 735-751.

Title: Electrical Energy Conservation in Water Supply Systems: Operational Optimization of Macapá's Network

Abstract. This paper presents a multicriteria optimization model for water supply systems pumping, with a case study in Macapá. The objective functions to be minimized are the demand and cost of electrical energy. To evaluate the results of this model, it was performed an operational simulation of the Macapá's water network. This simulation is supposed to represent the actual operation of the system. The results of the comparative analysis showed a reduction potential of about 5,5% in the electricity demand. In terms of the operational costs, the reduction varied from 5,5% to 24%, according to the adopted electrical energy tariff.

Keywords: Optimization, Pumping, Water supply, Electrical energy