

OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA ADUTOR DA CIDADE DE JOÃO PESSOA - BRASIL

Laudelino A. Pedrosa Filho¹; Heber Pimentel Gomes¹; Pedro L. Iglesias Rey²

Resumo - De uma maneira geral, os médios e grandes sistemas públicos adutores de água possuem um elevado número de bombas hidráulicas e válvulas de controle, tornando a definição de regras operacionais, para um período estendido, uma tarefa bastante complicada. Na maioria dos casos, os tomadores de decisão adotam no dia-a-dia uma política de caráter subjetivo, desconsiderando os processos voltados para a otimização global do sistema. Com base no simulador hidráulico EPANET, interligado a um programa de otimização econômica baseado no modelo matemático de Algoritmo Genético, está-se desenvolvendo uma ferramenta computacional que busque a solução de maior eficiência energética aplicável a um sistema de recalque complexo. A pesquisa está sendo aplicada ao sistema adutor de Marés, que abastece a cidade de João Pessoa, Brasil. Este trabalho apresenta os primeiros resultados dessa pesquisa envolvendo aspectos da sua calibração e alguns tópicos relacionados às dificuldades práticas de conseguí-la.

Abstract - The medium and large public systems of water pipelines usually have a high number of hydraulic pumps and control valves, thus making the definition of operational rules for an extended period a very complicated task. In most cases, decision-makers adopt a daily policy of subjective character, without considering the processes turned to the global optimization of the system. By using the EPANET hydraulic simulator interlinked to a program of economic optimization based on the mathematic model of Genetic Algorithm, a computational tool is being developed so as to look for a more efficient solution applicable to a pumping pipeline systems. The research is being applied to the water pipelines system of Marés, which supplies the city of João Pessoa, Brazil. This work presents the first results of this research involving aspects of its calibration and some topics related to the practical difficulties in obtaining it.

Palavras-Chave: Otimização de sistemas, simulação hidráulica, sistemas adutores.

Keywords: System optimization, hydraulic simulation, pumping systems.

¹ Universidade Federal da Paraíba - Departamento de Engenharia Civil - Cidade Universitária - CEP 58059 900 - João Pessoa - Paraíba (Brasil). Tel: (83) 3216 7355 - Fax: (83) 3216 7179. E-mail: laudelino@ct.ufpb.br; heber@ct.ufpb.br

² Universidad Politécnica de Valencia - Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente - Grupo Mecánica de Fluidos - Camino de Vera S/N CP E46022 – Valencia(España). Tel: (+34) 96 3879890 – Fax: (+34) 96 3877981. E-mail: piglesia@gmf.upv.es

INTRODUÇÃO

Com a crescente urbanização das cidades e o conseqüente aumento das demandas de água para abastecimento, os mananciais estão cada vez menos disponíveis para uso humano e cada vez mais distante das zonas urbanas. É comum ter-se mananciais a dezenas de quilômetros dos centros de distribuição. Esse fato impõe uma maior quantidade de estações de bombeamento em para transportar água desde as fontes produtoras até os centros de distribuição, resultando em elevados gastos com energia elétrica proveniente do funcionamento de muitos motores de médio e de grande porte instalados ao longo da linha de recalque.

Quanto mais extensa for a adutora, maiores serão os problemas de operacionalização do sistema em decorrência dos muitos elementos potencialmente sujeitos a mudanças de estados envolvidos no transporte da água. Uma vez que num dado intervalo de tempo se pode ter uma gama de possibilidades de políticas operacionais, as tomadas de decisão tornam-se bastante complexas fazendo com que o administrador não tenha pleno domínio do comportamento do sistema. Nesses casos, as regras operacionais implementadas ficam sujeitas a um grau maior de empirismo objetivando principalmente, a garantia da continuidade do abastecimento público, sem a preocupação de alcançar uma eficácia operacional e econômica do sistema.

Na grande maioria dos modelos o agendamento do estado de bombas e válvulas não leva em conta a preocupação com a economia de quilowatts gastos com os motores em funcionamento, nem com as diferentes tarifas horárias estabelecidas pela concessionária para grandes consumidores. Isso contribui para que o gasto com energia elétrica para as operações de bombeamento represente o segundo item mais significativo no orçamento das empresas do setor, sendo também a maior parcela de custos operacionais de um sistema de distribuição. Segundo LEITE (2003) e TSUTIYA (2004) mais de 90% dos gastos com energia elétrica devem-se às elevatórias dos sistemas de abastecimento público de água.

Diante dessa problemática, as empresas públicas ou privadas do setor estão despertando o interesse em melhorar a gestão da área operacional, implementando ações que visem o desenvolvimento de ferramentas de engenharia que procurem minimizar aqueles efeitos adversos, garantindo compreensão sistêmica do conjunto de elementos que compõem o sistema.

Na tentativa preencher essa lacuna, uma pesquisa aplicada à otimização dos custos energéticos de um sistema adutor real está sendo desenvolvida na cidade de João Pessoa - Paraíba. Apresenta-se neste trabalho os seus resultados preliminares, bem como uma descrição dos obstáculos encontrados para modelação hidráulica do sistema.

OBJETIVO

O objetivo geral do trabalho em andamento é o desenvolvimento de um sistema de suporte a decisão que direcione o gerenciamento das regras operacionais de sistemas de abastecimento de água em tempo estendido. Para tanto, um problema físico está sendo representado em um simulador hidráulico associado a um modelo de otimização estocástico, estabelecendo-se previamente uma série de restrições que a solução deve respeitar.

A ferramenta computacional resultante dessa pesquisa deverá apresentar aos tomadores de decisão dos centros de controle, a qualquer instante do dia, a melhor programação a ser seguida referente ao estado das válvulas (aberta, fechada ou parcialmente aberta) e estado das bombas (ligada/desligada) para certo horizonte de operação.

Espera-se que esse procedimento apresente destacada vantagem relativamente àquele que toma por base a política operacional gerada apenas nos valores dos níveis dos reservatórios em cada centro de distribuição, modelo que vem sendo empregado pela maioria dos sistemas públicos de água potável no Brasil e em muitos países do mundo.

- Dentre as vantagens da aplicação do modelo pesquisado, pode-se realçar:
- Modernização dos centros de controle operacionais (CCO);
- Aumento do grau de confiabilidade de procedimentos;
- Otimização das vazões aduzidas;
- Redução das despesas operacionais.

Como efeitos secundários da relevância do programa computacional pretendido, pode-se destacar:

- Exploração de cenários operacionais com políticas tarifárias de energia elétrica diferenciada;
- Simulação da melhoria de performance do sistema com pequenas variações na sua concepção.

O ESTADO DA ARTE

Devido as facilidades e a confiabilidade que o programa EPANET adquiriu nos últimos anos, ele vem sendo utilizado com sucesso em centenas de trabalhos e pesquisas espalhadas pelo mundo. Observa-se na literatura que são inúmeras as contribuições do EPANET no auxílio do modelamento hidráulico de sistemas de abastecimento de água, principalmente em pesquisas nas áreas de projetos de redes e calibração de modelos.

Quando se parte para a área operacional de sistemas reais de abastecimento d'água, o número de aplicações com o programa torna-se mais reduzido, devido às dificuldades que os pesquisadores se defrontam no levantamento de muitos dados cadastrais, grandes distâncias a serem percorridas, insuficiência de equipamentos adequados para medição e controle, e mobilização de um número grande número de técnicos de várias especialidades.

Já como módulo otimizador, a nova técnica dos Algoritmos Genéticos (AG's), a ser empregada nesta pesquisa, vem encontrando uma boa aceitação entre pesquisadores pelo fato de que se trata de uma metodologia que utiliza a otimização estocástica substituindo os métodos tradicionais de otimização (programação linear, programação não-linear e programação dinâmica) que são mais adequados para sistemas de pequeno porte. A aplicação dessas técnicas pode ser encontrada numa série de publicações (ZESSLER, 1989; ORMSBEE, 1994; BRION, 1991) entre outras.

Uma revisão da literatura sobre Algoritmos Genéticos aplicados a sistemas de abastecimento mostra que sua aplicação volta-se especialmente para redes de distribuição pressurizada, envolvendo o dimensionamento dos seus condutos, o posicionamento de válvulas de controle, intervenção em tubos com necessidade de reparos, além da calibração de modelos (SILVA, 2002; SCHAETZEN, 2000; HALHAL, 1997)

Quanto aos estudos de efficientização energética os AG's se fazem presentes no trabalho de (RIGHETTO, 2002), que apresenta uma metodologia para encontrar regras operacionais horárias satisfatórias quanto ao índice de desempenho do sistema. As variáveis de decisão no

modelo são: número de bombas em operação em cada elevatória; a velocidade rotacional das bombas e a condição de abertura das válvulas de controle de vazão. O modelo hidráulico usado baseia-se no Método das Características. O modelo foi aplicado a uma rede fictícia simples.

Um outro trabalho de destaque nessa área é o de (MACKLE,1995), que apresenta uma metodologia para programação diária de funcionamento de bombas levando em conta a estrutura tarifária local. O período de um dia foi dividido em 24 intervalos de uma hora, nos quais as bombas poderiam estar ligadas ou desligadas, sempre com uma rotação constante. Tratando-se de um estudo teórico com aplicação a um sistema fictício não foi quantificada a economia com energia elétrica pela aplicação da metodologia proposta.

Mais recente (CARRIJO, 2004) desenvolveu um modelo computacional para controle operacional ótimo para um sistema de distribuição real de água com o objetivo de otimizar gastos com energia elétrica e benefícios hidráulicos.

SISTEMA ESCOLHIDO

O sistema estudado é responsável pelo abastecimento de água de grande parte da região central da cidade de João Pessoa - Paraíba. É gerenciado pelo Centro de Controle de Operação - CCO, localizado próximo a Estação de Tratamento de Águas de Marés (ETA Marés) na fronteira com o município de Santa Rita - PB. Foi implantado na década de 40, sendo posteriormente ampliado na década de 70.

Linha Adutora

Tem origem numa elevatória de água tratada formada por três conjuntos moto-bomba, sendo dois de 500 CV operativos e um de 750 CV de reserva. O recalque se dá regularmente para dois centros de reservação e distribuição, denominados R1 e R2, situados no centro da cidade de João Pessoa.

A linha-tronco é formada por tubos de ferro fundido dúctil, DN 500 com 3.704 m de extensão seguido por 1.982 m de tubos de cimento-amianto com diâmetro 450 mm.

Centros de Distribuição

O centro de controle R1 é constituído por três reservatórios semi-enterrados totalizando 5000 m³, duas elevatórias abrigando dois conjuntos elevatórios cada, e um reservatório elevado com capacidade para armazenar 2.000 m³ de água. Abastece a zona alta do centro da cidade de João Pessoa e adjacências.

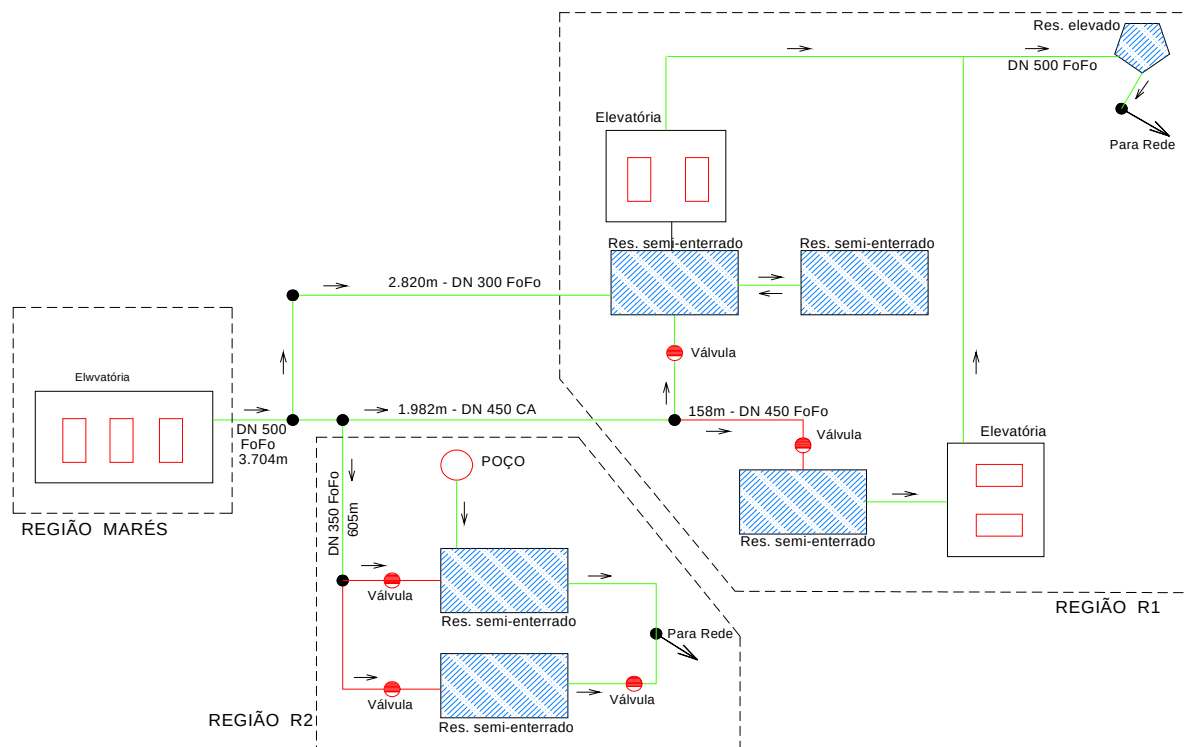


Figura 1- Esquema do sistema adutor Marés

O centro R2 é formado por dois reservatórios apoiados com 1.000 m^3 cada que distribuem água por gravidade para a zona central baixa da cidade, com predominância de características comerciais de consumo. Durante grande parte do dia esses dois reservatórios recebem reforço de um poço artesiano localizados nas suas proximidades.

No total, a modelação do sistema consta de quatro elevatórias, seis bombas operativas, cinco reservatórios apoiados e um reservatório elevado, além de um poço com bomba submersa. Trata-se de um sistema de abastecimento de água, de média escala, eminentemente urbano.

O estudo de caso em um modelo de médio porte deverá dar validação à metodologia a ser empregada, servindo de suporte a estudos maiores e mais complexos, nos quais a ordem de redução de custos de operação, foco principal deste trabalho, tenha uma maior magnitude.

METODOLOGIA

Para alcançar tais objetivos, pretende-se implementar um robusto processo de busca da melhor combinação de valores das variáveis de decisão (estado de bombas e válvulas) de forma a atender ao equacionamento matemático das leis que regem o processo físico, tendo como foco a minimização dos custos com energia elétrica sem prejuízo de atendimento das demandas nos centros de distribuição.

Para tanto, planeja-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de fácil manuseio, codificada na linguagem Visual Basic (VB6), que venha a ser um instrumento de auxílio aos tomadores de decisão que operam os médios e grandes sistemas adutores de água. A concepção de uma interface simples e amigável na área de gestão operacional estará

centrada no uso de dois módulos de trabalho: *módulo de simulação hidráulica e um módulo de otimização*. Esses módulos são interligados de forma a encontrar um cenário operacional que esteja nas proximidades do ótimo.

A partir do modelo físico da rede foi criado o modelo hidráulico, aproveitando-se as facilidades e simplicidade do programa EPANET2 (ROSSMAN, 2000) desenvolvido pela USEPA. Um programa gratuito, de código aberto, que já vem sendo utilizado para simulação do comportamento hidráulico de redes de distribuição em regime permanente. Além do programa executável, as funções presentes na biblioteca de vínculo dinâmico (DLL) do código fonte (*Toolkit*) do EPANET2, vêm sendo empregadas no desenvolvimento da interface computacional proposta.

O segundo módulo busca a solução mais eficiente em termos de minimização do somatório das potências diárias no eixo das bombas. A técnica estocástica dos Algoritmos Genéticos (GOLDBERG, 1989) escolhida como otimizador do problema possui uma elevada capacidade de superar as não linearidades inerentes as redes de recalque, além de possuir a robustez de analisar uma enorme gama de combinações viáveis, oferecendo ao final a melhor combinação de funcionamento de bombas e válvulas para um horizonte de operação, respeitando as restrições impostas.

Considerou-se como função objetivo as potências acumuladas nos eixos das bombas das três estações de bombeamento, incluindo a bomba do poço profundo da Região R2, numa perspectiva de promover a sua minimização. Para evitar a proliferação de soluções não desejadas, serão aplicadas penalidades de forma a restringir o espaço de busca descartando solução não viáveis operacionalmente.

No desenvolvimento do modelo, os dois módulos trabalharão em conjunto de forma que o modelo de simulação hidráulica seja repetidamente chamado para simular possíveis soluções individuais, geradas pela função do Algoritmo Genético na busca de alternativas de melhor performance dos gastos energéticos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E RESULTADOS PRELIMINARES

Uma pesquisa sobre o comportamento operacional de uma linha adutora de abastecimento de água abrange um campo de ação geográfica muito extenso, muitas vezes estendendo-se por vários municípios vizinhos. É imprescindível, portanto, dispor de uma boa estrutura de apoio humano e de equipamentos de medição alocados nas várias regiões cobertas pelas variáveis com o objetivo de monitorar a dinâmica do sistema. No caso particular estudado, essa estrutura foi emprestada pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba - CAGEPA, através de seus técnicos e dos equipamentos de macromedição disponíveis.

Como qualquer trabalho investigativo que se desenvolva no campo, dificuldade de várias naturezas se apresentam desde a escolha adequada do sistema adutor até a fase de simulação da sua operação no programa EPANET. Dentre as principais dificuldades enfrentadas no caso estudado, destacam-se:

- Cadastro do sistema incompleto e desatualizado. No arquivo técnico da Companhia de Abastecimento existem para consulta apenas dados de projeto;
- Levantamento em campo dos dados cadastrais em falta. O grande volume dos reservatórios traz um certo grau de complicação para coleta de suas medidas, principalmente nos reservatórios elevados;

- Diversidade de referenciais de níveis (RN's) topográficos. A uniformização deles foi feita com auxílio de um GPS topográfico para minimizar os erros de altitudes;
- Divergências no traçado e material dos condutos. Pela idade avançada do sistema, foram feitas consultas a técnicos mais antigos da empresa;
- Despreparo do pessoal técnico envolvido. Os operadores de plantão não se mostram interessados em fazer medições diversas com um melhor nível de precisão, fato que prejudica a fase de simulação;
- Inexistência de pontos de coleta de pressão e vazão ao longo da linha de recalque. Apenas na saída das elevatórias existiam derivações TAP o que é insuficiente para realizar um trabalho de calibração;
- Sistema não automatizado. Todas as leituras eram feitas manualmente por cada operador do centro de operação e repassadas via rádio para o CCO;
- Válvulas do tipo gaveta com idades avançadas prejudicando a estanqueidade das mesmas. Esse inconveniente dificulta a modelagem do sistema no simulador hidráulico;
- Uma das válvulas gaveta da Região R1 é utilizada diariamente como controladora de fluxo. A relação entre o coeficiente de perdas K e a vazão foi obtida a partir da curva de calibração apresentada na literatura especializada (AZEVEDO NETTO e ALVAREZ, 1973);
- Leitura horária dos níveis dos reservatórios por meio de réguas graduadas. A falta de precisão nas leituras horárias e os problemas decorrentes do conjunto bóia/roldana influenciam o comportamento da variação do nível da água ao longo do tempo;
- Levantamento do desempenho das estações de bombeamento: devido à inexistência de pontos de tomada de pressão nos barriletes adjacentes as bombas, as curvas reais de pressão x vazão foram levantadas a partir das características do sistema e dos dados de pressão e vazão medidos em derivações TAP existentes nas saídas de cada elevatória.

Todas as questões citadas acima, além de outras de menor importância têm interferência direta na qualidade do processo de simulação hidráulica da rede. Todas poderiam ter o alcance dos seus efeitos atenuados com a instalação de equipamentos adequados de macromedição em pontos estratégicos da rede, além de medidores eletrônicos de níveis d'água nos reservatórios.

RESULTADOS PRELIMINARES: SIMULAÇÃO

Antes de aplicar o Algoritmo Genético como ferramenta de otimização dos custos energéticos ao sistema adutor de Marés procedeu-se o confronto entre a variação de nível dos reservatórios para regras operacionais reais e a variação resultante da aplicação do simulador EPANET para as mesmas condições de contorno. Para tanto, coletou-se no Centro de Controle Operacional - CCO o histórico da regra operacional executada nos dias 04, 05 e 06 de outubro de 2005, dados que alimentaram as instruções *Controles Simples* do EPANET, proporcionando as correspondentes simulações diárias. Os dados de alimentação incluíam, a cada hora, os níveis dos vários reservatórios, o estado das bombas e válvulas, além da hora registrada de eventuais alterações no estados dos equipamentos.

Uma amostra do resultado dessa comparação para o dia 04/10/2005 pode ser vista na Figura 2.

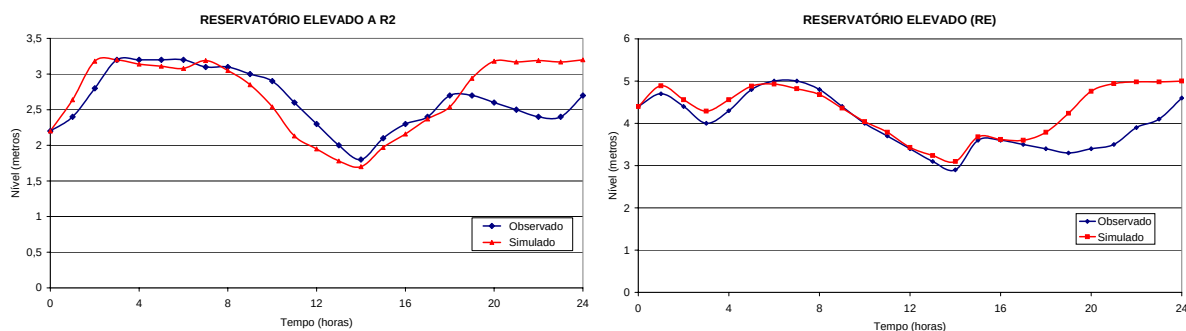


Figura 2 - Variação do nível d'água observado e simulado nos reservatórios elevado (RE) da Região R1 e no reservatório semi-enterrado AR2 da Região R2

A qualidade dos resultados obtidos engloba um número muito grande de fatores inerentes ao fenômeno do escoamento de fluidos em condutos sob pressão. Como a precisão entre o real e o simulado está relacionada com a precisão do conjunto de informações dos elementos que constituem o modelo, conclui-se que é de fundamental importância um inventário minucioso das características físicas e operacionais do sistema para que se obtenha resultados confiáveis e possa ser utilizado como instrumento de previsão.

Segundo (CESARIO, 1984), calibração é o processo de afinação de um modelo até a simulação das condições reais com um grau de exatidão estabelecido e para um horizonte de tempo especificado. No caso estudado, a calibração foi feita por tentativas considerando conhecida a vazão na saída de cada elevatória medida continuamente numa derivação TAP e definindo também o coeficiente de rugosidade dos condutos (2,5mm para ferro fundido e 0,1mm para cimento-amianto). O ajuste principal era feito nos valores do coeficiente de perdas das válvulas gaveta de forma a passagem de um fluxo que resultasse num nível de água nos reservatórios o mais ajustado com as condições reais observadas.

Essa metodologia se ajusta a escassez de instrumentação disponível, além da ausência de pontos de tomada de pressão em pontos de fronteira do sistema. Observa-se que devido a grande quantidade de válvulas tipo gaveta presente no sistema adutor, torna-se imprescindível o levantamento, no campo, das curvas, vazão versus grau de abertura das válvulas, para que o valor correto dessa grandeza seja um dos itens alimentadores das propriedades do elemento no EPANET. Para dificultar o processo de calibração, muitas dessas válvulas são utilizadas como elementos de controle de vazão, sendo imprecisa a posição da “gaveta” no interior da peça e por conseqüência indefinida o percentual de sua abertura. De uma maneira geral, o número de voltas no volante da válvula é que define o grau de abertura parcial da mesma. Dessa forma, para várias tentativas diferentes de proporcionar uma mesma abertura pode incorrer em enormes discrepâncias no valor resultante do coeficiente, K, e conseqüentemente valores de vazão bastante diferentes que terão influência direta na variação de nível d'água nos reservatórios.

Além disso, a curva de demanda diária das diversas áreas abastecidas concorre significativamente para um bom desempenho do processo de calibração. As curvas (Figura 2) foram obtidas segundo esse processo descrito de calibração e mostram uma boa concordância para duas regiões diferentes de abastecimento. Apenas no período noturno é preciso um melhor ajuste em algum parâmetro do sistema.

RESULTADOS ESPERADOS AO FINAL DO ESTUDO

Com os resultados da pesquisa espera-se dispor de um sistema de suporte a decisão que permita estabelecer regras de operação aplicáveis aos sistemas adutores de abastecimento de água, de forma a minimizar os custos operacionais com energia elétrica. Os resultados esperados serem obtidos por esta pesquisa coadunam-se com as metas do Programa de Combate ao Desperdício de Energia e Água em Saneamento Ambiental - PROCEL SANEAR, do sistema Eletrobrás, em consonância com as ações do PMSS (Programa de Modernização do Setor Saneamento) e o PNCDA (Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água) - ambos da Secretaria de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO NETTO, J.M.; ALVAREZ, G.A. (1973) “*Manual de hidráulica*”, v.1, 1973.
- BRION, L. M.; MAYS, L. W. (1991) “*Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems*”, J. Hydr. Engrg., ASCE, Volume 117, Number 11, Pages 1551-1569, 1991.
- CARRIJO, I. B. (2004) “*Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina*”, São Carlos. 233p. Tese Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 2004.
- CESARIO, A L.; DAVIS, J. O. (1984) “*Calibrating water system models*”, Journal AWWA, Volume 76, Number 7, Pages 66-69, 1984.
- GOLDBERG, D.E. (1989) “*Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*”. Addison-Wesley, 1989.
- HALHAL, D.; WALTERS, G. A.; OUAZAR, D.; SAVIC, D. A. (1997) “*Water Network Rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm*”. Journal of Water Resour. Plng. And Mgmt., ASCE, Volume 123, Number 3, Pages 137-146, 1997.
- LEITE, D.U. (2003) “*Panorama do uso de energia elétrica na CAGEPA*”, Relatório Técnico, Pages 1-32, 2003.
- MACKLE, G., SAVIC, D.; WALTERS, G. A. (1995) “*Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply*”, Proc., IEEE GALESIA Conf., Pages 400-405, 1995.
- RIGHETTO, A.M. (2002) “*Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água*”. Seminário: Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas. João Pessoa/Brasil, CD-ROM, 2002.
- ROSSMAN, A.L. (2000) “*EPANET 2.0 - Users manual*”. EPA - Environmental Protection Agency. 200p. Cincinnati, 2000.
- SCHAETZEN, W. B. F.; WALTERS, G. A.; SAVIC, D. A. (2000) “*Optimal sampling design for model calibration using shortest path, genetic and entropy algorithms*”. Urban Water, Volume 2, Pages 141-152, 2000.

- SILVA, F. G. B.; REIS L. F. R.; CALIMAN, R. O.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. h. (2002) “*Aplicação de método de determinação da rede de amostragem ótima para calibração de sistemas de abastecimento através de algoritmos genéticos*”. Seminário: Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas. João Pessoa/Brasil, CD-ROM, 2002.
- TSUTYIA, M.T. (2004) “*Abastecimento de água*”, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. 634p.
- ZESSLER, U.; SHAMIR, U.(1989) “*Optimal operation of water distribution systems*”. Journal of Water Resour. Plng. And Mgmt., ASCE, Volume115, Number 6, Pages 735-752, 1989.