

Modelo Híbrido para Redução de Consumo de Energia Elétrica Garantindo Manutenção de Pressões Mínimas de Serviço

Lubienska C. L. J. Ribeiro, Edevar Luvizotto Junior

Departamento de Recursos Hídricos (DRH) - FEC – UNICAMP

Recebido: 07/10/04 – revisado: 30/01/05 – aceito: 05/04/06

RESUMO

Na busca por regras operacionais otimizadas, para sistemas de abastecimento de água que se beneficiam da utilização de bombas de rotação variável, desenvolveu-se um modelo computacional para simulações em período extensivo capaz de estabelecer velocidades ótimas de rotação da bomba satisfazendo a objetivos pré-estabelecidos. O modelo computacional, Híbrido, usa um Modelo de Otimização como gerador e controlador das variáveis de decisão baseado nos Algoritmos Genéticos, em conjunto com um Modelo Hidráulico de simulação de operação de redes hidráulica a condutos forçados. No exemplo de aplicação apresentado objetivou-se a redução de consumo de energia elétrica, garantindo as pressões mínimas de serviço, comprovando a eficiência e eficácia da ferramenta proposta.

Palavras chaves: *Modelo Híbrido, Abastecimento de água, Algoritmos Genéticos.*

INTRODUÇÃO

Os recursos computacionais atuais tem possibilitado a modelação cada vez mais real dos problemas físicos e, as técnicas de simulação e otimização estão sendo incorporadas com sucesso por diversos pesquisadores dentro deste propósito. Dentro desta linha, neste trabalho preocupou-se em estabelecer uma ferramenta de modelação capaz de reduzir os gastos com energia elétrica em instalações de recalque.

Segundo Tarquin e Dowdy (1989), um dos itens mais caros nos orçamentos municipais, são os custos provenientes do bombeamento de água para distribuição.

Conforme Rodrigues e Luvizotto Jr. (2003) inversores de freqüência são adicionados aos sistemas de bombeamento com a função de manter a operação em níveis adequados ao pleno atendimento das demandas, evitando desperdícios ao proporcionar um melhor controle operacional, sobre as pressões e sobre o consumo energético, além da redução de manobras bruscas.

O modelo de simulação operacional denominado “Time Marching Approach” (TMA) foi empregado com sucesso por Luvizotto JR. (1995) na investigação de regras operacionais. Entretanto tal modelo de simulação não era capaz de forma isolada de buscar regras operacionais otimizadas. Os al-

goritmos genéticos empregados com sucesso em diversos problemas de otimização se mostravam uma possibilidade a ser investigada com este propósito. Daí surgiu a idéia da elaboração do esquema de ligação entre otimizador e simulador.

O esquema de ligação entre os módulos utilizados é o apresentado por Brion e Mays (1991).



Figura 1 - Conexão Otimizador – Simulador
(Fonte BRION e MAYS, 1991).

PROPOSIÇÃO GERAL

O objetivo deste trabalho é a elaboração de um modelo híbrido, para simulação, em período extensivo, de sistema de abastecimento de água contendo bombas de rotação variável, visando o estabelecimento das rotações ótimas que reduzam o consumo de energia elétrica e garantindo a manutenção de pressões mínimas de serviço (proposições

anteriormente investigadas por Wood e Reddy (1994)).

METODOLOGIA

A metodologia proposta consiste do acoplamento do modelo de simulação hidráulica (simulador) com um procedimento de otimização baseado nos Algoritmos Genéticos (otimizador) (Figura 2).

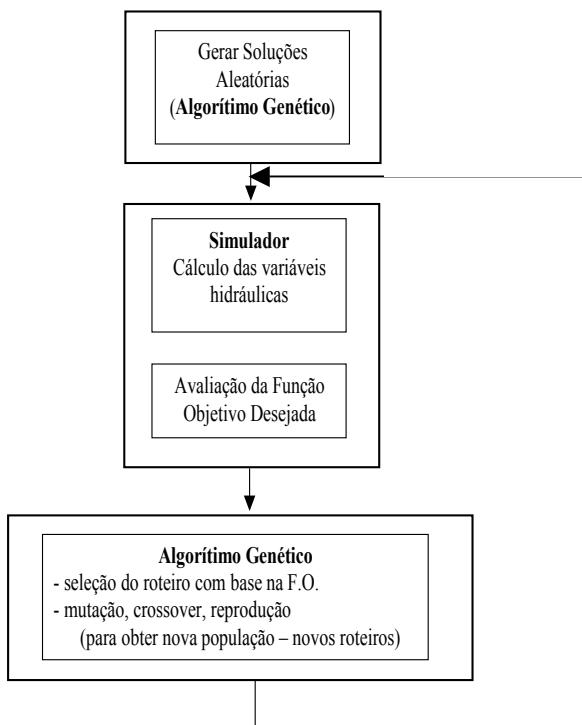


Figura 2 - Ligação entre os modelos que compõem o modelo híbrido.

- Modelo Hidráulico - o Simulador (TMA) e sua formulação

Uma rede para transporte de fluido em condutos forçados é constituída por elementos (ENOS), tais como; tubos, reservatórios, bombas e válvulas e, por NÓS, onde se interligam estes elementos (para efeito da modelagem se estará considerando que em um NÓ possa estar conectado a apenas um elemento que não seja um tubo). A estes NÓS poderão estar vinculadas demandas $D(t)$. Estabelecendo-se um sentido arbitrário considerado positivo, nos ENOS, qualificam-se os NÓS de montante N1 e

de jusante N2. Adotando-se um código de tipo T, para os ENOS que os identifiquem como um tubo, uma válvula, uma bomba ou um reservatório e um código de ordem I, que os identifique na instalação. Pode-se representar topologicamente cada ENO através dos vetores (I,T,N1,N2).

Nas redes hidráulicas, a transmissão de informação em um ENO tubo é obtida pela mudança da carga (H) e da vazão (Q) em cada ponto P, ao longo de seu comprimento, que se processam a cada instante t. Esta transmissão de informação mobiliza característica de inércia, resistência e elasticidade, do fluido em escoamento e da própria tubulação, de tal forma que as informações transmitidas à posição P, a cada instante, podem ser obtidas dos valores de carga e vazão nas posições A e B, num instante anterior, como é mostrado na Figura 3, de acordo com o método das características (MOC):

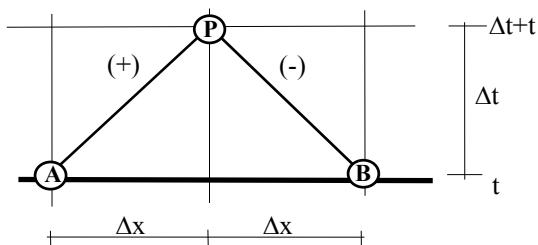


Figura 3 - Malha de cálculo (MOC).

$$H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_P|Q_A| \quad (1)$$

$$H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) + RQ_P|Q_B| \quad (2)$$

onde B é o termo de impedância e R a resistência da tubulação.

$$B = \frac{a}{gA} \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (3a,b)$$

e a é a celeridade, que é a velocidade com que a informação é transmitida, D é o diâmetro do tubo, A é a área da seção transversal da tubulação, f é o fator de atrito da fórmula Universal de perda de carga distribuída. Todas estas grandezas juntas representam as propriedades das tubulações e g representa a aceleração da gravidade.

A decodificação das informações enviadas por A na equação (1) e por B na equação (2) é feita no ponto P no instante $t+\Delta t$, na forma de (Q_P):

$$Q_P = (C_A - C_B) / (B_A + B_B) \quad (4)$$

onde B_A, B_B, C_A, C_B representam os valores

$$B_A = (B + R|Q_A|) \quad (5)$$

$$B_B = (B - R|Q_B|) \quad (6)$$

$$C_A = (H_A + B_A Q_A) \quad (7)$$

$$C_B = (H_B + B_B Q_B) \quad (8)$$

As informações assim propagadas de um instante para outro passam das extremidades dos tubos para os NÓS, genericamente representados na Figura 4, em que TC é o número de tubos que “convergem” para o NÓ e TD é o número de tubos que divergem do NÓ. Pode-se considerar que a um dado NÓ estejam vinculadas uma demanda $D(t)$ e uma vazão Q_{PE} de um ENO não tubo, associado a esse NÓ.

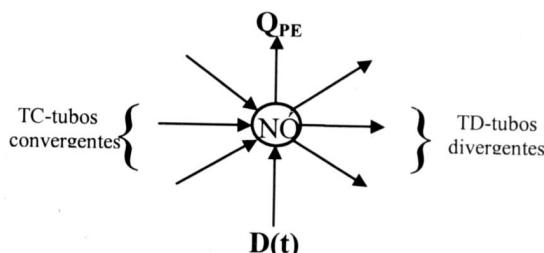


Figura 4 - Esquema de um NÓ genérico.

Da condição de continuidade no NÓ pode-se chegar facilmente a equação denominada equação do NÓ.

$$Q_{PE} = E_N - B_N H_P \quad (9)$$

onde, E_N e B_N totalizam as informações recebidas pelo NÓ, na forma:

$$E_N = \sum_{j=1}^{TC} \frac{C_A(j)}{B_A(j)} + \sum_{k=1}^{TD} \frac{C_B(k)}{B_B(k)} + D(t) \quad (10)$$

$$B_N = \sum_{j=1}^{TC} \frac{1}{B_A(j)} + \sum_{k=1}^{TD} \frac{1}{B_B(k)} \quad (11)$$

a demanda $D(t)$ é acrescentada em E_N como uma informação externa, que foi adicionada ao conjunto de informações internas recebidas pelo NÓ.

A vazão Q_{PE} representa uma resposta do ENO não tubo aos estímulos recebidos em seus NÓS de montante e de jusante. Esta resposta irá depender das características funcionais deste elemento, genericamente esquematizado na Figura 5.

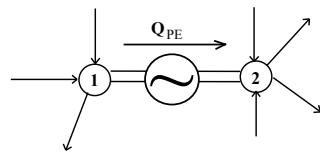


Figura 5 - Representação esquemática de um ENO não-tubo.

As informações recebidas dos NÓS podem ser escritas na forma dos parâmetros E_E e B_E , que mobilizam a resposta do ENO não tubo na forma:

$$H_{PE} = E_E - B_E Q_{PE} \quad (12)$$

onde:

$$E_E = \frac{E_{N1}}{B_{N1}} - \frac{E_{N2}}{B_{N2}} \quad \text{e} \quad B_E = \frac{1}{B_{N1}} - \frac{1}{B_{N2}} \quad (13a,b)$$

e H_{PE} a diferença de carga entre os NÓS de montante e de jusante.

Observando a equação (12) nota-se que a resposta aos estímulos que chegam ao NÓ devem ser combinadas às características funcionais do ENO não tubo para que se possa obter a resposta ao estímulo. Estas características podem ser expressas de forma genérica como:

$$H_{PE} = H_{P1} - H_{P2} = \varphi(Q_{PE}) \quad (14)$$

desta forma pode-se dizer que os estímulos recebidos, traduzidos pela equação (12) em conjunto com a característica funcional, fornecerá a resposta:

$$\text{Resposta} = F(Q_{PE}) = \varphi(Q_{PE}) + B_E Q_{PE} - E_E = 0 \quad (15)$$

Para um ENO não tubo genérico que não acumule massa, a equação particular, $\varphi(Q_{PE})$ é conhecida, normalmente, como uma forma quadrática do tipo $H_{PE} = aQ_{PE}^2 - bQ_{PE} + c$, e pode ser substituída na equação (15) resultando em:

$$Q_{PE}|Q_{PE}| + FQ_{PE} + G = 0 \quad (16)$$

onde os valores de F e G são determinados para cada instante de cálculo para cada um dos elementos segundo sua característica (coeficientes a , b e c). A solução desta equação é dada por:

$$Q_{PE} = -\frac{2G}{F + \sqrt{F^2 + 4|G|}} \quad (17)$$

Esta resposta é dada ao sistema através dos NÓS de montante e de jusante através da equação (9), que realimenta o processo cognitivo.

Quando a análise é focada na obtenção do regime permanente, ou período extensivo, pode-se utilizar o fato de que a impedância $B = a / gA$, não tem significância e pode ser substituída utilizando a celeridade $a = L/\Delta t$, em que L é o comprimento do tubo, por:

$$B = \frac{L}{gA\Delta t} \quad (18)$$

Seguindo a sugestão de Shimada (1989), pode-se substituir os tubos da rede de comprimento L_i , e coeficiente de atrito f_i , por tubos equivalentes com comprimentos comuns L_0 (usualmente 100 m) e um correspondente coeficiente de atrito dado por:

$$f_i^* = \frac{f_i L_i}{L_0} \quad (19)$$

Este procedimento acelera a convergência do procedimento de cálculo para o regime permanente.

- Condição de contorno máquina de rotação variável

Como apresentado, a solução dos contornos representados pelos elementos não-tubo é feita com base em uma **equação geral** (12) e em uma **equação particular** (14), característica do elemento. A combinação destas duas equações resulta na **equação do ENO não-tubo**, representada de forma genérica pela equação (15), com solução dada por (17) para os

casos de interesse desta pesquisa. Um exame destas equações mostra que para a solução do ENO não-tubo, ou seja, a determinação da vazão Q_{PE} e das cargas em seus NÓS de montante e de jusante, será necessária a determinação das constantes F e G, obtidas em função das características particulares do elemento, onde os valores a , b e c são valores característicos do ENO.

A potência transmitida ao eixo de uma bomba é de interesse, quando se está preocupado em avaliar a eficácia operacional da instalação (determinação do consumo). Empregando-se um polinômio do segundo grau como função de ajuste da curva PxQ:

$$P = a_1\alpha^3 + \frac{b_1}{z}\alpha^2 Q_B + \frac{c_1}{z^2}Q_B^2 \quad (20)$$

para bombas z com rotação variável em paralelo, onde $\alpha = N/N_R$. (N rotação Instantânea e N_R rotação de referência)

Os valores de a_1 , b_1 e c_1 são obtidos a partir de três pontos da curva de **potência x vazão**, usualmente os pontos S, R e T, ou seja, o ponto associado a situação de Shut-off, ponto S, o ponto associado à condição de máximo rendimento, ponto R e um outro qualquer, ponto T, como indicado na Figura 6. Neste caso os valores de a_1 , b_1 e c_1 podem ser obtidos através das equações:

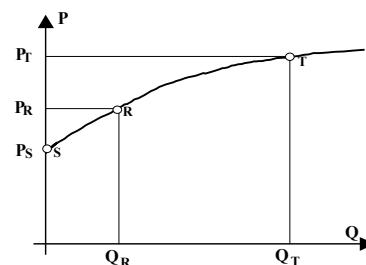


Figura 6 - Curva Potência no eixo x vazão.

$$a_1 = P_S \quad (21)$$

$$b_1 = \frac{(P_S - P_R)Q_T^2 - (P_S - P_T)Q_R^2}{Q_T Q_R^2 - Q_R Q_T^2} \quad (22)$$

$$c_1 = \frac{(P_S - P_T)Q_R - (P_S - P_R)Q_T}{Q_R Q_T^2 - Q_T Q_R^2} \quad (23)$$

Desta forma, com o valor de Q_{PE} obtido para o bombeamento, pode-se obter o valor da potência no eixo da bomba $P(Q_{PE})$.

- Modelo de Otimização - os Algoritmos Genéticos

Em sua obra "A origem das espécies", Charles Darwin apresenta a teoria da evolução, segundo a qual, depois de muitas gerações os organismos vivos evoluem de acordo com os princípios da seleção natural, com a sobrevivência dos mais aptos.

Segundo Goldberg (1989) os algoritmos genéticos foram criados por John Holland nos anos 60 e desenvolvidos por ele, seus alunos e colegas, na Universidade de Michigan. Em seu livro "Adaptação em Sistemas Naturais e Artificiais", Holland apresenta os algoritmos como uma abstração da teoria e evolução de Darwin. Em sua concepção, se este procedimento trabalha bem na natureza, poderá ser possível simular a evolução natural e tentar obter um método que possa resolver problemas concretos de pesquisa operacional ou otimização. Esta foi a idéia original dos Algoritmos Genéticos.

Como os algoritmos genéticos são diretamente derivados da evolução natural, para um melhor entendimento da teoria é importante o conhecimento da terminologia empregada na genética para utilizá-la com os Algoritmos Genéticos.

As estruturas que armazenam as informações de com será o indivíduo recebem o nome de cromossomos. O cromossomo pode ser dividido em segmentos chamados genes, que são considerados a unidade básica do cromossomo e, juntos, carregam todas as características que o organismo pode ter.

A recombinação cromossômica (crossover) é o fenômeno que acontece durante a meiose. O que ocorre, é que uma parte de um cromossomo pode ser trocada por outra parte do cromossomo homólogo, fazendo com que alelos, que antes pertenciam ao mesmo cromossomo, passem a pertencer a cromossomos distintos.

A hereditariedade é uma força conservadora que confere estabilidade a sistemas biológicos. Contudo, nenhum mecanismo composto de moléculas e sujeito ao impacto do mundo físico pode ser perfeito. Erros na cópia produzem seqüências alteradas de DNA – mutações – que são perpetuadas. Mutação é um termo vago, que é freqüentemente definido como uma mudança na seqüência de pares de base de um gene, mas às vezes o termo é usado de maneira mais ampla, de modo a incluir mudanças no número e estrutura dos cromossomos. A mu-

tação representa a matéria prima da evolução (Carrijo, 2004).

- O Modelo Híbrido

A metodologia baseia-se na geração aleatória de uma população de P indivíduos, cada indivíduo caracterizado por um único cromossomo. Cada um destes cromossomos decodificado representará um conjunto de 24 valores de rotação adimensional de uma bomba.

A idéia utilizada é caracterizar cada rotação através de um conjunto de 4 alelos (na forma de 4 bits), o que permite armazenar um número em formato binário no intervalo de 0 a 15. A estes valores se associa-se a seguinte tabela de rotações adimensionais (α) (Tabela 1).

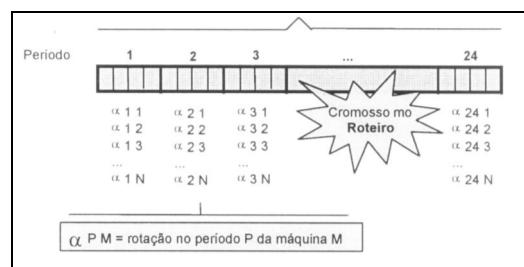


Figura 7 - Esquema de um cromossomo com o roteiro operacional de um cenário de 24 horas.

Tabela 1 - Tabela de rotações adimensionais.

Cromossomo (Nº binário)	Valor de α
0	1.200
1	1.175
2	1.150
3	1.125
4	1.100
5	1.075
6	1.050
7	1.025
8	1.000
9	0.975
10	0.950
11	0.925
12	0.900
13	0.875
14	0.850
15	0.825

Fica estabelecido através de cada cromosoma, o roteiro operacional das estações de bombeamento ao longo de um cenário de 24 horas, com possíveis modificações horárias do “status” da bomba.

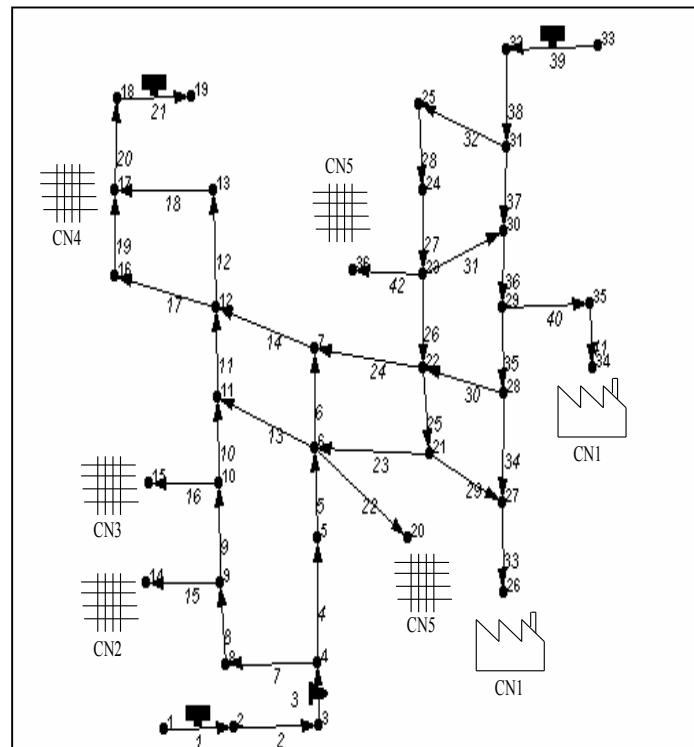
A proposição empregada é a geração de uma população de P indivíduos, ou seja, de roteiros factíveis, para serem utilizados como dados de entrada do simulador. O simulador avalia cada roteiro retornando as variáveis de estado correspondentes que permitem avaliar a função objetivo imposta. As restrições que não são atendidas penalizam o resultado da função objetivo.

A esta condição é associado um rendimento global (bomba/motor) e um custo energético (k-Wh), segundo tarifa adotada. Calculando assim o custo energético no período (N).

Portanto o mérito de cada regra operacional é fornecido pela função objetivo (F.O.), passa a ser então a busca do mínimo valor de F.O., respeitando as restrições operacionais, tais como níveis dos reservatórios, pressões nodais, vazões de demandas e outras.

De posse dos indivíduos (roteiros) e de sua adequação (avaliação de suas funções objetivo), a rotina de AG, que resultará em uma nova geração de P indivíduos para reiniciarem o processo com novas simulações, repetindo o procedimento descrito, num ciclo iterativo, até um número G de gerações pré-estabelecidas.

5, 6, 8, 9, 10, 11, 14 e 15 para aplicar a penalização, por apresentarem flutuações mais elevadas de pressões. Foram fixados os valores de 59mH₂O e 17mH₂O para a pressão máxima e mínima, respectivamente.



Exemplo – Minimização das Pressões nos Nós

A rede analisada é composta por três reservatórios, uma estação de bombeamento com 2 bombas operando em paralelo e 38 tubos (Figura 8). A sete Nós vinculam-se demandas setoriais. Os dados referentes aos elementos utilizados estão apresentados na Tabela 2.

As características da bomba utilizada estão apresentadas na Tabela 3, os níveis máximo e mínimo dos reservatórios na Tabela 4 e as demandas nodais médias estão indicadas na Tabela 5.

As curvas neutras utilizadas para modelar as demandas nos pontos de consumo do sistema são apresentadas na Figuras 9.

Para avaliar o potencial do modelo desenvolvido para manutenção de pressões mínimas de serviço, tomou-se uma função objetivo penalizada de tal forma que as pressões em alguns nós estivessem dentro de alguns limites. Foram escolhidos os nós 4,

Figura 8 - Topologia da rede usada (Simulador).

A função objetivo pode ser expressa como:

$$F.O. = \text{Min} \sum_{i=1}^{NP} S * C_i * \eta_i * P_i \quad (24)$$

onde, S é a penalização das pressões de serviço,

$$S = \frac{\sum_{i=1}^9 V_i}{9} \quad (25)$$

Tabela 2 - Dados da rede - Tubulações.

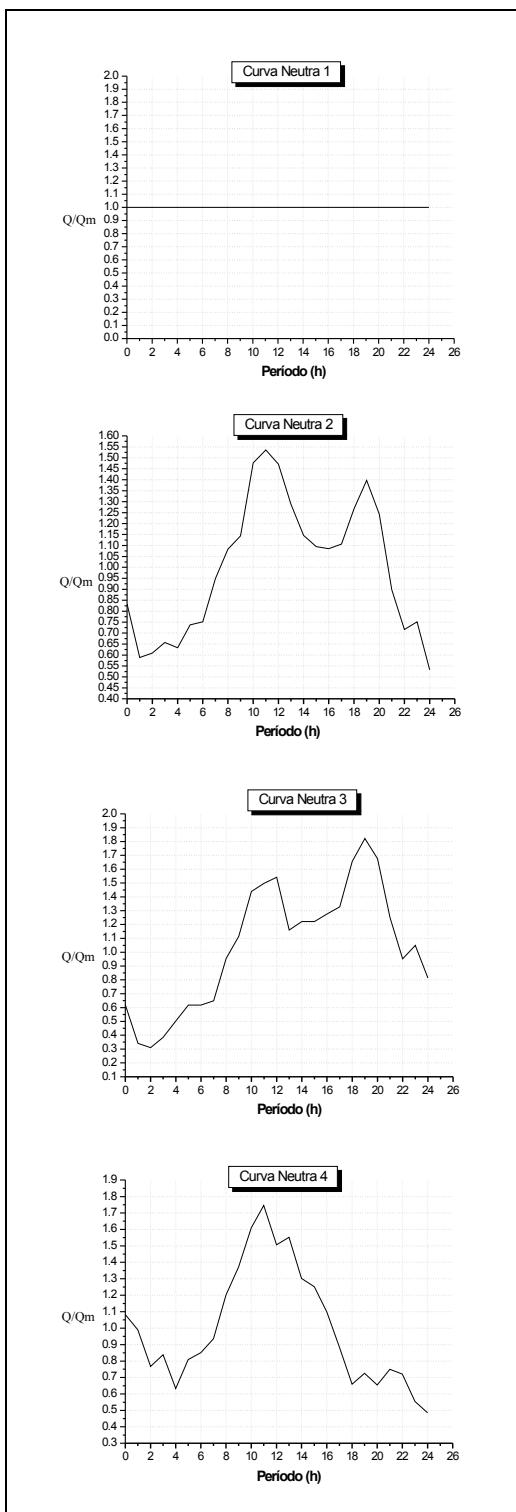


Figura 9 - Curvas de demandas admensionais

ENO	N1	N2	L (m)	D (mm)	C
2	2	3	100	600	100
4	4	5	500	350	100
5	5	6	550	350	100
6	6	7	500	300	100
7	4	8	800	450	100
8	8	9	500	450	100
9	9	10	550	400	100
10	10	11	500	250	100
11	11	12	350	250	100
12	12	13	1200	250	100
13	6	11	900	250	100
14	7	12	900	250	100
15	9	14	200	350	100
16	10	15	200	350	100
17	12	16	1500	250	100
18	13	17	1500	250	100
19	16	17	1100	250	100
20	17	18	500	500	100
22	6	20	400	350	100
23	21	6	800	200	100
24	22	7	850	200	100
25	22	21	550	200	100
26	23	22	600	200	100
27	24	23	550	250	100
28	25	24	500	250	100
29	21	27	600	200	100
30	28	22	600	200	100
31	30	23	600	200	100
32	31	25	600	350	100
33	27	26	400	350	100
34	28	27	500	350	100
35	29	28	400	350	100
36	30	29	300	400	100
37	31	30	550	400	100
38	32	31	600	450	100
40	29	35	400	350	100
41	35	34	400	350	100
42	23	36	300	350	100

Tabela 3 - Dados da rede - Bomba.

ENO	N1	N2	Hs	Qr	Hr	Qt	Ht	N. B.	D
3	3	4	65	250	50	500	15	2	600

*a bomba opera com rotação nominal de 1750 rpm

Tabela 4 - Dados da rede - Reservatórios.

ENO	N1	N2	Nível Inicial (m)	Nível máximo (m)	Nível Mínimo (m)	Área (m²)
1	1	2	727	730	726	800
21	18	19	747	750	746	800
39	35	34	775	778	774	800

Tabela 5 - Dados da rede - Demanda Nodais Médias.

Nó	Demandas (l/s)	Curva Neutra
	(l/s)	
1	-350	1
14	85	2
15	71	3
17	74	4
20	90	5
26	120	1
33	-300	1
34	120	1
38	90	5

Vé calculado da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{ll} Vi = 1 & \text{se} \dots P_{iMin} < P_i < P_{iMax} \\ \end{array} \right. \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} Vi = \beta * \left(1 + \left(\frac{P_{iMin} - P_i}{P_{iMin}} \right) \right) & \text{se} \dots P_i < P_{iMin} \\ \end{array} \right. \quad (27)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} Vi = \beta * \left(1 + \left(\frac{P_i - P_{iMax}}{P_{iMax}} \right) \right) & \text{se} \dots P_i > P_{iMax} \\ \end{array} \right. \quad (28)$$

sendo β a equação:

$$\beta = \gamma \left(1 + \left(\frac{Ng - g}{Ng} \right) \right) \quad (29)$$

onde, γ é um valor arbitrário, Ng o número de gerações e g a geração no instante em que se aplica a penalização. Portanto β tem valor grande no início e vai reduzindo ao longo das gerações.

Foi utilizado um total de 200 gerações, cada uma com 10 indivíduos, utilizando-se de um processo de eletismo com taxa de 0,3. Foi adotado uma taxa de mutação de 0,03 e de crossover de 0,8 na alimentação do procedimento genético (os valores adotados seguem os indicativos da literatura) (OBITKO, 1998).

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o modelo estão apresentados nos gráficos que seguem. Observa-se que o modelo híbrido encontrou um roteiro (com bomba de rotação variável) bem distinto do roteiro original (bomba com operação fixa), porque foi realizada uma busca com o objetivo de atender a redução do consumo de energia elétrica, garantindo as pressões mínimas de serviço.

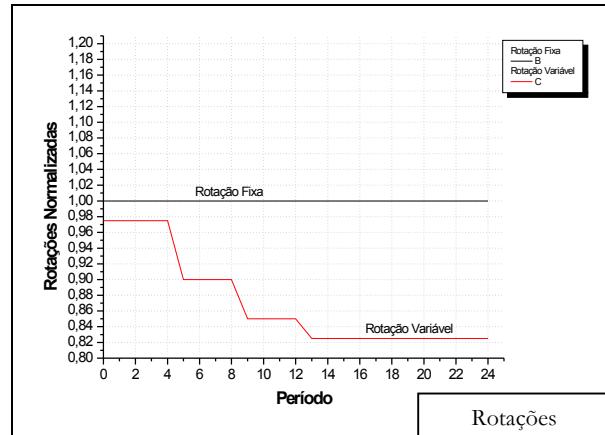


Figura 10 - Cenário de rotações encontrado através da aplicação das penalidades.

Como o modelo se preocupou em penalizar as pressões em alguns nós escolhidos, a busca foi realizada, e através do roteiro encontrado todos as pressões nos nós escolhidos passaram a ser obedecidas.

Conseqüentemente o custo de operação foi reduzido, pois o custo total ao longo das 24 horas para o sistema trabalhando com a bomba de rotação fixa corresponde a 12022,52um (um - unidade de medida), e para o sistema trabalhando com rotação variável corresponde a 7759,14um. Significa que com a bomba de rotação variável, mesmo após aplicação de penalidades, o sistema conseguiu diminuir o custo em aproximadamente 35%.

O resultado da busca pode ser verificado através das Figuras 11 até Figura 19, onde estão apresentadas todas as pressões dos períodos de cada Nó para o sistema trabalhando com rotação fixa e com penalizações. O custo energético também pode ser observado na Figura 20. A vazão da bomba pode ser observada na Figura 21.

Diante da metodologia utilizada, ficam evidenciadas as possibilidades de redução de consumo

energético das estações elevatórias com o uso da ferramenta desenvolvida.

As rotinas que compõem o algoritmo citado mostraram-se adequadas para a busca de soluções otimizadas. No exemplo avaliado fica claro o potencial da técnica e ainda possibilidade de utilizá-la para diversas condições operacionais objetivadas, mostrando que o uso da ferramenta para demais situações operacionais se dá apenas pela mudança da função objetivo e não nos módulos principais da simulador e otimizador. Assim, topologias e situações operacionais podem ser alteradas sem a modificação dos módulos principais. Estas outras topologias e situações operacionais não puderam ser observadas neste trabalho e estão sendo alvo da continuidade dos estudos.

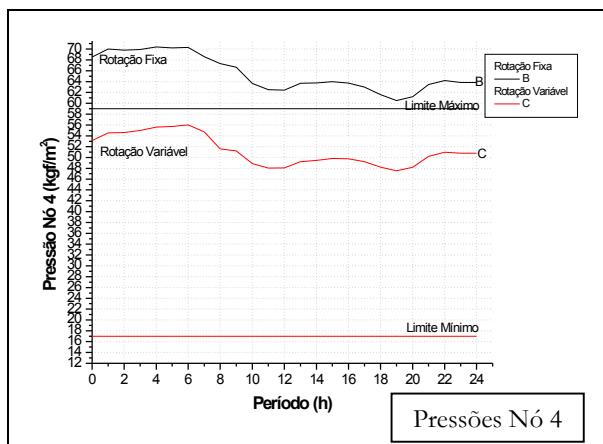


Figura 11 - Pressões Nô 4 sem aplicação e após aplicação da penalização.

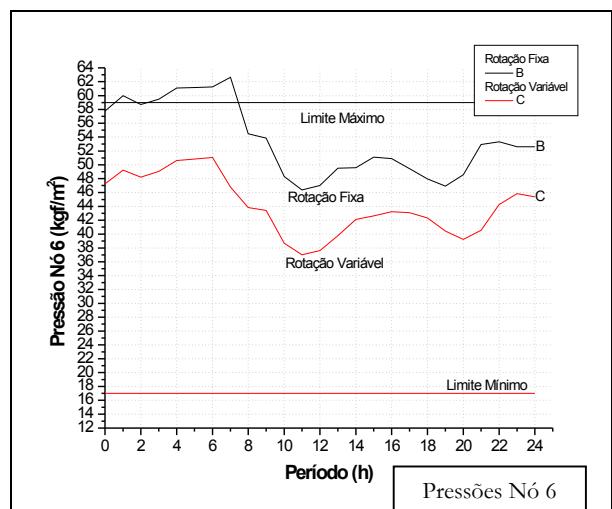


Figura 13 - Pressões Nô 6 sem aplicação e após aplicação da penalização.

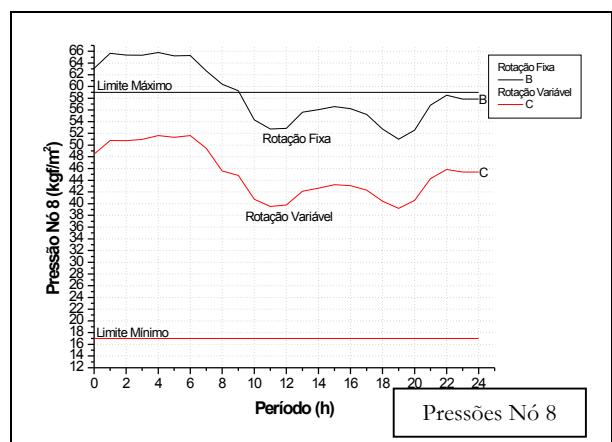


Figura 14 - Pressões Nô 8 sem aplicação e após aplicação da penalização.

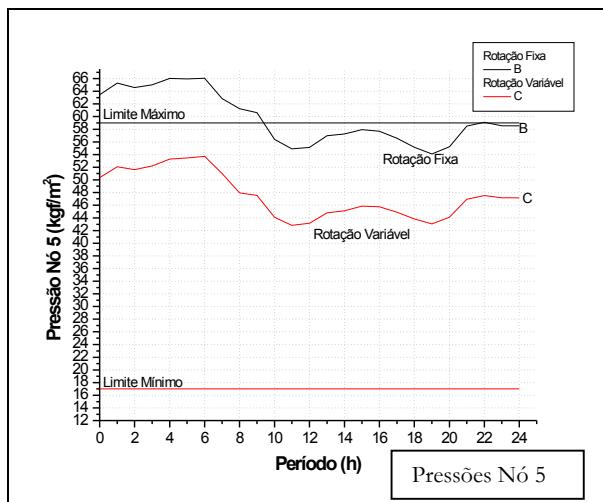


Figura 12 - Pressões Nô 5 sem aplicação e após aplicação da penalização.

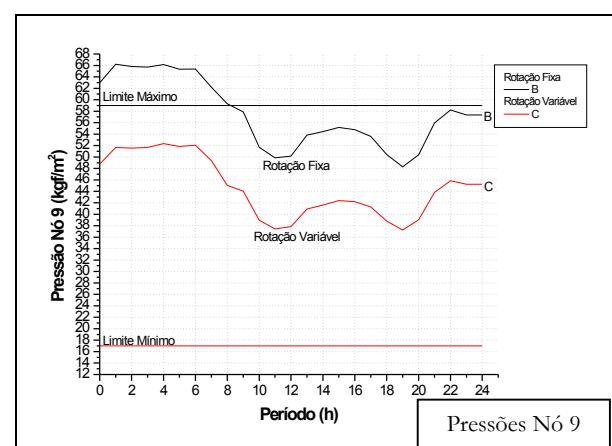


Figura 15 - Pressões Nô 9 sem aplicação e após aplicação da penalização.

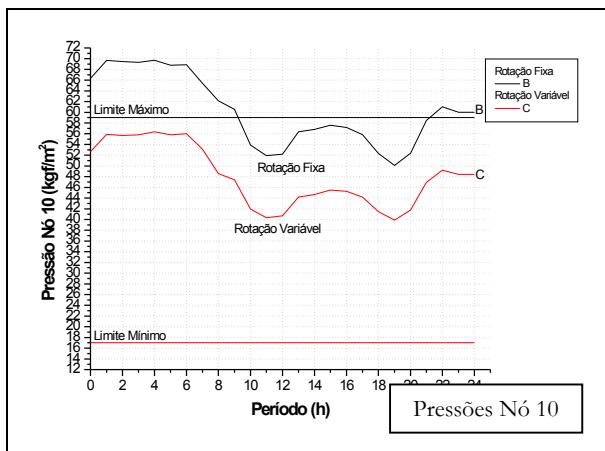


Figura 16 - Pressões Nô 10 sem aplicação e após aplicação da penalização.

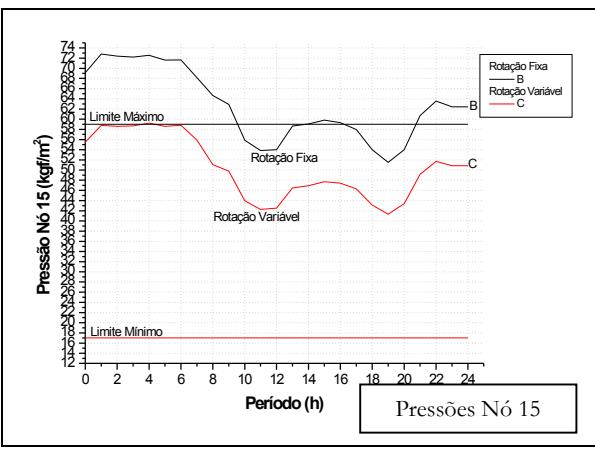


Figura 19 - Pressões Nô 15 sem aplicação e após aplicação da penalização.

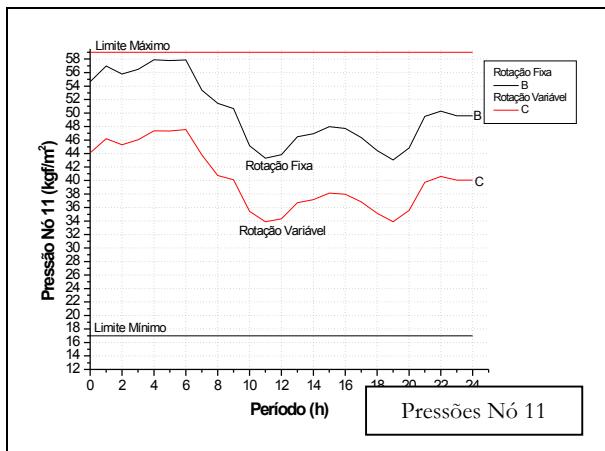


Figura 17 - Pressões Nô 11 sem aplicação e após aplicação da penalização.

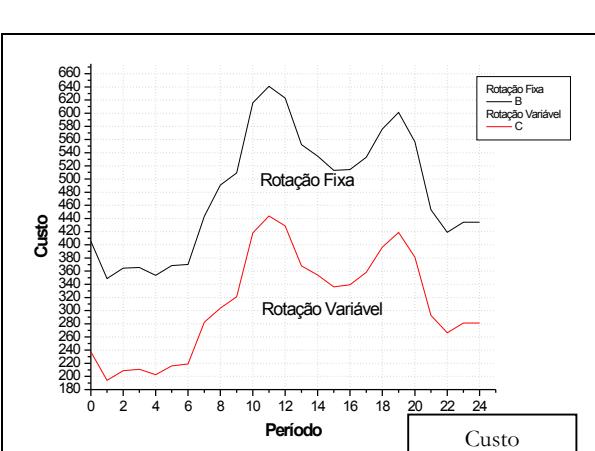


Figura 20 - Custo energético após aplicação da penalização.

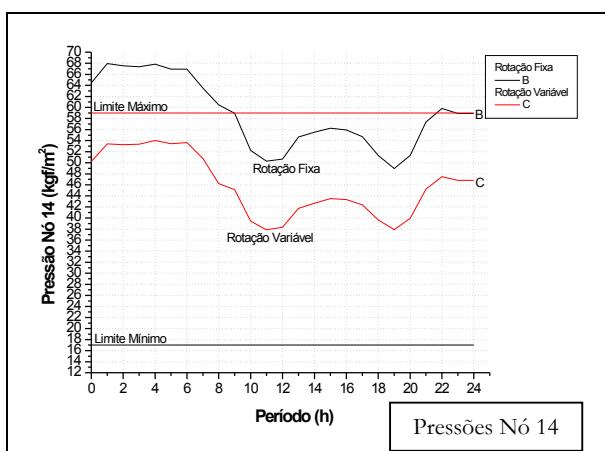


Figura 18 - Pressões Nô 14 sem aplicação e após aplicação da penalização.

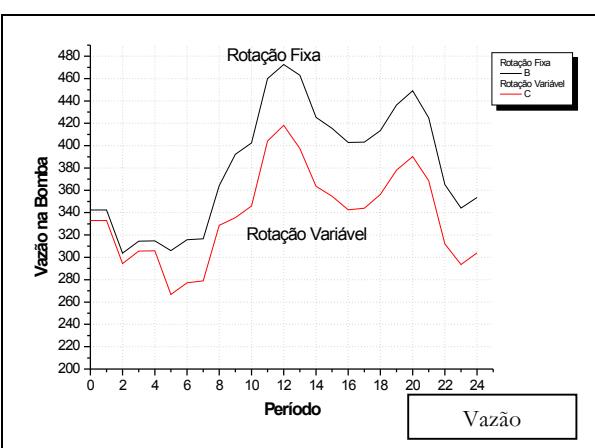


Figura 21 - Vazão da bomba após aplicação da penalização.

REFERÊNCIAS

- BRION, L. M., MAYS, L. W., *Methodology for optimal operation of pumping station in water distribution system*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 117, No. 11, pp. 1551 – 1589, 1991.
- CARRIJO, I., B., *Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina - Tese de doutorado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo*, 2004.
- GOLDEBERG, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learn* - Assison-Wesley, 1989.
- LUVIZOTTO JR., E., *Controle Operacional de Sistemas de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador - Tese de doutorado apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo* - 1995.
- OBITKO, M. (1998, August-September). Introduction to Genetic Algorithms. URL <http://cs.felk.cvut.cz/~xobitko/ga/index.html> [on line]. Czech Technical University.
- RODRIGUES W., LUVIZOTTO JR E., *Inversor de Frequência em Sistemas e Bombeamento*, 33^a Assembléia da ASSEMAE, 2003.
- SHIMADA, M., *Time-Marching approach for pipe steady flows*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 11, Novembro, pp. 1301-1320, 1989.
- TARQUIN, A. J., DOWDY, J., *Optimal Pump Operation in Water Distribution*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(2), 158-168, 1989.
- WOOD, D. J., REDDY, L. S., *Control de bombas de velocidad variable y modelos en tiempo extensivo para minimizar fugas e costes energéticos*. Short Course on: Improving efficiency and reliability in water distribution systems, 21-25 novembro 1994 - Valência - Espanha, pp. 132–158, 1994.

Hybrid Model to Reduce Electric Energy Consumption Ensuring the Maintenance of Minimum Service Pressures

ABSTRACT

Seeking optimized operational rules for water supply systems that benefit from the use of variable rotation pumps, a computer model was developed to perform simulations over a long time enabling optimum pump rotation velocities to be establishing and fulfilling pre-set objectives. The Hybrid computer model uses an Optimization Model as a generator and controller of the decision variables based on the Genetic Algorithms, together with a Hydraulic Model to simulate the operation of hydraulic networks with pressure pipes. The example of an application presented aimed at reducing electric energy consumption, ensuring the minimum service pressures, proving the efficiency and effectiveness of the tool proposed.

Key words: Hybrid Model, Water Supply, Genetic Algorithms.