



ASOCIACIÓN INTERAMERICANA  
DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL - AIDIS

## VIII-Lubi-Brasil-1

### REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NAS ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO COM O MODELO HÍBRIDO.

#### **Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro** <sup>(1)</sup>

Professora Msc. na área de Saneamento Ambiental no Centro Superior de Educação Tecnológica – CESET – UNICAMP – Limeira - SP e Doutoranda na Faculdades de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – FEC – Unicamp – Campinas – SP.



#### **Edevar Luvizotto Junior** <sup>(2)</sup>

Professor Doutor e Orientador do Departamento de Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - FEC – UNICAMP – Campinas- SP- Brasil.

#### **Luiz Henrique Castelo Branco** <sup>(3)</sup>

Doutorando em Engenharia de Transporte na Universidade de São Paulo – EESC-STT – USP – Campos São Carlos – SP.

#### **Luana Mattos de Oliveira Cruz** <sup>(4)</sup>

Aluna de Graduação do Curso de Saneamento Ambiental – Modalidade Saneamento Básico do Centro Superior de Educação Tecnológica – CESET – UNICAMP – Limeira - SP- Brasil.

**Endereço (1):** Av. Maria Buzolin, n.751, Ap 92, Jd. Piratininga - Limeira- SP, CEP:13.484-318, Brasil – Tel.:(19) 3453-6908 – Fax: (19) 3404-7164 – e-Mail: lubi@ceset.unicamp.br.

#### RESUMO

Com a real necessidade de se reduzir gastos com energia elétrica nas estações de bombeamento o presente trabalho vem apresentar uma ferramenta capaz de minimizar estes gastos. A ferramenta modelo híbrido através da obtenção de roteiros para as bombas de rotações variável do sistema, consegue reduzir os gastos com bombeamento e ao mesmo tempo atender a níveis pré-estabelecidos para os reservatórios não deixando de atender as necessidades de consumo. O modelo híbrido compreende um simulador baseado no Time Marching Approach - TMA em conjunto com técnicas de otimização baseada nos Algoritmos Genéticos – AG.

#### PALABRAS CLAVE

Modelo Híbrido, Algoritmos Genéticos, Redução do Consumo de Energia Elétrica, Simulador Hidráulico, Bomba de Rotação Variável.

## INTRODUÇÃO

A real preocupação dos últimos anos em minimizar os gastos com energia elétrica nas empresas de abastecimento de água, levou a idéia de se unir técnicas de simulação e otimização em uma ferramenta que fosse capaz de estabelecer roteiros operacionais para as estações de bombeamento de forma a atender a objetivos pré-estabelecidos. Isto porque, sabe-se que 50% dos gastos com operação de uma empresa de abastecimento 95% são associados aos gastos de energia elétrica no bombeamento (AMIGO, 2000).

A idéia do Modelo Híbrido foi um ponto de partida para esta investigação, uma vez que esta metodologia baseada no interfaceamento de um modelo de otimização com um modelo hidráulico de simulação já foi usada por BRION e MAYS em 1991, e se mostrou uma alternativa adequada.

O modelo híbrido é um modelo de simulação hidráulica, acoplado a um procedimento de otimização. O primeiro se baseia no TMA e o segundo nos AG's.

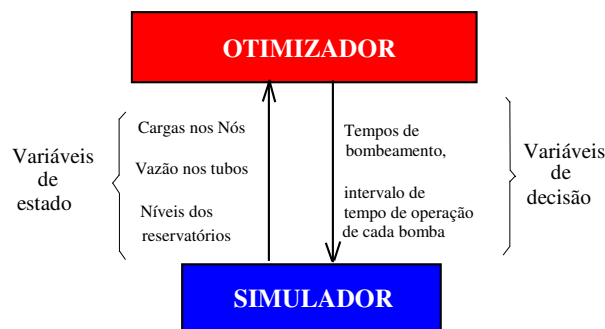


Figura 1. Conexão Otimizador - Simulador (Fonte BRION e MAYS, 1991).

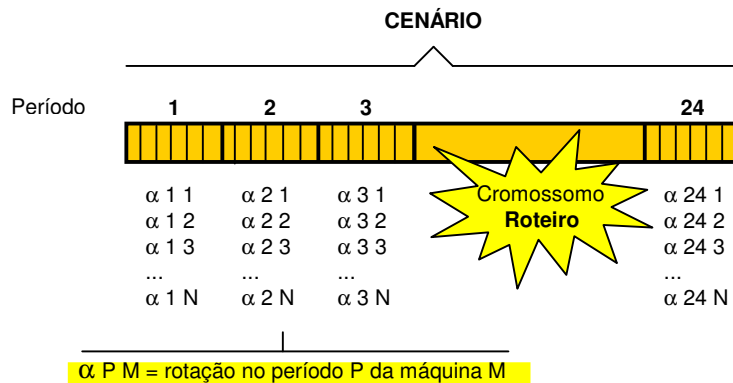
## OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo computacional, para a simulação, em período extensivo, de sistemas de abastecimento de água contendo bombas de rotação variável, visando o estabelecimento das velocidades ótimas de rotação, que satisfaçam a objetivos pré-estabelecidos, no caso, a redução de consumo de energia elétrica e a manutenção dos níveis dos reservatórios, com o atendimento dos consumos.

O trabalho terá como base o modelo de simulação proposto por LUVIZOTTO JR. (1995), adaptado às proposições de WOOD e REDDY (1994), associado a um modelo de otimização baseado nos Algoritmos Genéticos que visa minimizar a função objetivo consumo de energia.

## METODOLOGIA DO TRABALHO

A proposição modelo híbrido 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 pelos AG. As restrições que não são atendidas penalizam o resultado da função objetivo (RIBEIRO, 2002).



**Figura 2. Esquema de um cromossomo com o roteiro operacional de um cenário de 24 horas.**

Desta forma dado uma rotação ( $\alpha_{NK}$ ) no período N da bomba K, obtém-se através do simulador os valores de:

$Q_{bK}$  → vazão pela bomba K;

$P_{bK}$  → potência da bomba K, no período N;

$H_{bK} = H_2 - H_1$  → variação de carga entre as seções de jusante e montante produzida pela bomba K no período N.

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

$$C_K(N) = C_N \cdot \Delta t \cdot P_{bK} \quad \text{equação (1)}$$

Resultando ao final de cada período o custo global dos bombeamentos.

$$\sum_{N=1}^{NP} C_K(N) \quad \text{equação (2)}$$

Portanto o mérito de cada regra operacional (dada pelo indivíduo composto por 24 valores de  $\alpha$ ) 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. A não observância das restrições é caracterizada por penalização da função objetivo.

De posse dos indivíduos (roteiros) e de sua adequação (avaliação de suas funções objetivo), a rotina de AG se incumbi do processo de seleção, reprodução, evolução e substituição, que resultará em uma nova geração de P indivíduos ("mais adequados") para reiniciarem o processo com novas simulações, repetindo o procedimento descrito, num ciclo iterativo, até um número G de gerações pré-estabelecidas (tudo através de codificação binária).

Os AGs utilizados foram os de representação binária que é historicamente importante, uma vez que foi utilizada nos trabalhos pioneiros de HOLLAND em 1975.

### ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

A conexão do modelo de simulação-otimização (modelo híbrido) foi feita com base no esquema apresentado pelo fluxograma da Figura 3.

A função objetivo busca minimizar o custo energético (tarifa unitária), mas aplicando penalizações caso as restrições relacionadas aos limites dos níveis de todos os reservatórios não sejam atendidas, como mostra a Equação 3.

$$F.O. = \text{Min} \sum_{i=1}^{NP} \left( \sum_{j=1}^3 f_{i(res1,8e11)} \right) * C_i * \eta_i * P_i. \quad \text{equação (3)}$$

sendo  $j = 1, \dots, 3$  onde  $1 = R-1, 2 = R-8$  e  $3 = R-11$

A rede analisada é composta por três reservatórios, uma estação de bombeamento com 2 bombas operando em paralelo e 38 tubos. Em sete nós se vinculam demandas setoriais.

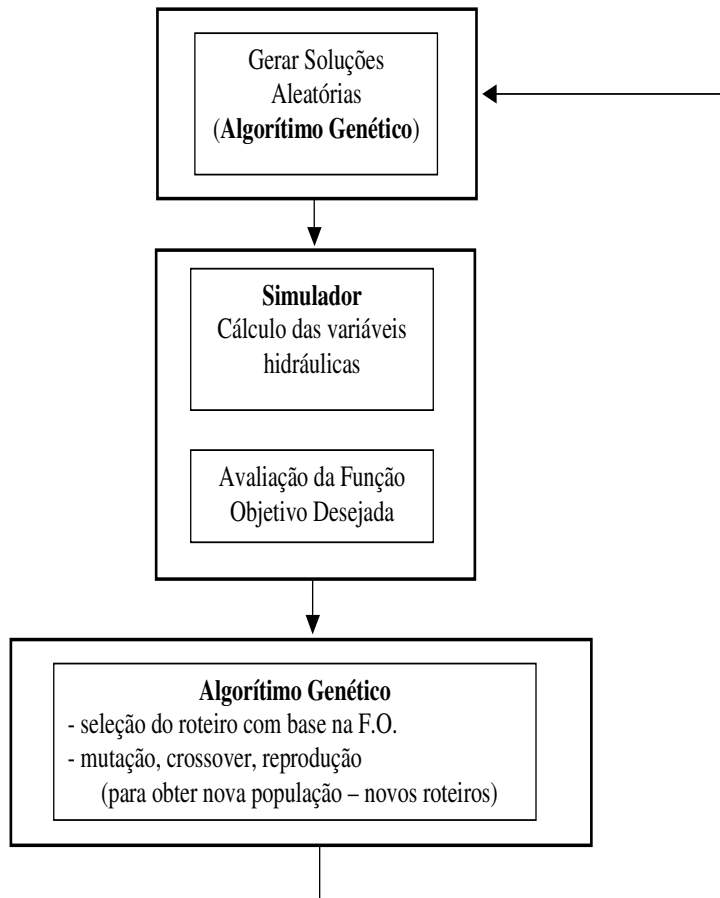


Figura 3. Fluxograma que mostra a conexão

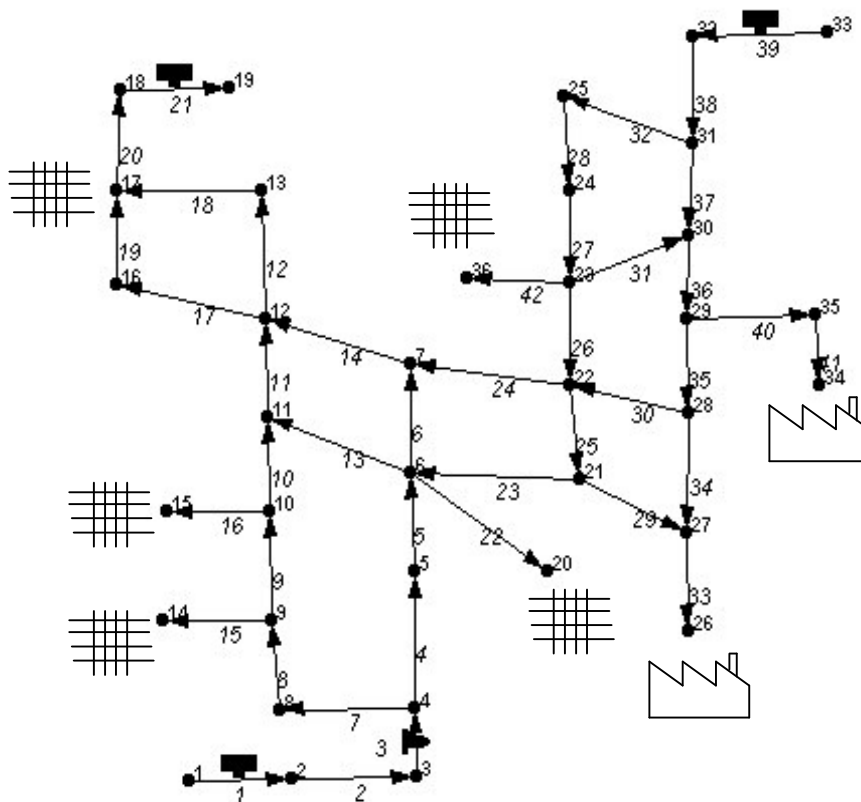


Figura 4. Topologia da rede utilizada entre os modelos (RIBEIRO, 2002).

## RESULTADOS OBTIDOS

Aplicando as penalizações encontrou-se através do modelo híbrido o roteiro mostrado na Figura 5.

O custo total ao longo das 24 horas para o sistema trabalhando com a bomba de rotação fixa corresponde a 12022,52um e para o sistema trabalhando com rotação variável corresponde a 8903,50um. Significa que com a bomba de rotação variável, mesmo após aplicação de penalidades, o sistema conseguiu diminuir o custo em aproximadamente 26% (Figura 6).

Observa-se ainda uma redução na vazão da bomba e o atendimento dos níveis dos reservatórios do sistema, Figuras 7, 8, 9 e 10.

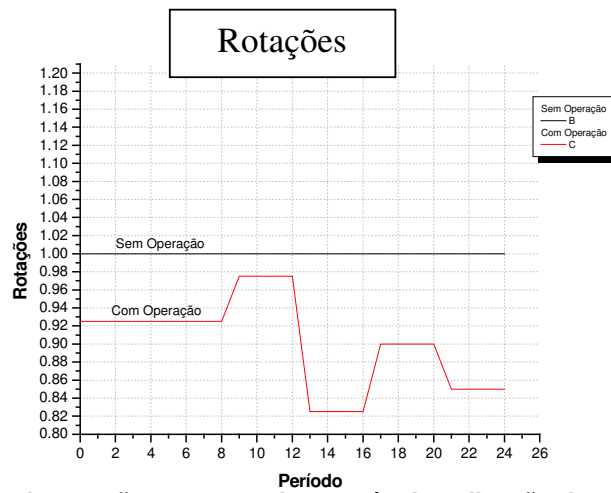


Figura 5. Cenário de rotações encontrado através da aplicação das penalidades.

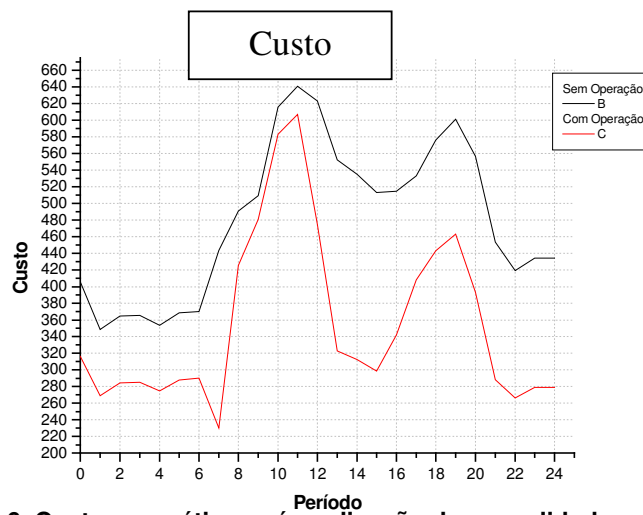


Figura 6. Custo energético após aplicação das penalidades.

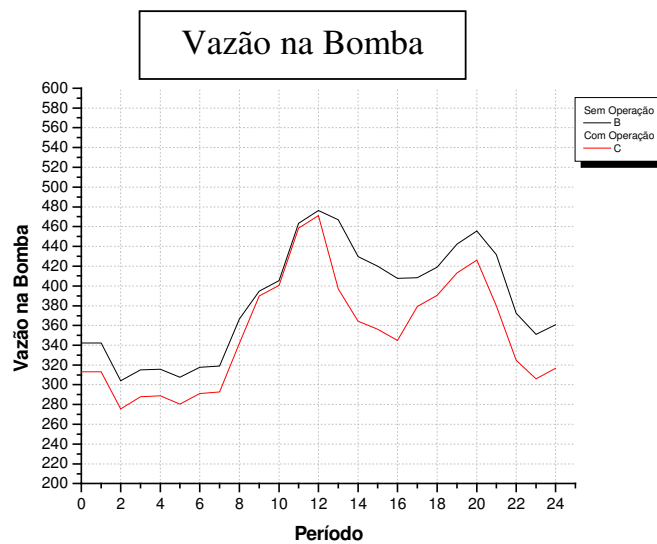


Figura 7. Vazão na Bomba após aplicação das penalidades.

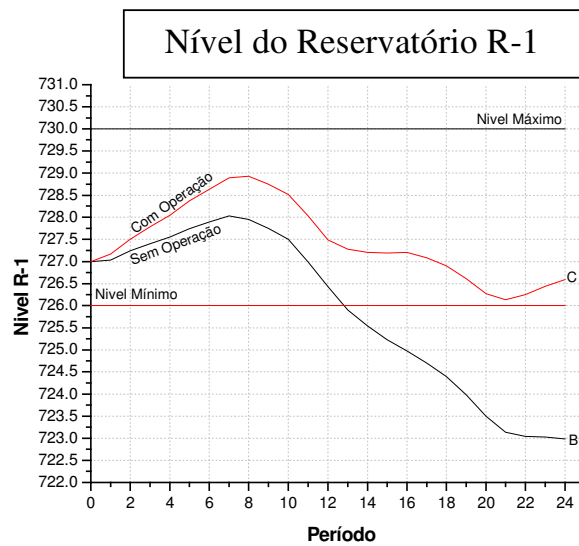


Figura 8. Comportamento do nível do reservatório R-1.

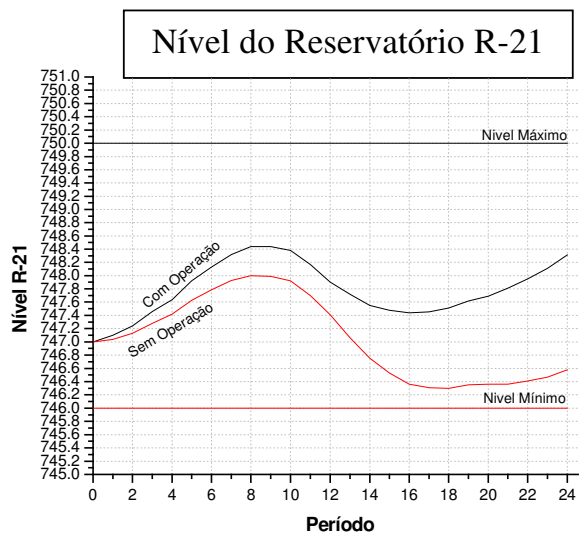


Figura 9. Comportamento do nível do reservatório R-8.

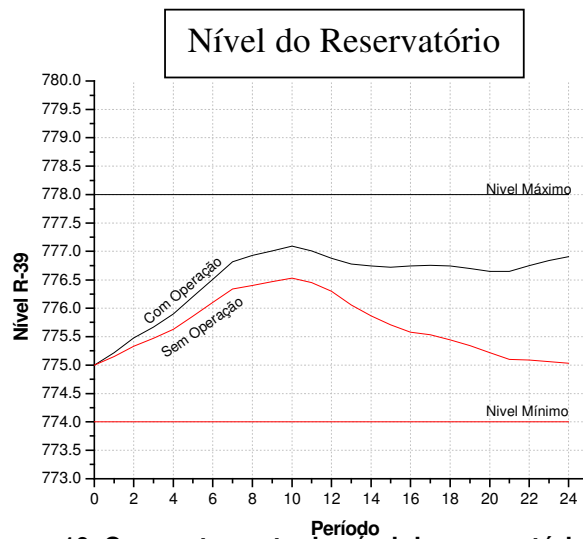


Figura 10. Comportamento do nível do reservatório R-11.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O exemplo avaliado mostrou 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.

Embora o exemplo apresentado seja de condições fictícias, ficam evidenciadas as possibilidades de redução de consumo energético das estações elevatórias com o uso da ferramenta desenvolvida.

Os resultados alentadores motivam a continuidade deste trabalho, generalizando ainda mais o problema através do emprego de mais de uma estação elevatória e a utilização e técnicas mais atuais dentro dos algoritmos genéticos, como o uso de codificação real e busca multi-objetivo.

Recomenda-se que a modelação híbrida proposta seja utilizada como alternativa às modulações convencionais em face ao conjunto de vantagens que apresenta. Para tanto deve-se dar continuidade a esta investigação para necessárias generalizações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMIGO, M. R., OLIVEIRA, C. D., Otimização do consumo de energia elétrica aplicada ao controle de vazão de bombas centrífugas radiais, III Concurso Weg de Conservação de energia elétrica, São Paulo, 2000.
2. 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.
3. 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.
4. RIBEIRO, L. C. L. J., Modelo Híbrido para o estabelecimento de rotações ótimas de bombas de rotação variável, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2002.
5. 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.