

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Economia de Energia no Sistema de Abastecimento de Água: Uma Abordagem Usando Algoritmos Genéticos

Emanuel da Costa Luz¹

Angelita Maria De Ré²

Fábio Hernandes³

^{1,2,3}Departamento de Ciência da Computação, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, PR.

Maria José de Paula Castanho⁴

Departamento de Matemática, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, PR.

Resumo. Este trabalho apresenta um algoritmo genético visando melhorar a operação de uma estação de tratamento de água. O objetivo é determinar o tempo de funcionamento das bombas, diminuindo os custos de energia do bombeamento de água e satisfazendo as restrições operacionais do sistema. Os resultados apontaram economia de aproximadamente 18%.

Palavras-chave. Abastecimento de água, Energia Elétrica, Algoritmos genéticos.

1 Introdução

Nas últimas décadas, vários especialistas têm estudado sobre fontes alternativas para gerar energia e suprir a demanda global. Existem diversas fontes consumidoras de energia, sendo as Estações de Tratamento de Água (ETA) uma das principais, pois, consomem cerca de três por cento da energia nacional com o abastecimento de água e tratamento de esgotos e, desse total, mais de 90% destina-se ao uso de motores e bombas [6]. O alto consumo de energia das ETA deve-se, muitas vezes, aos equipamentos, que são obsoletos e não são dimensionados conforme a necessidade, o que faz com que operem durante os horários de pico (mais caros). Aliado à precariedade dos motores também estão as grandes perdas de água nas redes de distribuição.

Economizar energia nas ETA é possível desde que se invista em equipamentos sofisticados ou se defina regras de operações, sendo esta segunda opção a mais viável economicamente. Com isso, alguns autores tem abordado o tema, dentre os quais se destacam Firmino *et al.* [5], Albuquerque [1], Cunha [3], Costa *et al.* [2], Outeiro *et al.* [6,7] e Dutra e Alfatini [4], cujos trabalhos referem-se às estações de água das cidades

¹ emanuel.luz@bol.com.br

² angelita@unicentro.br

³ hernandes@unicentro.br

⁴ zeza@unicentro.br

de Campina Grande – PB [1, 5], São Carlos - SP, Ourém-Portugal, Guarapuava – PR e Caxias do Sul – RS, respectivamente. O trabalho de Firmino *et al.* [5], aplicado ao problema de acionamento dos conjuntos motor-bomba do principal sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande-PB, foi dividido em duas etapas, na primeira a aplicação de programação linear e na segunda o uso da programação linear inteira, apresentando resultados que mostraram uma economia financeira de 15,09% e de consumo energético de 16,86%. No trabalho de Albuquerque [1], também aplicado ao problema de Campina Grande – PB, foram utilizados os métodos de otimização, Programação Linear (PL) e Não Linear (PNL), além de Algoritmos Genéticos (AG), obtendo como resultados uma economia financeira de 20,27% e de consumo energético de 16,86%. O trabalho de Cunha [3] apresenta um modelo computacional, utilizando algoritmos genéticos e o software Epanet⁵, para otimização energética de um sistema de abastecimento da cidade de São Carlos – SP, obtendo resultados que demonstram a eficiência do modelo em encontrar soluções factíveis de serem implementadas e com redução de custo de energia elétrica na ordem de 8,5%. Costa *et al.* [2] apresentaram um algoritmo genético híbrido em conjunto com o Epanet para determinar as estratégias de operações com custos energéticos reduzidos no sistema de abastecimento de água de Ourém-Portugal. Outeiro *et al.* [6] abordaram o problema de economia de energia com o bombeamento de água por meio da programação linear *fuzzy* e do software Matlab, aplicando-o ao sistema de tratamento de água da cidade de Guarapuava-PR. O problema foi modelado levando em consideração o mês de janeiro de 2013, reduzindo os gastos em torno de 20%, pois o sistema trabalhou com pouca intensidade no horário de ponta (horário em que a energia é mais cara). Dutra e Alfatini [4] abordaram o problema de distribuição de água e consumo de energia do sistema de bombeamento Santa Fé da cidade de Caxias do Sul. Os autores utilizaram planilhas eletrônicas e o software Epanet para verificar que com a troca de três bombas e o uso do inversor de frequência para controlar a velocidade de rotação deste sistema a economia mensal estimada de energia seria em torno de 37%.

Como se verifica, os trabalhos supracitados utilizaram métodos clássicos de otimização (Programação Linear, Inteira, Não-Linear), algoritmos genéticos e o Epanet e obtiveram resultados significativos. Logo, este trabalho tem por objetivo aplicar algoritmos genéticos no problema de redução dos custos de energia com bombeamento de água, durante o período de 24 horas, sob determinado esquema tarifário da concessionária de energia elétrica do sistema de captação de água da cidade de Guarapuava-PR.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 estão os materiais e métodos, na Seção 3 são apresentados os resultados computacionais e na Seção 4 as conclusões.

⁵Epanet – simulador para execução estática e dinâmica do comportamento hidráulico e de qualidade de água de sistemas de distribuição de água (<http://www.epa.gov/nrml/wswrd/epanet>)

2 Materiais e Métodos

A companhia responsável pelo abastecimento e tratamento de água no município de Guarapuava, PR, é a Companhia de Saneamento do Paraná, localizada no bairro

Santana. A captação de água é feita no Rio das Pedras de onde partem duas adutoras,³ uma de 400mm e outra de 350mm, com comprimento de 1112m e uma elevação de aproximadamente 100m. A estação de captação possui três motores, com a restrição de que até dois podem funcionar ao mesmo tempo, para que a vazão não seja maior que a capacidade de tratamento, sendo dois de 600cv e um de 450cv, com vazão de 600m³/h, 432m³/h, respectivamente. A capacidade de tratamento da ETA em operação é de 330l/s. A estação possui quatro reservatórios, que estão interligados, somando uma capacidade máxima de 9200m³. Para evitar cavitação o volume mínimo adotado é de 3066m³.

Um esquema simplificado do sistema é apresentado na Figura 1.

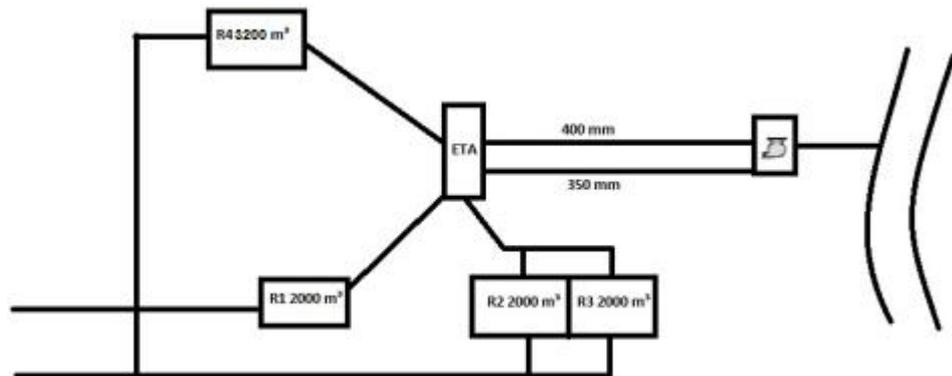


Figura 1: Esquema da ETA em Guarapuava - PR [7].

A empresa responsável pelo fornecimento de energia é a ENERGISA. A tarifa adotada é a horo-sazonal verde, na qual se pactua a demanda contratada no horário de ponta e fora de ponta com tarifas diferenciadas de R\$0,59/hora e R\$0,14/hora, respectivamente. O horário de ponta ocorre das 18 horas às 21 horas.

Atualmente, não há um padrão estabelecido para o processo de operação das bombas. Um operador técnico experiente, observando os níveis dos reservatórios e sabendo os horários de maior demanda, executa a ação de ligar/desligar os motores.

Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é reduzir os custos com energia do sistema de bombeamento de água descrito anteriormente, na Seção 2.1 é apresentada a função objetivo e as restrições do problema, enquanto que na Seção 2.2 está a descrição do algoritmo genético implementado.

2.1 Formulação do problema

Considerando que os custos da energia elétrica em sistemas de distribuição de água representam a maior parte dos custos totais relativos às despesas operacionais, a função objetivo, definida para 24 horas de funcionamento dos motores, tendo como base a tarifa horária de operação, é dada por:

$$Z = \sum_{t=1}^{24} [441 * T(t) * X_1(t) + 331 * T(t) * X_2(t) + 441 * T(t) * X_3(t)]$$

tal que: Z é o custo diário de energia que o sistema de abastecimento gasta com o bombeamento; 441 e 331 representam o consumo em KW/h de cada motor, $T(t)$ é a tarifa de consumo em (R\$/KWh) no período de análise t e X_i , $i=1,2,3$, é o tempo t em que o motor necessita estar ligado.

A relação entre a captação de água, a capacidade de tratamento da ETA e os

níveis dos reservatórios para atendimento das demandas diárias, deve ser observada no procedimento de otimização da operação do sistema. Dessa forma, podem ser consideradas as seguintes restrições:

- as vazões horárias nas adutoras são caracterizadas pelo funcionamento em paralelo dos motores. Cada motor deverá funcionar uma fração de tempo a cada hora: $0 \leq X_i(t) \leq 60$;
- a capacidade máxima dos reservatórios deve ser considerada, além do volume mínimo para evitar cavitação. Assim: $3066 \leq V(t) \leq 9200$;
- a vazão de água bombeada pela ETA, a cada hora, deve ser menor ou igual à capacidade de tratamento: $594 * X_1(t) + 432 * X_2(t) + 594 * X_3(t) \leq 1188$;
- deverá haver confiabilidade no atendimento de demandas que variam a cada hora, sendo: $D_{máx} = 1844m^3$ e $D_{min} = 368m^3$.

2.2 Algoritmo genético proposto

Para a implementação do Algoritmo Genético foram definidas duas restrições: a primeira diz respeito à demanda de produção dos motores, que deverá permanecer sempre igual ou inferior a $1188m^3$, e a segunda com relação à capacidade dos reservatórios, que deverá permanecer entre $3066m^3$ a $9200m^3$.

O indivíduo é composto por conjuntos de genes de tamanho igual a 24, que representam as horas do dia, onde cada gene possui alelos com três características (representando o conjunto dos três motores), conforme Figura 2.

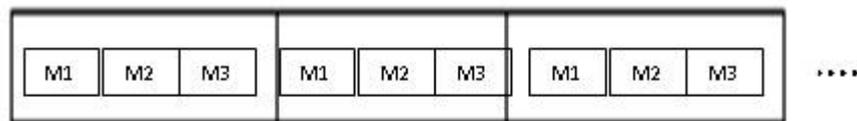


Figura 2: Cromossomo representando o indivíduo.

Inicialmente é gerada aleatoriamente uma população e somente os indivíduos válidos, isto é, que satisfazem as restrições do problema, permanecem nesta, compondo assim uma lista ordenada pelo *fitness*. Com relação à seleção, são escolhidos indivíduos desta lista que passam para o processo de aplicação dos operadores. Quanto aos operadores, utilizou-se cruzamento e mutação da seguinte forma: (i) o cruzamento recebe dois indivíduos como parâmetro e realiza a operação considerando um ponto de corte, podendo ser fixo ou aleatório. Na sequência, após realizar o cruzamento, é verificado se o novo indivíduo satisfaz as restrições do problema. Caso satisfaça, retornam os filhos válidos, senão retornam os pais; (ii) a mutação seleciona um indivíduo que não consta do intervalo [18-20], que representam os horários de ponta, como parâmetro e realiza a operação permutando aleatoriamente as posições de dois genes. É importante destacar que para a próxima geração busca-se a melhora da população.

Um esquema do algoritmo genético utilizado é apresentado na Figura 3.

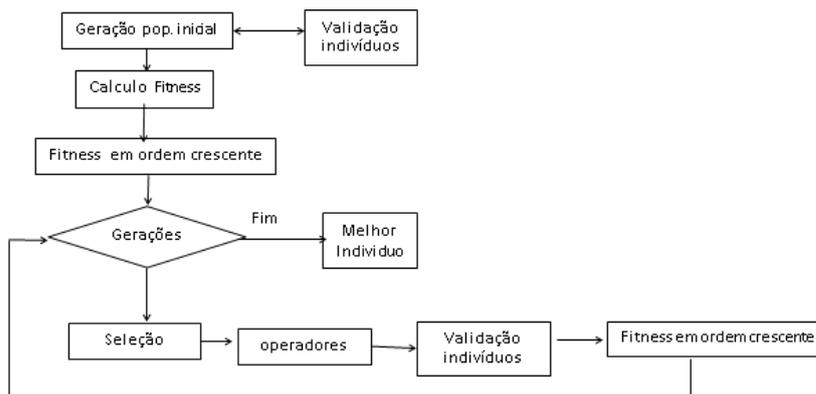


Figura 3: Esquema do algoritmo genético implementado.

3 Resultados Computacionais

Considerando que o objetivo do problema é minimizar os gastos com energia elétrica no processo de bombeamento de água da ETA, o *fitness* do algoritmo genético implementado é a função objetivo do problema, descrita na Seção 2.1.

Devido à capacidade de tratamento da ETA, somente dois motores podem funcionar concomitantemente, ou seja, em cada gene do cromossomo (Figura 2) pelo menos uma característica deve ser nula, isto é, a cada hora a soma do funcionamento dos motores não pode ultrapassar a 120 minutos.

Os dados utilizados neste trabalho foram adquiridos junto à Companhia de Saneamento do Paraná da cidade de Guarapuava e se referem ao mês de janeiro.

Independente do dia da semana, durante as vinte e quatro horas, verifica-se que os horários de maior consumo de água estão entre 11 às 15h e 18 às 20h. Logo, para as restrições do problema que tratam do volume dos reservatórios foi considerada a média horária do dia.

No total foi executada uma bateria de testes com a população inicial variando de 50 em 50 indivíduos até 200. O número de gerações testado foi 50, 100, 200 e 1000. Devido ao fato de que a mutação utilizada realiza permuta entre os genes, não alterando o seu conteúdo, o mesmo tende a não alterar o *fitness*; assim optou-se por uma taxa alta de mutação, variando entre 0,3 e 0,5. Em testes anteriores, observou-se que uma taxa baixa de cruzamento não contribuía na melhora das soluções, assim, decidiu-se pelas taxas entre 0,6 e 0,9.

Dentre os vários testes, a Tabela 1 apresenta as configurações das seis melhores médias de *fitness*.

Tabela 1: Melhores resultados.

Gerações	Taxa – Cruzamento	Taxa – Mutação	Ponto de corte	<i>Fitness</i>
100	0,6	0,5	Aleatório	2531,2
100	0,7	0,5	Fixo	2637,67
100	0,6	0,3	Aleatório	2647,84
200	0,6	0,3	Aleatório	2676,25
200	0,7	0,5	Fixo	2680,59
200	0,6	0,5	Aleatório	2691,21

Com os resultados obtidos, a combinação das taxas 0,6 e 0,5 de cruzamento e mutação, respectivamente, foi a que apresentou o melhor *fitness* (2531,2), o que representou uma economia média de aproximadamente 18%, quando comparado com o gasto médio mensal informado pela companhia.

A Figura 3 mostra o melhor indivíduo, composto pelo tempo de funcionamento dos três motores, durante as 24 horas. É possível perceber que no horário de ponta, onde a energia é mais cara, funciona apenas um motor de 600 CV num total de 39 minutos.

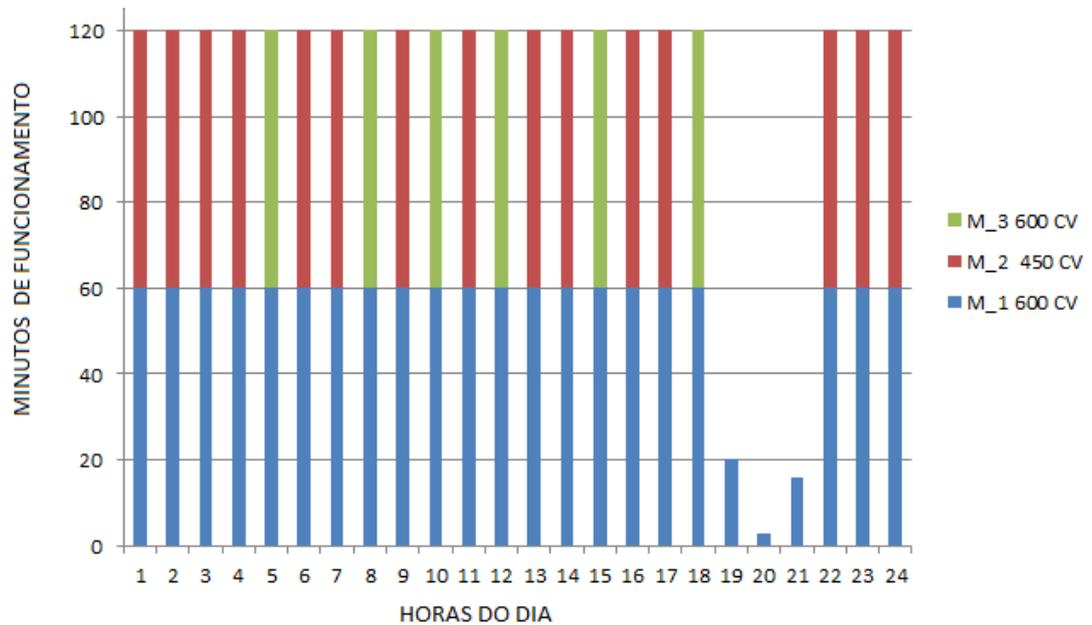


Figura 3. Tempo de funcionamento dos três motores ao longo das 24 horas

4 Discussões e Conclusões

A grande demanda energética brasileira revela a importância e urgência de se buscar soluções alternativas, nos sistemas de saneamento, que venham a diminuir o impacto ambiental, bem como reduzir os custos elevados com energia na área. Nas últimas décadas, estudos demonstram que mais de 2% do consumo total de energia elétrica do Brasil, equivalente a 8,3 bilhões de Kwh/ano, são consumidos por prestadores de serviços de saneamento em todo o país. Este consumo engloba os diversos usos nos processos de abastecimento de água e esgotamento sanitário, com destaque para os conjuntos moto-bomba, que são normalmente responsáveis por 90% do consumo nestas instalações [8].

Neste trabalho foi proposto um algoritmo genético cujo objetivo era reduzir os custos de energia elétrica no processo de bombeamento de água da cidade de Guarapuava-PR pela Companhia de Saneamento do Paraná. Não é possível estabelecer uma comparação dos resultados obtidos a partir do modelo proposto com a prática atual da companhia, pois esta não apresenta um padrão diário. Entretanto, os resultados mostraram que a redução do uso dos motores nos horários de ponta (horários mais caros) faz com que os custos diminuam em até 18%, o que também é comprovado por Tsutiya [9] que destaca “a parada das bombas no horário de ponta tem sido realizada com sucesso, tanto em pequenos sistemas de abastecimento de água quanto em grandes sistemas, como é o caso da região metropolitana

de São Paulo. De um modo geral essa alteração operacional tem representado cerca de 10 a 7
20% na redução dos custos de energia elétrica”.

Como trabalhos futuros pretende-se ampliar o período de coleta de dados para, pelo menos, um ano, aplicando em outros modelos de operadores genéticos, além de outras técnicas.

Referências

- [1] A. A. Albuquerque, Análise e métodos de otimização para eficiência energética de estações elevatórias em sistemas de abastecimentos de água, Tese de Doutorado em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, (2007).
- [2] L. H. M. Costa, M. A. H. Castro e H. Ramos, Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água, Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 15, número 2, 187-196, (2010).
- [3] A. P. A. R. Cunha, Otimização energética em tempo real da operação de sistemas de abastecimento de água, Dissertação de Mestrado na Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo - São Carlos - SP, (2008).
- [4] R. F. Dutra e C. R. Altafini, Melhorias em um sistema de bombeamento municipal visando à Eficiência Energética – Estudo de Caso, Scientia Cum Industria (Sci. Cum Ind.), vol. 2, 1 - 9, (2014).
- [5] M. B. Firmino, A. A. Albuquerque, W. F. Curi e N. C. Silva, Método de eficiência energética no bombeamento de água, via programação linear e inteira. Anais do VI Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água - SEREA, João Pessoa – PB, vol.1 (2006).
- [6] V. H. Outeiro, M. J. P. Castanho e F. Hernandez, Racionalização de energia com o bombeamento de água. Anais do Congresso de Matemática Aplicada e Computacional, CMAC Sudeste, p. 169-171 (2013).
- [7] V. H. Outeiro, M. J. P. Castanho e F. Hernandez, Uso de Programação Matemática Fuzzy para Reduzir Custos de Energia. Anais do XXXV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional – CNMAC, Natal – RN (2014).
- [8] PROCEL SANEAR, Plano de ação Procel Sanear 2006/2007, Eletrobrás, (2005).
- [9] M. T. Tsutiya, Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES Seção São Paulo, São Paulo, 1ª Edição, (2001).