

Aplicação de modelos de otimização na operação de sistemas elevatórios em redes de abastecimento de água

Kennedy Flávio Meira de Lucena ^[1]

[1] kennedy.lucena@ifpb.edu.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Campus Campina Grande.

RESUMO

Os sistemas de abastecimento de água são fundamentais para a sociedade e estão sendo cada vez mais exigidos em termos de quantidade e qualidade da água. Além desses dois aspectos, que são a base do serviço prestado, outras questões tem gerado muita pressão, a preservação ambiental, a qualidade do serviço das companhias e os custos aos consumidores. A melhoria na prestação do serviço e a redução de custos passam, necessariamente, pelo aperfeiçoamento da operação sistemas. O custo da energia com o bombeamento é um dos fatores que mais afeta o custo operacional dos sistemas. A relevância do custo da energia com o bombeamento motivou a realização deste trabalho. Por meio de modelagem computacional buscou-se minimizar os custos do bombeamento de um sistema real. A programação não linear e os algoritmos genéticos da ferramenta solver do Excel foram aplicadas para se obter o custo ótimo do bombeamento. As variáveis de decisão do modelo foram os intervalos de operação das bombas durante um ciclo de 24 horas. As principais restrições foram respeitar os limites dos reservatórios e a recuperação dos níveis ao final do ciclo de 24 horas. As duas técnicas foram capazes de encontrar soluções viáveis, no entanto, os algoritmos genéticos confirmaram sua lentidão em relação ao Gradiente Reduzido Generalizado (GRG). Em ambas as técnicas, o horário de ponta foi minimamente alocado na operação. Com relação ao sistema estudado constatou-se que o maior responsável pelo custo operacional é a adução da Estação de Tratamento de Água (ETA) ao R5, aproximadamente 81,69%, e existe uma limitação na capacidade de bombeamento que impede o desligamento total das bombas no horário de ponta. No presente trabalho, os seguintes consumos específicos foram obtidos: estação elevatória EE 1 (ETA-R5) 0,897kWh/m³; EE 2 (R5-R4) 0,16 kWh/m³; EE 3 (R4-RLS) 0,617037 kWh/m³ e EE 4 (R4-RC) de 0,471852 kWh/m³. Considerando a média do subsistema estudado tem-se 0,537 kWh/m³, sendo mais eficiente a EE 2 (R5-R4) e a menos eficiente a EE 1(ETA-R5). Isso pode ser justificado pela maior demanda e por ser necessária a operação em horário de ponta com bombas de elevada potência. O investimento na melhoria do sistema é necessário para aumentar sua eficiência energética e, conseqüentemente, reduzir os elevados custos da operação.

Palavras Chave: sistema de abastecimento de água, modelo de otimização, custo de bombeamento, consumo de energia.

ABSTRACT:

Water supply systems are fundamental to society and are increasingly being demanded in terms of quantity and quality of water. In addition to these two aspects, which are the basis of the service provided, other issues have generated a lot of pressure, environmental preservation, the quality of service from companies, and costs to consumers. The improvement in the provision of the service and the reduction of costs necessarily involves the improvement of the system's operation. The energy cost of pumping is one of the factors that most affect the operating cost of the systems. The relevance of the cost of energy with pumping motivated this work. Through computational modeling, we sought to minimize the costs of a real pumping system. Nonlinear programming and the genetic algorithms of the Excel solver tool were applied to obtain the optimal cost of pumping. The decision variables of the model were the 24-hour pump operation intervals. The main restrictions are to respect the limits of the reservoirs and the recovery of levels at the end of the 24-hour cycle. Both techniques were able to find viable solutions, however, the evolutionary algorithms confirmed their slowness in relation to the generalized reduced gradient (GRG). In both techniques, peak hours were minimally allocated to the operation. Regarding the studied system, it was found that the main responsible for the operational cost is the transport of water treatment plants (WTP) to R5, approximately 81,69%, and there is a limitation in the pumping capacity that prevents the complete shutdown of the pumps during peak hours. In the present study, the following specific consumptions were obtained: elevatory station EE 1 (ETA-R5) 0.897kWh/m³; EE 2 (R5-R4) 0.16 kWh/m³; EE 3 (R4-RLS) 0.617037 kWh/m³ and EE 4 (R4-RC) of 0.471852 kWh/m³. Considering the average of the subsystem studied, there are 0.537 kWh/m³, EE 2 (R5-R4) being more efficient, and less efficient EE 1 (ETA-R5). This can be justified by the greater demand and because it is necessary to operate at peak hours with high-powered pumps. Investment in improving the system is necessary to increase its energy efficiency and, consequently, reduce the high costs of the operation.

Keywords: water supply system, optimization model, pumping cost, energy consumption.

1 Introdução

Os sistemas de abastecimento de água fazem parte da infraestrutura necessária para promover a qualidade de vida e bem estar de uma sociedade. São premissas desses sistemas, o fornecimento contínuo, atendimento das demandas, garantia de qualidade da água e a preservação ambiental.

A crescente demanda hídrica em função do crescimento populacional e do desenvolvimento das cidades têm implicado em maiores capacidades de transporte da água desde os mananciais. Como consequência, custos maiores têm sido impostos à operação dos sistemas, em particular, com a energia do bombeamento.

Os custos energéticos gerados na operação dos sistemas deve ser uma preocupação desde a fase de projeto. A eficiência energética dos sistemas, no entanto, também está diretamente relacionada com programas de manutenção, redução de perdas de água e qualidade do serviço.

Os custos de energia consumida somados aos custos com trabalhadores, chegam a representar a parcela mais importante dos custos de operação dos sistemas de abastecimento de água. Fatores como a distância até a captação de água, topologia do sistema, topografia das áreas atendidas influenciam o uso da energia nos sistemas de abastecimento (DUARTE; COVAS, 2008).

De acordo como o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), as despesas com energia elétrica das companhias prestadoras de serviço de saneamento em 2018 foram da ordem de R\$ 6,19 bilhões, com um consumo de 12,9 TWh, sendo 11,5 TWh devidos ao abastecimento de água e 1,4 TWh consumidos no esgotamento sanitário. Dados do SNIS indicam uma tendência crescente de consumo energético, em função dos aumentos nos índices de consumo per capita de água e de atendimento com os serviços de água e esgotos (BRASIL, 2019).

Barbosa et al. (2018) analisaram o consumo energético de sistemas de abastecimento no país entre 2003 e 2015 e constataram que não houve redução de consumo de energia por habitante no período avaliado mantendo-se, em média, na ordem de 61,50 kWh/hab. Os autores enfatizam, que mesmo os sistemas que representam em relação ao consumo nacional de energia elétrica aproximadamente 2,3%, medidas que incentivem a eficiência energética devem ser estimuladas. Para que se consiga êxito em termos de eficiência energética é necessário o empenho do poder

público e dos prestadores de serviços para incentivar a utilização sustentável dos recursos.

O uso ineficiente da energia implica em maiores custos aos usuários que poderiam ser evitados. Da mesma forma, as perdas de água provocam maior gasto energético na produção e transporte desse recurso. O aumento da eficiência no setor de abastecimento tem, também, uma importância ambiental na redução de emissão de gases de efeito estufa. Outra vantagem no uso eficiente da energia elétrica e na redução das perdas de água é a otimização da infraestrutura civil e eletromecânica existente e, conseqüentemente, a redução da necessidade de investimentos em ampliação dos sistemas (BRASIL, 2019).

Outro fator que afeta o custo energético dos sistemas de abastecimento é o desgaste de seus componentes com passar dos anos. Nesse sentido, faz-se necessária a adoção de medidas não apenas de manutenção, mas também para reabilitação da rede hidráulica e dos equipamentos eletromecânicos, como as motobombas e válvulas.

Duarte e Covas (2008) enfatizam que entre os objetivos estratégicos na gestão e avaliação do desempenho dos serviços de abastecimento de destacam-se os seguintes itens da norma ISO 24512:

- garantir a proteção da saúde pública;
- corresponder às solicitações e às expectativas dos utilizadores do serviço;
- garantir o fornecimento do serviço em condições normais e de emergência;
- garantir a sustentabilidade da entidade gestora;
- promover o desenvolvimento sustentável da comunidade;
- proteger o ambiente.

A promoção de projetos que tenham por objetivo a otimização dos recursos energéticos e dos seus custos é cada vez mais comum nas entidades gestoras. Avaliar a eficiência energética é importante para estabelecer prioridades de intervenção e para controlar a eficácia das medidas implementadas (DUARTE; COVAS, 2008).

Segundo Lacerda (2009), a otimização da operação dos sistemas de abastecimento apresenta como benefícios: a gestão adequada da demanda, que pode diminuir a vazão requerida e contribui para a preservação dos mananciais; atendimento contínuo à demanda em quantidade e qualidade; a regularização do comportamento das pressões nos sistemas, proporcionando a diminuição das perdas

físicas por vazamento ou rompimento de tubulações, e evitando os transtornos provocados ao meio ambiente por escavações e interrupções de ruas; redução das perdas físicas, aumentando a oferta e diminuindo a demanda, que conseqüentemente reduz o consumo de substâncias químicas utilizadas no seu tratamento, a energia necessária para a sua adução e o preço final da água ao consumidor; diminuição dos custos com bombeamento, manutenção de equipamentos e tubulações.

Carrizo (2004 apud LACERDA, 2009) afirma que “a operação de um sistema de abastecimento de água não pode ser entendida apenas como uma mera seqüência de comandos exercidos sobre os equipamentos, que têm como objetivo o atendimento da demanda”. Na realidade, o problema é muito mais amplo e complexo, envolvendo aspectos de planejamento, controle e supervisão, serviços de infraestrutura de apoio e de atendimento ao usuário, todos considerados simultaneamente e interdependentes entre si.

Os aspectos elencados têm levado a comunidade técnico-científica a procurar as soluções da melhoria da operação dos sistemas de abastecimento de água, por meio das diversas técnicas computacionais. Nesse sentido, vários estudos tem dado ênfase ao uso e aperfeiçoamento dos simuladores hidráulicos e à otimização desses sistemas, desenvolvendo-se para modelos de programação linear (VICENTE, 2005), programação não linear (LUCENA, 2012), programação dinâmica (LANSEY; AWUMAH 1994) e algoritmos genéticos (CARRIJO, 2004).

De acordo com Carrizo (2004), na implementação dos algoritmos genéticos (AG) tem-se as seguintes etapas:

- Representação dos grupos de variáveis de decisão que definem, completamente, as soluções, cujos valores pretende-se determinar;
- Geração de uma população inicial de soluções alternativas, geralmente aleatória;
- Definição do módulo de avaliação de performance das soluções, chamado de função objetivo ou de aptidão;
- Especificação dos operadores genéticos para a realização dos mecanismos de seleção, recombinação e mutação;
- Escolha dos parâmetros dos AGs tais como probabilidades de recombinação e mutação e tamanho da população.

Sjobom Junior e Oliveira (2000) propuseram um modelo computacional, usando algoritmos genéticos com o objetivo de otimizar bombeamentos de sistemas de distribuição de água, minimizando custos com energia elétrica e aumentando a confiabilidade operacional. Para tanto, um previsor de níveis de água em reservatórios das próximas 24 h, por redes neurais artificiais foi utilizado. Na aplicação do modelo, obteve-se uma redução de 9% no custo de energia elétrica. Os autores concluíram que o resultado é muito expressivo, no qual o investimento é relativamente baixo, compreendendo somente o desenvolvimento de software e o treinamento dos operadores.

Bardales *et al.* (2007) apresentam uma metodologia, baseada em algoritmos evolucionários multiobjetivos, para a elaboração de estratégias de operação ótima das bombas que buscam minimizar os custos energéticos e maximizar a confiabilidade hidráulica, simultaneamente, considerando um horizonte de operação determinado e atendendo às restrições operacionais do sistema.

Com o objetivo de superar a complexidade existente na operação de um sistema de abastecimento de água, imposta principalmente pelas restrições envolvidas e os objetivos conflitantes, Machado et al. (2008) utilizaram um algoritmo genético multiobjetivo para otimizar o custo de energia elétrica referente ao bombeamento, o custo de manutenção das bombas e minimizar a variação do nível do reservatório, sem infringir as restrições operacionais.

Considerando-se a importância de estudar meios de reduzir os custos operacionais dos sistemas de abastecimento, apresenta-se neste trabalho o uso de duas técnicas computacionais visando à elaboração de modelos simples, que visam minimizar o custo energético com bombeamento.

2 Metodologia

Este trabalho consiste na construção de modelos de otimização para a operação de bombas de sistemas de abastecimento de água. Para a aplicação dos modelos optou-se pelo sistema de abastecimento do município de Campina Grande – PB, operado pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba CAGEPA. Esse sistema foi escolhido pelo acesso aos principais dados da rede e de sua operação e por ser um sistema que abastece diversos municípios.

O sistema de abastecimento de Campina Grande (SACG) é dividido em quatro zonas de pressão, sendo

modeladas neste estudo, as zonas B e C, que foram denominadas de subsistema 2 de Campina Grande.

Uma das etapas do trabalho consistiu na aquisição de dados cadastrais e levantamentos de campo do sistema de abastecimento. Nos Quadros 1, 2 e 3 são ilustradas algumas das características dos principais componentes da rede de distribuição de água, de acordo com estudos de Nascimento (2019).

Quadro 1 – Dados das tubulações.

Tubulação	Material	Ø mm	Compr. (m)	Rugosidade
ETA - R5	FoFo	700	18.740	130
R5 - R4	FoFo	500	2.650	130
R4 - CUITÉS	PVC	200	2.480	145
R4 - BREJO	PVC	300	6.530	145

Fonte: Nascimento (2019).

Quadro 2 – Dados das retiradas (demandas) dos reservatórios.

Reserv.	Demandas médias (L/s)
R5	125,00
R4	83,30
RC	2,50
RLS	55,20

Fonte: Nascimento (2019).

Quadro 3 – Dados dos reservatórios.

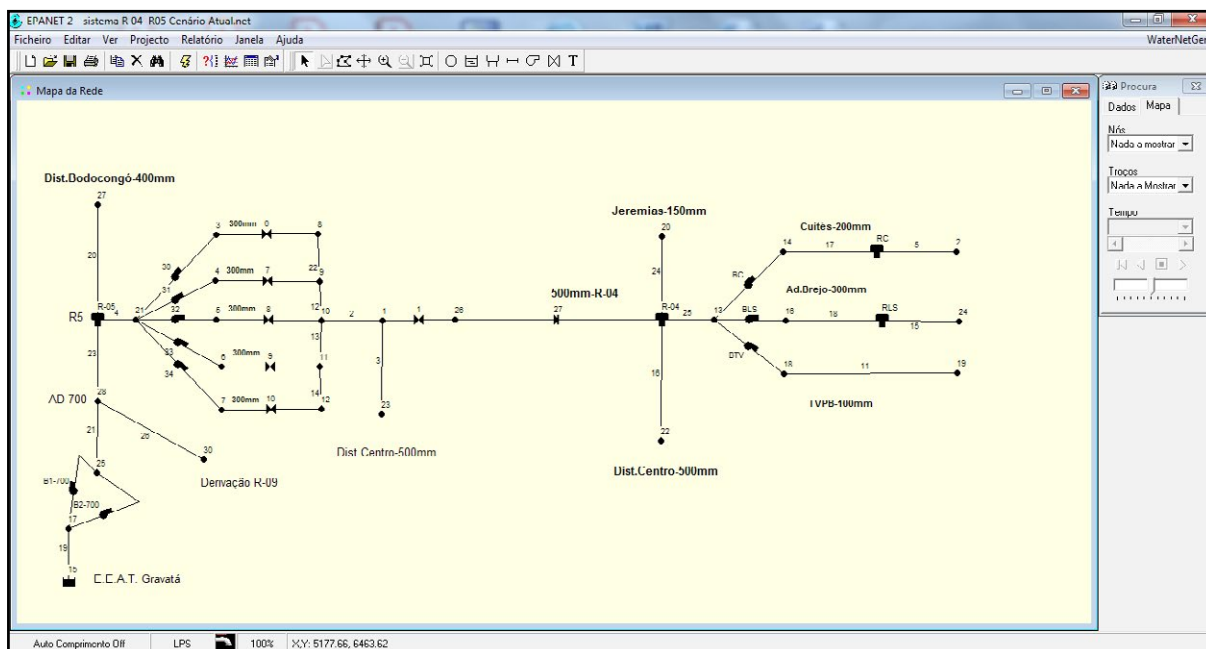
Reserv.	Nível máx. (m)	Nível mín. (m)	Capacidade (m³)
R5	4,0	0,5	8.167,14
R4	5,7	0,1	10.309,25
RC	5,5	0,1	276,32
RLS	4,0	0,5	615,44

Fonte: Nascimento (2019).

Uma etapa anterior à construção do modelo de otimização foi a implementação do sistema no simulador EPANET 2 (ROSSMAN, 2002). As simulações permitiram compreender a operação

do sistema e extrair informações úteis ao modelo de otimização, tais como níveis operacionais de reservatórios, velocidades de fluxo, pressões na rede e potências médias das bombas (Figura 1).

Figura 1 – Modelagem do subsistema no EPANET 2.

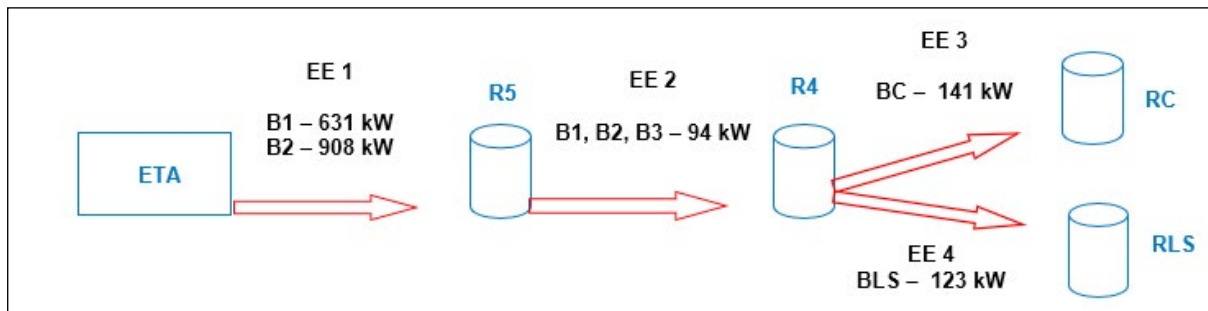


Fonte: Elaboração dos autores (tela do software EPANET 2).

O sistema modelado representa a operação de bombeamento desde a ETA (Estação de Tratamento de Água) até os reservatórios das zonas B e C, que são os reservatórios: R5, R4, RLS e RC. O trecho da ETA ao

R5 compreende o mais extenso (adutora) e com maior capacidade de bombeamento (Figura 2). Na Figura 2 tem-se as estações elevatórias com suas bombas e as potências médias das mesmas.

Figura 2 – Esquema do bombeamento do subsistema estudado.



Fonte: Elaboração do autor.

Para otimização da operação duas técnicas na construção do modelo foram testadas, a programação não linear (PNL) e os algoritmos evolutivos (AG). Em virtude da facilidade de utilização e disponibilidade aos técnicos, o modelo foi implementado usando a ferramenta Solver do Excel.

O R5 é o mais importante e que alimenta os demais. Do R5 tem-se duas retiradas, as demandas diretamente para a rede e para o R4. O R4 abastece os reservatórios RLS (Lagoa Seca – Município que leva água para outras localidades), o reservatório RC (Cuités – bairro de Campina Grande) e parte do centro da cidade.

2.1 Função objetivo

O objetivo a ser obtido é a melhor solução da operação do sistema, isto é, a determinação do menor custo de energia na operação das bombas do sistema, desde que os limites operacionais não sejam violados e que as demandas de consumo da rede sejam plenamente atendidas.

A função objetivo (FO) foi definida pelas equações 1, 2, 3 e 4:

$$FO = \text{Min} \times C_{op} \quad (1)$$

$$C_{op} = C_{efp} + C_{ep} \quad (2)$$

$$C_{efp} = \sum Pot_i \times T_i \times C_{fp} \quad (3)$$

$$C_{ep} = \sum Pot_i \times T_i \times C_p \quad (4)$$

, onde: C_{op} é o custo operacional devido à energia no bombeamento (R\$); C_{efp} é o custo da energia fora de ponta (R\$); C_{ep} é o custo da energia na ponta (R\$); Pot é a potência da bomba (kW); T é o tempo de operação da bomba na ponta e fora de ponta (); C_{fp} é o custo unitário da energia fora de ponta (R\$/kWh); C_p é o custo unitário da energia na ponta (R\$/kWh).

2.2 Restrições operacionais do modelo

Como restrições operacionais do modelo foram escolhidas as seguintes variáveis:

- Velocidades máximas e mínimas nas tubulações (m/s);
- Pressões máximas na rede (mca);
- Níveis mínimos nos reservatórios (m);
- Níveis máximos nos reservatórios (m);
- Níveis finais iguais aos iniciais (m);
- Intervalos de operação por bomba nos horários de ponta e fora de ponta.

2.3 Restrições das variáveis

A variável de decisão do modelo é o tempo de funcionamento de cada bomba. Cada hora do dia foi considerada como variável de decisão, ou seja, tempo de operação foi fragmentado em 24 intervalos de operação. Desse modo, a variável tempo teve os limites, t_{min} e t_{max} . Como horário de ponta foi considerado o período das 18 às 20 horas (três horas).

3 Resultados e Discussão

O estudo de modelamento do sistema foi realizado com dois tipos de técnicas: a programação não linear e os algoritmos evolutivos (uma variação dos algoritmos genéticos). O algoritmo que se utiliza no solver do Excel para a programação não linear é o GRG (Gradiente Reduzido Generalizado).

A aplicação das duas técnicas teve como objetivo analisar a capacidade de encontrar a solução ótima para o problema, o tempo de resposta na obtenção da solução e as diferenças nas soluções obtidas.

3.1 Resultados obtidos da modelagem com o algoritmo de programação não linear (PNL)

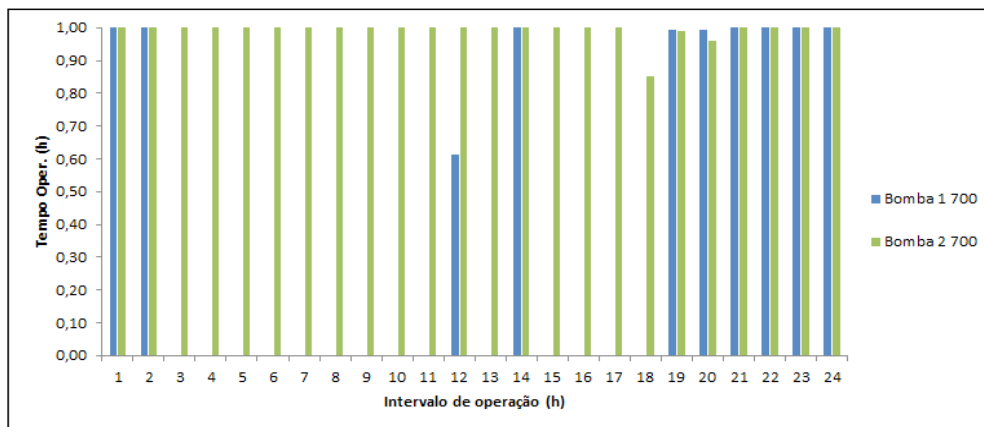
Nesta subsecção, os resultados utilizando programação não linear (PNL) são apresentados, relacionados aos reservatórios R5, R4, RLS e RC.

Operação do Reservatório R5 (PNL)

Dois conjuntos de bombas abastecem o R5 pela adutora de 700 mm diretamente da ETA: a bomba B1 (Potência de 631 kW e vazão média de 925 m³/h); e a bomba B2 (Potência de 908 kW e vazão média de 1332 m³/h).

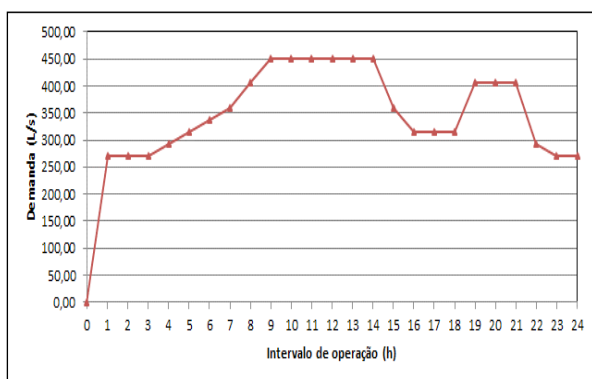
Nas Figuras 3 e 4 tem-se os resultados obtidos da operação. Pode-se observar na Figura 3 que só foi possível o desligamento de uma das bombas em parte do horário de ponta, o que elevou o custo energético. Para atender as demandas, a bomba 2, de maior potência, é operada por mais tempo. O consumo maior se dá no horário das 9 às 14h (Figura 4), porém devido à elevada demanda, mesmo no período noturno, é necessário que se liguem as bombas, ainda no horário de ponta, para que o reservatório consiga recuperar o seu nível inicial (Figura 4).

Figura 3 – Tempo de operação de cada bomba para o reservatório R5.

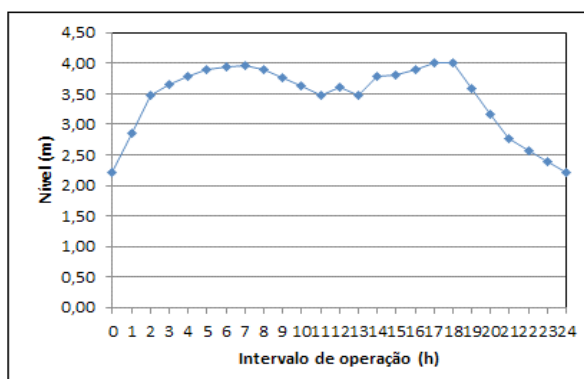


Fonte: Elaboração do autor.

Figura 4 – Variação da demanda de consumo (a) e variação do nível (b) do R5 na operação otimizada.



(a)



(b)

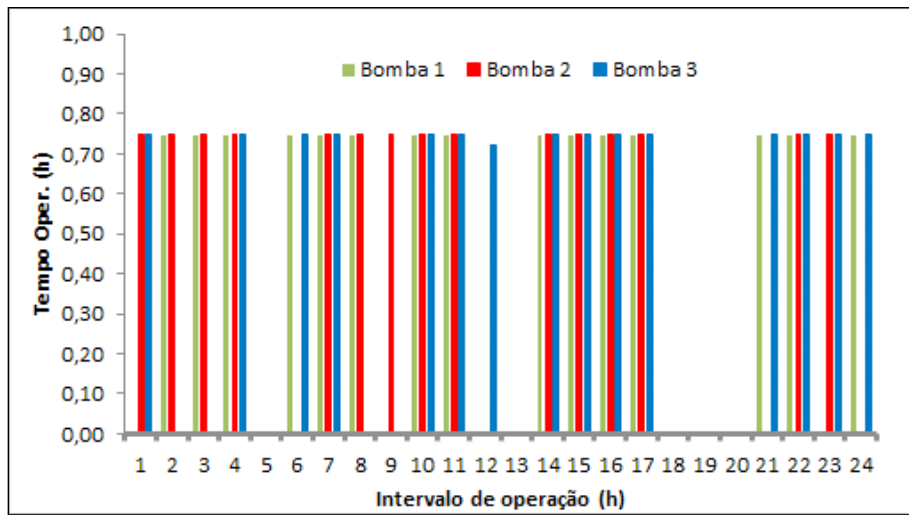
Fonte: Elaboração do autor.

Operação do Reservatório R4 (PNL)

O R4 é responsável por abastecer diretamente parte do centro da cidade de Campina Grande e dois outros reservatórios, o RLS e o RC, ilustrados na Figura 1. Três conjuntos de bombas conduzem água do R5 para o R4 pela adutora de 500 mm. As bombas são iguais e têm potência de 90 kW, com vazão média de 576 m³/h. Nas Figuras 5 e 6 tem-se os resultados obtidos da operação. Na operação do R4, a solução

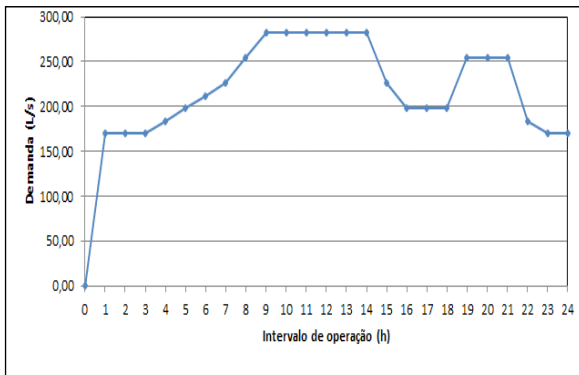
obtida pelo modelo de PNL evitou em 100% a alocação das bombas no horário de ponta, o que reduziu os custos energéticos. Da mesma forma, foram poucos os intervalos em que as três bombas foram acionadas simultaneamente, o que também demonstrou a eficiência do modelo na busca da solução ótima. Mesmo desligando as bombas no horário de ponta foi possível recuperar o nível inicial do reservatório (Figura 6). O perfil de consumo do R4 é o mesmo do R5, porém as demandas são inferiores em cerca de 45%

Figura 5 – Tempo de operação de cada bomba para o reservatório R4.

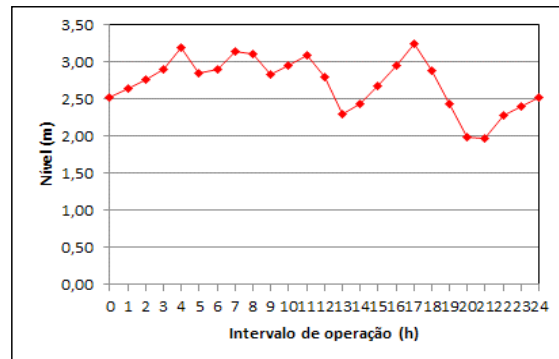


Fonte: Elaboração do autor.

Figura 6 – Variação da demanda de consumo (a) e variação do nível (b) do R4 na operação otimizada.



(a)



(b)

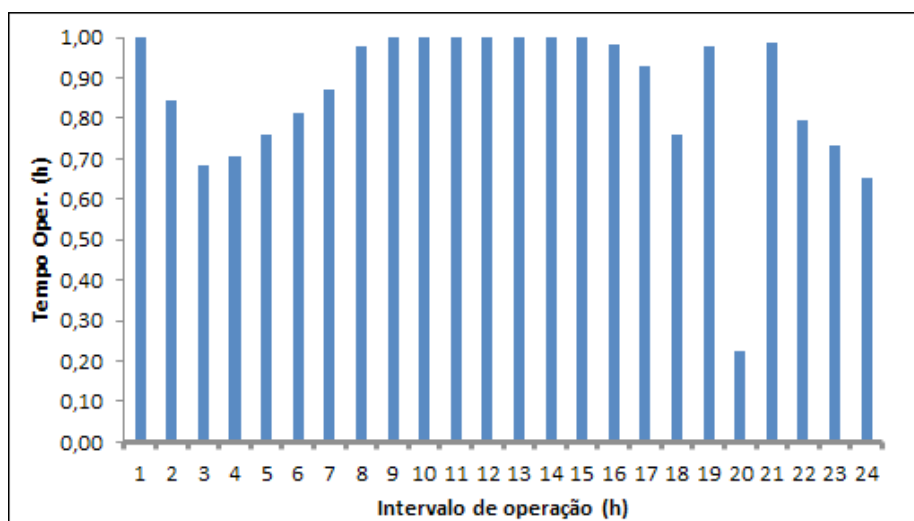
Fonte: Elaboração do autor.

Operação do Reservatório RLS (PNL)

O RLS (Lagoa Seca) é responsável pelo abastecimento das cidades de Lagoa Seca e Matinhas. Para suprir a demanda do RLS (Figura 1) é utilizada uma bomba que retira água do R4 pela adutora de 300 mm. A bomba tem potência de 122 kW e vazão

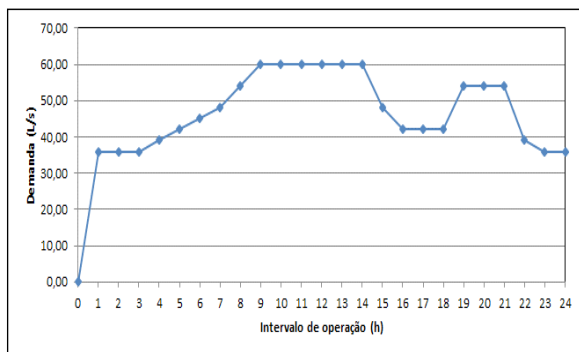
média de 198 m³/h. Nas Figuras 7 e 8 tem-se os resultados obtidos da operação. Operando com apenas uma bomba, não foi possível obter solução com desligamento no horário de ponta, apenas não usou 100% desse horário. A variação do nível do reservatório tende a acompanhar a curva de demanda.

Figura 7 – Tempo de operação da bomba do reservatório RLS.

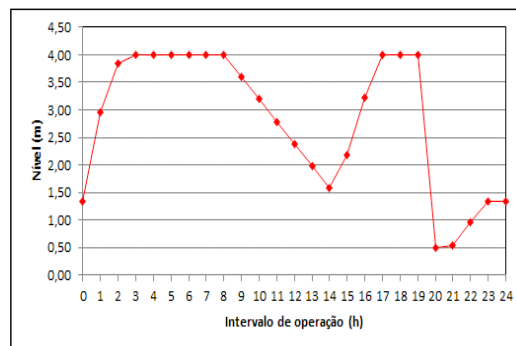


Fonte: Elaboração do autor.

Figura 8 – Variação da demanda de consumo (a) e variação do nível (b) do RLS na operação otimizada.



(a)



(b)

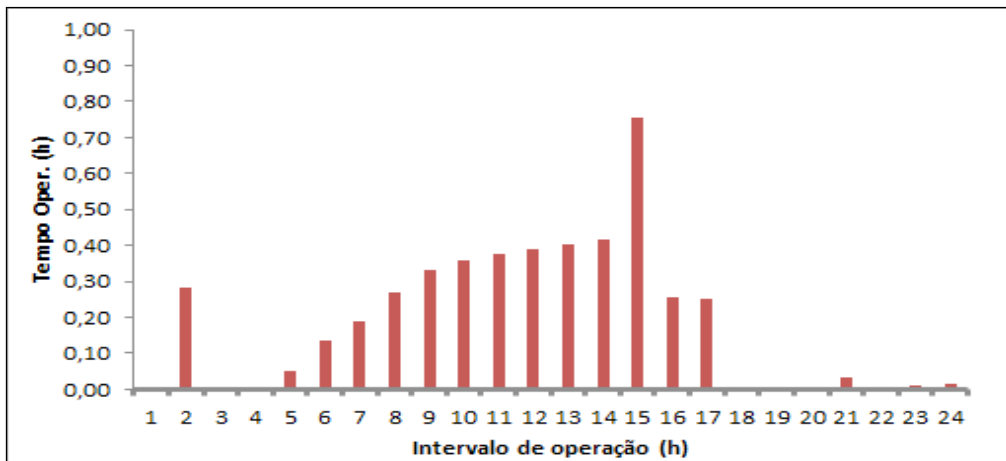
Fonte: Elaboração do autor.

Operação do Reservatório RC (PNL)

O reservatório RC atende ao bairro dos Cuitês e, assim como o RLS, é suprido pelo R4. O sistema que alimenta o RC é composto por uma bomba, com potência de 141 kW para uma vazão média de 300 m³/h. Pelas Figuras 9 e 10 pode-se observar a

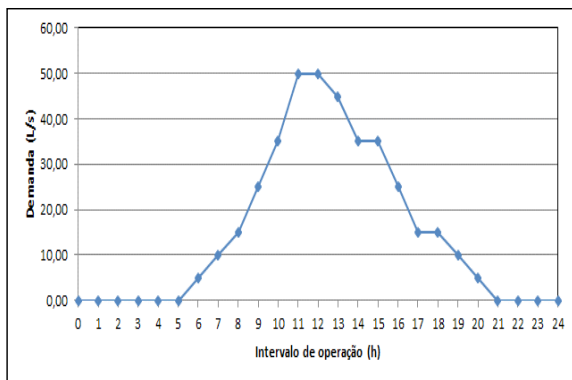
operação obtida utilizando PNL. O modelo nessa operação obteve o desligamento quase 100% da bomba. Como se pode observar o padrão de consumo é bem divergente dos anteriores. Também se verifica que ocorre uma ampla variação no nível do reservatório.

Figura 9 – Tempo de operação da bomba do reservatório RC.

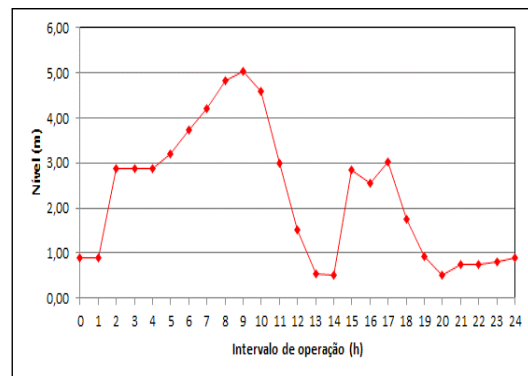


Fonte: Elaboração do autor.

Figura 10 – Variação da demanda de consumo (a) e variação do nível (b) do RC na operação otimizada.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração do autor.

Analisando as operações consideradas de menor custo de bombeamento, constata-se que o modelo conseguiu êxito na busca das melhores soluções, evitando ativar bombas no horário de ponta. No entanto, percebeu-se que em algumas situações não foi possível evitar que bomba fosse ligada na ponta. A explicação para o que ocorreu é que a restrição de

recuperação do nível inicial do reservatório força a ativação da bomba, que tem que superar as demandas e retornar o nível superior inicial.

Para a situação em estudo, a solução seria aumentar a capacidade das bombas ou do bombeamento. Isso está bem visível na operação que abastece o R5 que requer volume considerável para

retornar ao nível inicial. Sendo o R5 o responsável pelo maior custo operacional, retirar a operação da ponta seria estratégico e de grande economia. O bombeamento para o R5 corresponde a 81,69% do custo total da operação de abastecimento da zona estuda do sistema de Campina Grande. O R4 vem

em segundo lugar no consumo de energia, embora sua demanda seja considerável, no entanto, parte da retirada do R4 se dá por gravidade sem bombeamento. No Quadro 4 é apresentado o resumo dos custos operacionais para abastecer todos os reservatórios, usando programação não linear.

Quadro 4 – Custo (R\$/dia) otimizado das operações das estações elevatórias.

Operação	R5	R4	RLS	RC	TOTAL
Fora de ponta	7.048,42	933,50	677,93	187,91	8.847,76
Na ponta	1.368,74	0,00	86,69	0,00	1.455,44
	8417,16	933,50	764,62	187,91	10.303,21

Fonte: Elaboração do autor.

3.2 Resultados da modelagem com Algoritmos Genéticos (AG)

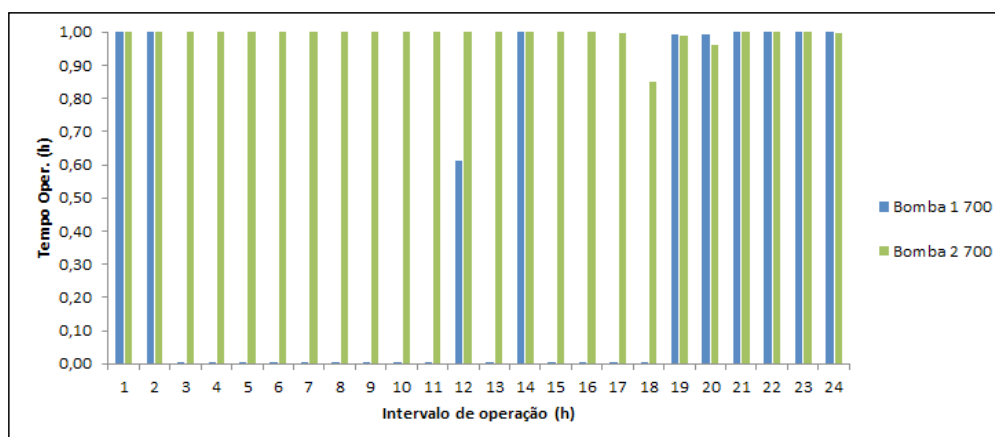
Para a aplicação dos algoritmos genéticos, as restrições básicas do problema foram mantidas, ou seja, relativas a níveis de reservatórios, tempos de operação e em relação às variáveis.

Os parâmetros utilizados para os algoritmos genéticos foram: taxa de mutação de 0,075; tamanho da população 1000; e convergência de 0,001.

Operação do Reservatório R5 (AG)

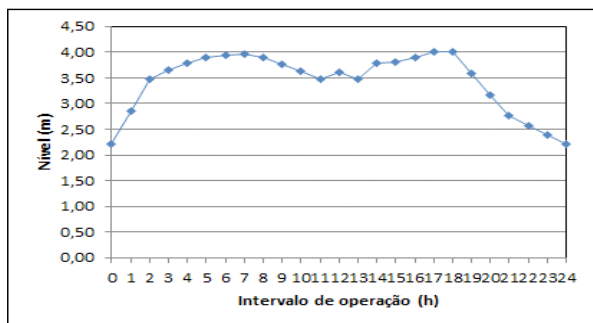
Nas Figuras 11 e 12, tem-se os resultados obtidos da operação. A solução obtida pelo AG é praticamente igual à obtida com a PNL. No entanto, foram necessárias várias soluções iniciais (populações) para o modelo chegar à solução ótima. No Quadro 5 estão os custos das operações.

Figura 11 – Tempo de operação de cada bomba para o R5, usando AG.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 12 – Variação do nível do R5 na operação otimizada, usando AG

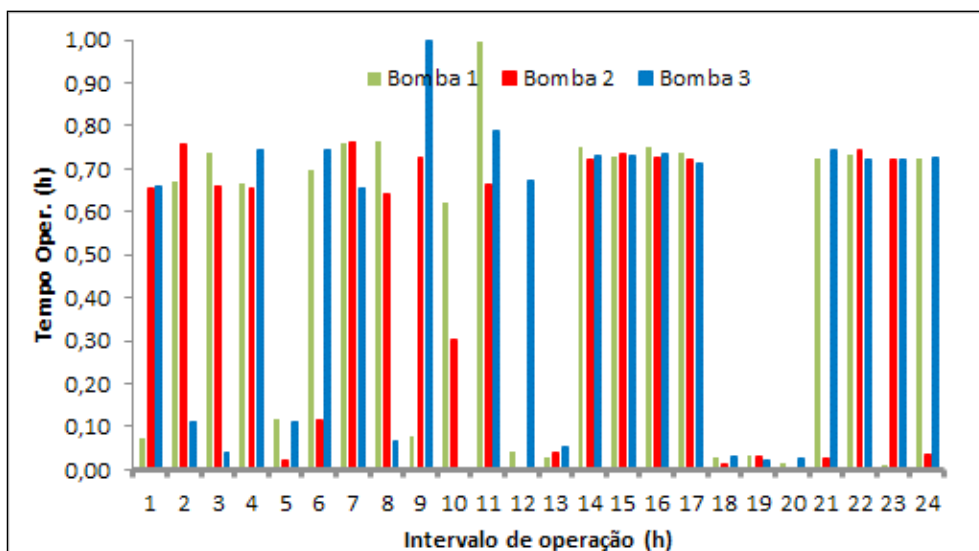


Fonte: Elaboração do autor.

Operação do Reservatório R4 (AG)

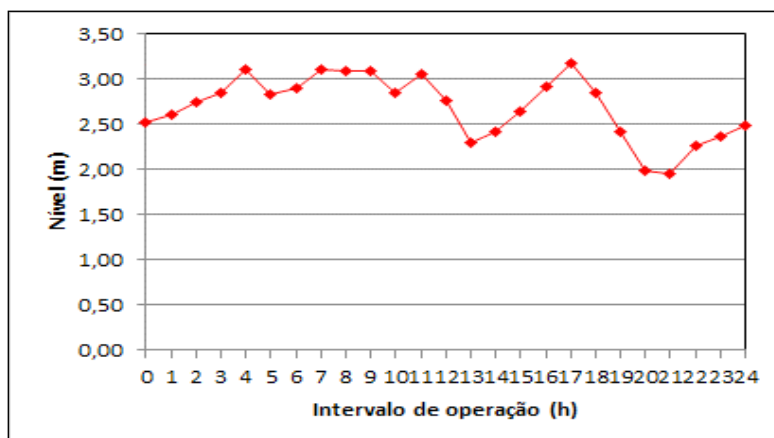
Nas Figuras 13 e 14, tem-se os resultados obtidos da operação. Nessa operação houve uma variação considerável no acionamento das bombas com relação à solução obtida com o PNL. O modelo não eliminou em 100% a operação no horário de ponta como na PNL. Outro aspecto é que com o AG, as três bombas foram operadas simultaneamente mais vezes. Com relação ao custo da operação praticamente não houve diferença (Quadro 5). O comportamento do reservatório também foi semelhante ao resultado anterior com a PNL.

Figura 13 – Tempo de operação de cada bomba para o R4, usando AG.



Fonte: Elaboração do autor

Figura 14 – Variação do nível do R4 na operação otimizada, usando AG.



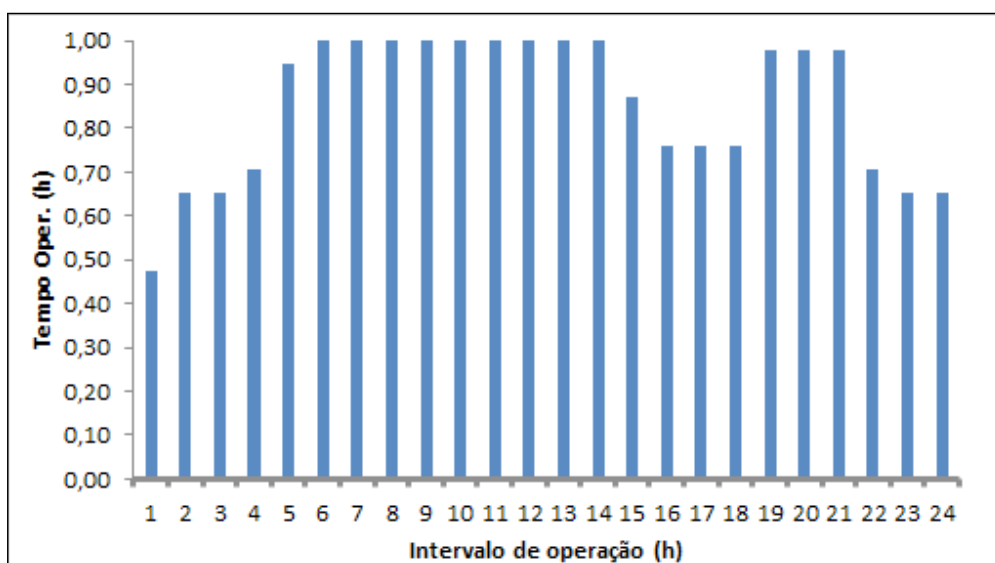
Fonte: Elaboração do autor.

Operação do Reservatório RLS (AG)

Nas Figuras 15 e 16, tem-se os resultados obtidos da operação. A solução obtida pelo AG também apresenta variações em relação ao acionamento da bomba, no entanto com custo muito próximo do obtido com a PNL (Quadro 4). Merece destaque a variação do nível do reservatório que se comportou de modo

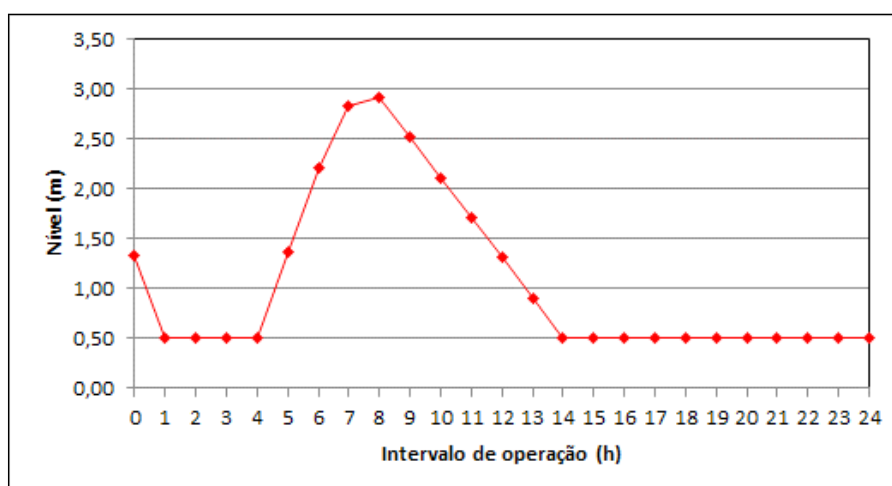
bem distinto. O algoritmo obteve uma solução que procurou equilibrar a entrada com a saída de água do reservatório, mantendo-o no nível mínimo por longo período (Figura 16). Essa solução embora viável fisicamente não é adequada na prática, pois fica vulnerável ao colapso por falta de água.

Figura 15 – Tempo de operação de cada bomba para o RLS, usando AG.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 16 – Variação do nível do RLS na operação otimizada, usando AG.



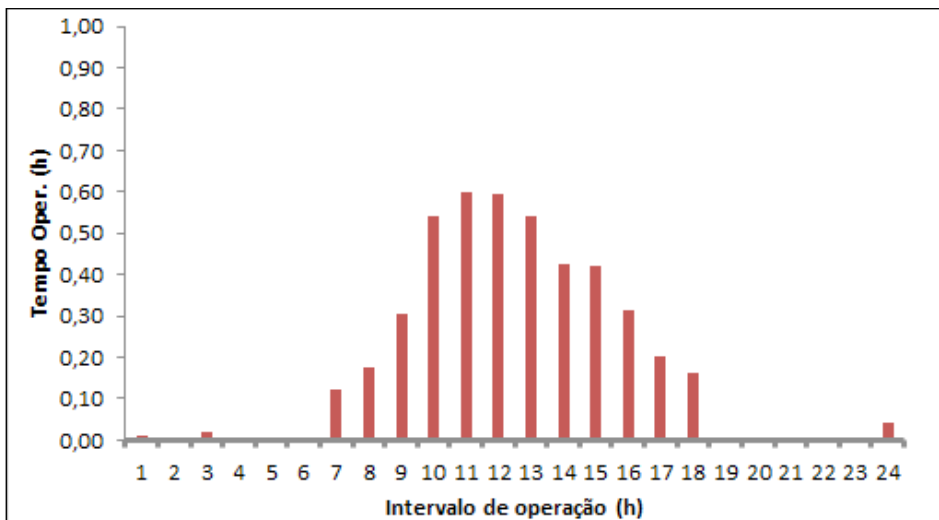
Fonte: Elaboração do autor.

Operação do Reservatório RC (AG)

Nas Figuras 17 e 18, tem-se os resultados obtidos da operação. O AG encontrou solução viável com

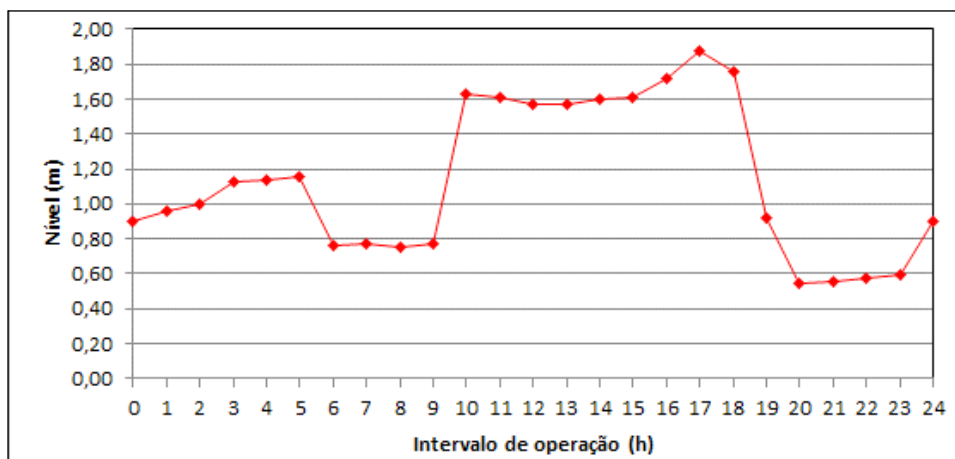
configuração diferente da PNL, no entanto com custo similar (Quadro 6). Desse modo, o comportamento do reservatório também apresentou algumas variações em relação ao PNL.

Figura 17 – Tempo de operação de cada bomba para o RC, usando AG.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 18 – Variação do nível do RC na operação otimizada, usando AG.



Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 5 – Custo (R\$/dia) otimizado das operações das estações elevatórias com AG.

Operação	R5	R4	RLS	RC	TOTAL (AG)	TOTAL (PNL)
Fora de ponta	7.046,32	924,58	644,22	180,78	8.795,90	8.847,76
Na ponta	1.368,27	6,74	119,91	8,68	1.503,60	1.455,44
	8.414,59	931,32	764,13	189,46	10.299,50	10.303,21

Fonte: Elaboração do autor.

Segundo Barbosa et al. (2018), entre 2003 e 2015 o consumo médio de energia dos sistemas de distribuição de água no Brasil foi de $0,65 \pm 0,02$ kWh/m³.

Ainda em Barbosa et al. (2018), nos sistemas de água do Estado da Califórnia (EUA), esse indicador foi de 0,38 kWh/m³ na Carolina do Norte e 2,70 kWh/m³ na Carolina do Sul. Na China, o consumo específico foi de 0,29 kWh/m³ em 2011 e na Índia, os valores indicados são de 0,30 kWh/m³.

No presente trabalho, os seguintes consumos específicos foram obtidos: elevatória do EE 1 (ETA-R5) de 0,897 kWh/m³; EE 2 (R5-R4) de 0,16 kWh/m³; EE 3 (R4-RLS) de 0,617037 kWh/m³; e EE 4 (R4-RC) de 0,471852 kWh/m³. Os resultados demonstram que os consumos específicos não estão muito discrepantes dos dados indicados em Barbosa et al. (2018). Considerando a média do subsistema estudado, tem-se 0,537 kWh/m³, sendo mais eficiente a EE 2 (R5-R4) e a menos eficiente a EE 1 (ETA-R5), o que pode ser justificado pela maior demanda e por ser necessária à operação em horário de ponta com bombas de elevada potência.

Com relação aos modelos propostos, pode-se observar que tanto o modelo de PNL quanto o modelo de Algoritmos Genéticos foram capazes de encontrar soluções para o problema, que não se pode garantir como ótimas globais. Outra constatação é que existem inúmeras soluções, ou seja, combinações de bombas ligadas e desligadas, que implicarão em custos similares. Em termos de agilidade para obtenção de resposta, o PNL se mostrou muito mais viável.

O uso do Excel apresenta limitações em relação ao tamanho do problema a ser otimizado, no entanto demonstrou ser uma ferramenta de fácil utilização e que apresenta resultados satisfatórios.

4 Conclusões

O sistema tem elevada complexidade em função da não linearidade dos fenômenos e do grande número de variáveis do modelo. O sistema estudado tem um elevado custo operacional diário com bombeamento na ordem de R\$ 10.300, sendo que 81,69% desse custo é gerado pela adução de água da ETA ao reservatório R5. Das quatro elevatórias modeladas apenas as do R4 e de RC permitiram o desligamento das bombas no horário de ponta. A restrição de recuperar o nível inicial do reservatório e a capacidade do bombeamento não possibilitam operar totalmente fora da ponta para R5 e RLS. Os reservatórios R5 e R4 apresentam níveis

elevados durante toda a operação diária em função das demandas desses reservatórios, exigindo um bombeamento quase que contínuo nas 24 horas.

O modelo baseado na programação não linear (GRG) permitiu a obtenção de soluções para a minimização do custo com grande rapidez, buscando eliminar a ativação de bomba no horário de ponta, quando foi possível fisicamente. Aplicando os algoritmos genéticos foram obtidos custos praticamente iguais ao do GRG, no entanto, o algoritmo não foi eficiente na programação das bombas, operando bombas no horário de ponta. Com relação ao tempo de processamento para encontrar uma solução viável, os algoritmos genéticos foram consideravelmente mais lentos.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao IFPB Campus Campina Grande pelo o apoio financeiro disponibilizado para a execução da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BARDALES, K. L. N. et al. Otimização energética operacional de sistemas de bombeamento de água tratada utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2007, Belo Horizonte (Brasil). Anais... 2007.
- BARBOSA, W. H. A. et al. Consumo de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água. In: 29º CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2018, São Paulo (Brasil). Anais... 2018. 12 p.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. SNS. Sistema nacional de informações sobre saneamento: 24º diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2018. Brasília (Brasil): SNS/MDR, 2019. 180 p.
- CARRIJO, I. B. Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina. 2004. 233 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)—Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (Brasil), 2004.
- DUARTE, P. H. A., COVAS, D. I. C. Avaliação do desempenho energético em sistemas de abastecimento

de água. In: VIII SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO, 2008, Lisboa (Portugal). Anais... 2008. 17p.

LACERDA, I. S. Regras de operação para sistemas de abastecimento de água com baixo nível de automação e sujeitos a incertezas. 2009, 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)–Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (Brasil), 2009.

LANSEY, K. E.; AWUMAH, K. Optimal pump operations considering pump switches. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 1, p. 17-35, 1994.

LUCENA, K. F. M. EPANET-IRRIG: aperfeiçoamento do EPANET para Aplicações em sistemas de irrigação. *Revista Principia*, n. 20, p. 9-21, 2012.

MACHADO, E. C. N. et al. Operação multi-objetivo de sistemas de abastecimento de água: algoritmo genético. In: VIII SEMINÁRIO HISPANO-BRASILEIRO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA (SEREA), 2008, Lisboa (Portugal). Anais... 2008.

NASCIMENTO, F. G. Diagnóstico operacional de um subsistema do sistema de abastecimento de água de Campina Grande. 2019. 83 f. Monografia (Tecnologia em Construção de Edifícios), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campina Grande (Brasil), 2019.

ROSSMAN, L. A. EPANET 2 users manual. Washington (United States): U.S. Environmental Protection Agency, 2002. 201p.

SJOBOM JUNIOR, A. A.; OLIVEIRA, M. A. A. Otimização de bombeamento com algoritmos genéticos e previsor de nível nas próximas 24 horas. In: VI SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA (SEREA), 2006, João Pessoa (Brasil). Anais... 2006.

VICENTE, R. V. Modelo de operação para centros de controle de sistemas de abastecimento de água - estudo de caso: sistema adutor metropolitano de São Paulo. 2005. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica)–Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (Brasil), 2005.