LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
João Pessoa - PB, 3 a 5 de novembro de 2020

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS COM ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM RESTRIÇÕES DE PRESSÃO PARA ATENDIMENTO DA DEMANDA

Letícia Maria Miquelin
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Bauru - SP
leticia.miquelin@unesp.br

Edilaine Martins Soler
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Bauru - SP
edilaine.soler@unesp.br

Maristela Oliveira dos Santos
Universidade de São Paulo
São Carlos - SP
mari@icmc.usp.br

RESUMO

Nos sistemas de abastecimento de água grande parte dos custos com energia elétrica são provenientes da operação das bombas hidráulicas. No Brasil, assim como em muitos países, o custo da energia elétrica cobrado varia de acordo com as horas do dia. Desse modo, a fim de obter um modelo mais próximo da realidade dos sistemas de abastecimento, este trabalho apresenta um modelo matemático para minimização dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água, por meio do planejamento da operação do liga/desliga das bombas hidráulicas, que tem como diferencial o uso de restrições que garantem pressão suficiente para atendimento da demanda através do volume dos tanques. Testes numéricos foram realizados e o modelo proposto mostrou-se eficiente nos testes com um sistema de abastecimento de água da literatura sob diferentes cenários de perda de água e tamanho dos períodos do horizonte de planejamento.

PALAVRAS CHAVE. Otimização, Sistemas de Abastecimento de Água, Bombas Hidráulicas.

PM - Programação Matemática, EN&PG - PO na Área de Energia, Petróleo e Gás, POI - PO na Indústria

ABSTRACT

In water supply systems, a large part of the electricity costs come from the operation of hydraulic pumps. In Brazil, as in many countries, the cost of electricity charged varies according to the hours of the day. Thus, in order to obtain a model closer to the reality of the supply systems, this work presents a mathematical model for minimizing the costs of electricity in water supply

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

systems, by planning the operation of the pump on / off hydraulic, which has as a differential the use of restrictions that guarantee enough pressure to meet the demand through the volume of the tanks. Numerical tests were performed and the proposed model proved to be efficient in tests with a water supply system in the literature under different scenarios of water loss and size of the planning horizon periods.

KEYWORDS. Optimization, Water Supply Systems, Hydraulic Pumps.

MP - Mathematical Programming, EN&PG - OR in the Area of Energy, Oil and Gas, ORI - OR in Industry

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

1. Introdução

Otimizar a operação das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água vem sendo objeto de estudo de pesquisadores e de interesse das empresas de saneamento básico. Nestes, as bombas hidráulicas são responsáveis pela captação de água dos reservatórios (rio, manancial, poço, represa) que abastecem os tanques, pela transferência de água entre os tanques e, em alguns casos, por atender a demanda, quando esta não pode ser feita por gravidade. Com isso, planejar o liga/desliga das bombas acarreta na diminuição dos gastos com energia elétrica por parte das empresas.

As empresas de saneamento básico são classificadas como consumidores do Grupo A (alta tensão) pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [ANEEL, 2010], que é responsável pela definição das tarifas de energia elétrica no Brasil. Para as empresas de saneamento a estrutura tarifária utilizada é a horo-sazonal, caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas para o consumo de energia elétrica de acordo com a hora do dia e com o período do ano. As tarifas no horário de ponta, que compreende os períodos críticos, das 18h às 21h, são mais elevadas que nos demais horários; e as tarifas aplicadas nos meses com menor volume de chuva são mais elevadas que as dos meses chuvosos.

Dados históricos apontam para uma tendência crescente no consumo de energia pelos sistemas de abastecimento de água, que geralmente acompanha os aumentos nos índices de atendimento e de consumo per capita de água. Em seu relatório anual, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), descreve que, em 2018, os gastos com energia elétrica dos sistemas de abastecimento aumentaram cerca de 18% em relação a 2017 [SNIS, 2019]. Parte deste aumento nos gastos com energia elétrica se deve aos reajustes das tarifas para serviços públicos. Além disso, cerca de 95% do consumo de energia elétrica nas empresas de abastecimento de água é gerado pelos sistemas de bombeamento [Tsutiya, 2001], onde, a operação comumente observada na prática consiste no acionamento das bombas hidráulicas quando os tanques chegam próximos aos seus níveis mínimos, mantendo-as ligadas até que se atinjam seus níveis máximos. Tal operação não é adequada do ponto de vista econômico, pois, com o alto valor da energia elétrica no Brasil, e, com a variação do preço das tarifas de energia elétrica de acordo com as horas do dia, o não planejamento do liga/desliga das bombas acaba por onerar o orçamento das empresas de saneamento.

Modelos de otimização vem sendo desenvolvidos desde a década de 80 para o planejamento operacional das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento. [Zessler e Shamir, 1989] propõem um modelo de otimização não linear que utiliza restrições que estabelecem a vazão máxima das bombas e os volumes mínimos e máximos de água nos tanques, além de seus volumes iniciais e finais. Um método de otimização híbrido para o problema é proposto em [Van Zyl et al., 2004], além de fornecer uma rede fictícia amplamente utilizada em testes por outros autores em trabalhos posteriores. [Toledo et al., 2008] propõem um modelo matemático para o problema da operação das bombas hidráulicas considerando a interdependência entre os tanques. [Kurek e Ostfeld, 2013] utilizam um modelo multiobjetivo para o problema levando em consideração não só a operação das bombas, mas também a qualidade da água fornecida aos consumidores e o dimensionamento de tanques a serem instalados. [Vieira et al., 2020] apresentam uma formulação matemática que inclui aspectos relacionados ao estado do sistema quando os tanques estão cheios, não considerado em trabalhos anteriores, além de fornecer uma nova rede de testes de acordo com os parâmetros e condições tarifárias energéticas brasileiras.

O uso eficiente da energia elétrica e a redução das perdas de água permitem um maior retorno financeiro, já que acarretam na diminuição dos custos nos sistemas de abastecimento. Assim, visando obter um modelo mais próximo da realidade dos sistemas de abastecimento, este trabalho

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

propõe um modelo matemático para a minimização dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água através do planejamento da operação das bombas hidráulicas. Tal modelo tem como diferencial o uso de restrições que visam exigir pressão suficiente para que a água chegue aos centros consumidores por meio da gravidade, considerando os estoques dos tanques e suas respectivas demandas. Além disso vale ressaltar que o planejamento da operação das bombas é realizado sem prejudicar o abastecimento da população ou necessitar de mudanças na rede do sistema de abastecimento.

O modelo proposto foi implementado no software GAMS e resolvido através do pacote de otimização CPLEX, o qual mostrou-se eficiente na resolução de tal para um sistema de abastecimento de água da literatura. Testes numéricos foram realizados sob diferentes cenários de perda de água e tamanho de períodos, comprovando a versatilidade e eficiência do modelo desenvolvido.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta o modelo matemático proposto. Na Seção 3 são apresentados os testes numéricos realizados com o modelo, assim como os resultados e as discussões pertinentes. Finalmente, a Seção 4 apresentada as respectivas conclusões e perspectivas acerca do trabalho.

2. Modelo matemático

O modelo proposto é baseado em [Toledo et al., 2008], com a realização de alterações e a inclusão de novas restrições a fim de obter-se um modelo mais próximo da realidade dos sistemas de abastecimento.

A principal característica do modelo proposto é a incorporação de restrições que visam exigir pressão suficiente para que a água chegue aos centros consumidores considerando os estoques dos tanques e suas demandas. Para garantir tal pressão o estoque de água ao final de cada período, em cada tanque, deve ser maior que um valor mínimo relacionado à demanda correspondente, de modo a atendê-la.

Restrições que dizem respeito ao número mínimo de períodos que uma bomba deve permanecer ligada após ser acionada foram adicionadas, com o objetivo de evitar o excesso de liga/desliga das bombas, baseadas em [Ghaddar et al., 2015]. Também foram utilizadas restrições que obrigam o estoque de água no início e no final do horizonte de planejamento a serem próximos, para cada tanque, baseadas em [Bagirov et al., 2013], de modo a favorecer a continuidade do horizonte de planejamento.

Consideramos os seguintes índices, parâmetros e variáveis para o modelo proposto.

Índices:

j, l: 1, ..., R; referem-se aos tanques;
k: 1, ..., B; referem-se aos centros consumidores;
t: 1, ..., T; referem-se aos períodos (horizonte de planejamento);
i: 1, ..., F; referem-se as faixas de demanda.

Parâmetros:

d_{kt}: demanda (em m^3) do centro consumidor k no período t;
c_{jt}: custo de manter ligada a bomba j durante o período t;
sc_{jt}: custo de partida da bomba j no período t;
v_{jt}: vazão (em m^3) da bomba j no período t;
w_{jlt}: vazão (em m^3) da bomba para transportar água do tanque j para l no período t;
h_j^{max}: volume (em m^3) máximo permitido para o tanque j;
h_j^{min}: volume (em m^3) mínimo permitido para o tanque j;
h_j^0: volume (em m^3) inicial do tanque j;
S_j: $\{k$, tal que o centro consumidor k é abastecido pelo tanque $j\}$;

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

R_j: $\{l$, tal que l é um tanque que pode receber água do tanque $j\}$;
P_j: $\{l$, tal que l é um tanque que pode enviar água para o tanque $j\}$;
γ_{jlt}: custo de transferência de água do tanque j para l no período t;
θ_{jt}: perda de água no tanque j no período t (em %);
τ: número mínimo de períodos que a bomba deve permanecer ligada após ser acionada;
$\overline{d}_{i-1}$, $\overline{d}_i$: limites inferior e superior, respectivamente, da faixa de demanda i;
vol_{ji}: volume mínimo que o tanque j precisa ter para atender a demanda na faixa $[\overline{d}_{i-1}; \overline{d}_i]$;
β: diferença (em %) permitida entre o volume inicial e ao final do horizonte de planejamento em cada tanque.

Variáveis de decisão:

I_{jt}: volume de água (em m^3) no tanque j no final do período t;

$$x_{jt}: \begin{cases} 1, & \text{se a bomba } j \text{ esta ligada no período } t; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$\alpha_{jt}: \begin{cases} 1, & \text{se a bomba } j \text{ é acionada no período } t; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$z_{jlt}: \begin{cases} 1, & \text{se há transferência de água do tanque } j \text{ para } l \text{ no período } t; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$y_{ikt}: \begin{cases} 1, & \text{se } \overline{d}_{i-1} \leq d_{kt} \leq \overline{d}_i; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Desse modo, o modelo matemático proposto é dado por:

$$min \quad \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{R}(c_{jt} * x_{jt} + sc_{jt} * \alpha_{jt}) \quad + \quad \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{R}\sum_{l \in R_j}(\gamma_{jlt} * z_{jlt}) \tag{1}$$

s.a

$$I_{jt} = (1-\theta_{j,t-1}) * I_{j,t-1} + v_{jt} * x_{jt} + \sum_{l \in P_j}(w_{ljt} * z_{ljt}) - \sum_{l \in R_j}(w_{jlt} * z_{jlt}) - \sum_{k \in S_j} d_{kt}, \quad j \in R, t \in T; \tag{2}$$

$$\alpha_{jt} \geq x_{jt} - x_{j,t-1}, \quad j \in R, t \in T; \tag{3}$$

$$h_j^{min} \leq I_{jt} \leq h_j^{max}, \quad j \in R, t \in T; \tag{4}$$

$$\alpha_{jt} \leq x_{jt'}, \quad t \leq t' \leq t + \tau, \quad j \in R, t \in T; \tag{5}$$

$$\sum_{i=0}^{F} \overline{d}_i * y_{i+1,kt} < d_{kt} \leq \sum_{i=1}^{F} \overline{d}_i * y_{ikt}, \quad k \in B, t \in T; \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{F} y_{ikt} \leq 1, \quad k \in B, t \in T; \tag{7}$$

$$I_{jt} \geq \sum_{i=1}^{F}(y_{ikt} * vol_{ji}), \quad j \in R, k \in B, t \in T; \tag{8}$$

$$(1-\beta) * I_{j0} \leq I_{jT} \leq (1+\beta) * I_{j0}, \quad j \in R; \tag{9}$$

$$x_{j0} = 0, \quad j \in R; \tag{10}$$

$$I_{j0} = h_j^0, \quad j \in R; \tag{11}$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, \alpha_{jt} \in \{0,1\}, z_{ljt} \in \{0,1\}, y_{ikt} \in \{0,1\}, \quad j \in R, l \in R_j, t \in T, i \in F. \tag{12}$$

A função objetivo (1) representa os custos com energia elétrica relacionados ao funcionamento e ao acionamento das bombas de captação e ao funcionamento das bombas de transferência do sistema de abastecimento de água.

As restrições (2) representam o balanceamento do volume (estoque) de água em cada um dos períodos, para cada um dos tanques. As restrições (3) asseguram que, caso a bomba j seja ligada durante o período t-1, ela poderá ser utilizada no período t sem o custo de acioná-la. Os volumes mínimos e máximos de água em cada um dos tanques, a cada período, são definidos pelas restrições (4).

As restrições (5) foram baseadas em [Ghaddar et al., 2015] e garantem que, se uma bomba de captação for acionada, esta ficará ligada por pelo menos τ períodos. Tais restrições têm como objetivo diminuir o número de acionamentos das bombas de modo a reduzir os custos com energia e diminuir o desgaste das bombas.

As restrições (6)-(8) propostas neste trabalho asseguram que, no abastecimento feito por força da gravidade, haverá pressão suficiente, assegurada pelo nível dos tanques, para que a água seja transportada do tanque até os nós de demanda que este deve atender. A variável y_{ikt} assume 1 quando a demanda do centro consumidor k no período t (d_{kt}) está dentro do intervalo (faixa) de demanda $[\overline{d}_{i-1}; \overline{d}_i]$. Deste modo, as restrições (6) e (7) indicam que a demanda (d_{kt}) deve pertencer a apenas um intervalo (faixa) de demanda; e as restrições (8) dizem que o estoque do tanque deve ser maior ou igual ao volume mínimo exigido pela faixa em que a demanda deste se encontra.

Para que o volume dos tanques fiquem próximos no início e ao final do horizonte de planejamento definimos as restrições (9), baseadas em [Bagirov et al., 2013], as quais o volume do tanque ao final do horizonte de planejamento (I_{jT}) pode ter uma diferença em porcentagem (β) em relação ao volume do mesmo no início do horizonte de planejamento. Tais restrições tem como objetivo facilitar o planejamento da operação de um futuro horizonte de tempo.

Os estados das bombas são ajustados para desligado no início do horizonte de planejamento pelas restrições (10). As restrições (11) definem o volume inicial dos tanques. Por fim, as restrições (12) definem as variáveis como binárias.

3. Testes numéricos

O modelo proposto em (1)-(12) foi implementado no *software* GAMS, versão 24.5.6, e resolvido através do pacote de otimização CPLEX 12.6. Todos os testes foram realizados em um computador com processador Intel Core i7, com 16 GB de mémoria RAM e sistema operacional Windows 10 Pro.

As instâncias testadas foram geradas com base nos dados descritos em [Toledo et al., 2008]. Foi considerado um sistema de abastecimento composto por três reservatórios, três tanques de armazenamento e três centros consumidores. Cada reservatório é responsável pelo abastecimento

de um tanque através de bombeamento, e cada tanque é responsável por atender a demanda de um centro consumidor por gravidade. Além disso, pode haver transferência de água através de bombeamento entre os tanques 1 e 2, e entre os tanques 2 e 3, conforme a Figura 1.

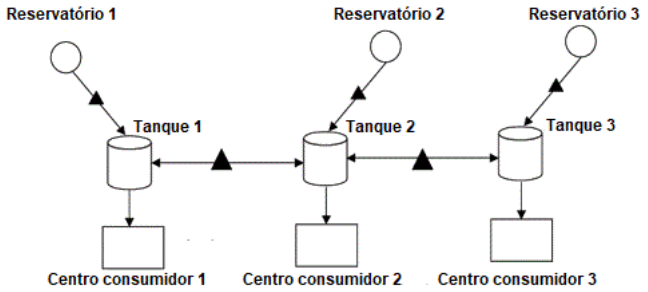


Figura 1: Sistema de abastecimento. Fonte: Baseado em [Toledo et al., 2008].

Os testes numéricos foram realizados com o horizonte de planejamento de um dia (24h), onde foram feitas duas variações em relação ao tamanho dos períodos. Na primeira variação o horizonte de planejamento foi dividido em 24 períodos de uma hora cada, assim como em [Toledo et al., 2008], onde os períodos críticos são os 18, 19 e 20, compreendidos entre as 18h e às 21h. Para a segunda variação, o horizonte de planejamento foi dividido em 96 períodos de 15 minutos cada, onde os períodos críticos são os compreendidos de 73 a 84, também entre as 18h e às 21h. A justificativa para a utilização dos períodos de 15 minutos se deve pois, segundo [Naoum-Sawaya et al., 2015], na Europa, os valores da energia elétrica para empresas de saneamento mudam a cada 15 minutos. Para que esta comparação pudesse ser realizada de forma adequada, o valor da demanda a cada uma hora é a mesma em ambos os casos. Deste modo, a Tabela 1 apresenta a demanda (em m^3) para cada centro consumidor, a cada hora do horizonte de planejamento.

Tabela 1: Demanda (em m^3) de cada centro consumidor a cada hora do horizonte de planejamento.

Hora	Centro consumidor			Hora	Centro consumidor			Hora	Centro consumidor		
	1	2	3		1	2	3		1	2	3
1	10	11	10	9	139	131	121	17	258	255	243
2	11	10	15	10	200	204	190	18	270	270	263
3	15	13	10	11	169	162	152	19	268	270	260
4	21	20	12	12	184	177	167	20	200	208	198
5	22	25	22	13	198	200	208	21	145	150	135
6	30	23	21	14	201	183	200	22	89	80	73
7	100	102	90	15	224	230	214	23	18	15	10
8	115	105	120	16	239	242	229	24	15	17	7

Para ambos os testes foram considerados que o custo para manter uma bomba de captação ligada durante uma hora é igual a 30 unidades monetárias (u.m.) nas horas não pertencentes aos períodos de ponta, e de 60 u.m. as pertencentes ao período de ponta. O custo de partida e de transferência de uma bomba foram considerados iguais a 1 u.m. em todas as horas. Além disso, a vazão de uma bomba de captação foi considerada como sendo 300 m^3 por hora, e das bombas de transferência de 50 m^3 por hora. Uma bomba deve permanecer ligada por pelo menos duas horas a partir do momento que é acionada, ou seja, para os testes considerando períodos de 1 hora, τ =

2; e para os com períodos de 15 minutos, $\tau = 8$. O volume mínimo de água permitido para os três tanques é igual a 270 m^3, que também é o valor de seus volumes iniciais, e o volume máximo é de 2000 m^3 para o primeiro tanque e 1000 m^3 para os demais tanques.

Além da variação no tamanho dos períodos, foram realizados testes utilizando diferentes porcentagens de perda de água no sistema, onde consideramos 0%, 5% e 10% de perda a cada hora.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para a função objetivo nos testes realizados utilizando períodos de 1h e 15min cada, para as variações de 0%, 5% e 10% de perdas de água. É possível observar que, em todos os casos, a instância utilizando períodos de 15min é a que apresenta menor custo com energia elétrica. Isto ocorre pela maior liberdade de escolha dos horários de acionamento das bombas da instância que utiliza períodos de 15min em comparação a que utiliza períodos de 1h.

Tabela 2: Comparação entre os valores das funções objetivo (em u.m.) - 0%, 5% e 10% de perda.

% de perda	F.O.(u.m.) - Períodos de 1h	F.O.(u.m.) - Períodos de 15min
0%	1046,00	712,00
5%	1253,00	897,25
10%	1525,00	1093,50

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos para o tempo de execução dos testes (em segundos) realizados utilizando períodos de 1h e 15min cada, para as variações de 0%, 5% e 10% de perdas de água. Nesta é possível observar que o tempo de execução do modelo que utiliza períodos de 15min é maior do que o que utiliza períodos de 1h. Isso ocorre por conta da dimensão da instância ser maior, onde o número de períodos gera uma maior quantidade de variáveis. Mesmo assim, todos os tempos permanecem abaixo de 2 segundos, sendo viável computacionalmente.

Tabela 3: Comparação entre os tempos de execução (em s) - 0%, 5% e 10% de perda.

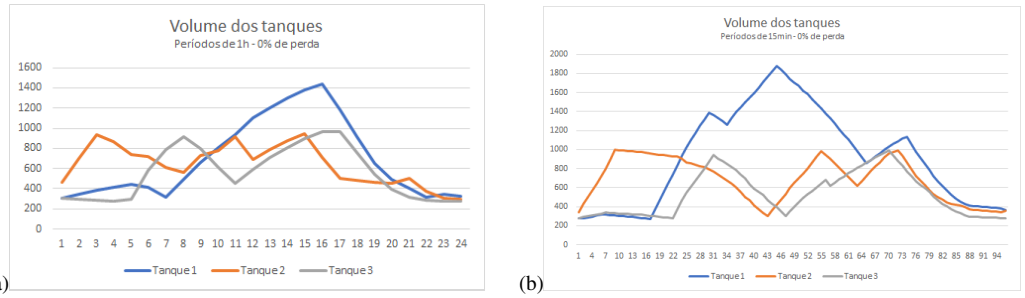
% de perda	Tempo(s) - Períodos de 1h	Tempo(s) - Períodos de 15min
0%	0,540	0,837
5%	0,207	1,034
10%	0,230	0,638

As Figuras 2 a 10 ilustram as soluções obtidas nos testes realizados. As Figuras 2(a), 5(a) e 8(a) ilustram o volume de água nos tanques obtidos nos testes considerando períodos de 1h cada, para 0%, 5% e 10% de perdas, respectivamente; e as Figuras 2(b), 5(b) e 8(b) ilustram o volume de água nos tanques obtidos nos testes considerando períodos de 15min cada, para 0%, 5% e 10% de perdas.

As Figuras 3(a), 6(a) e 9(a) mostram os períodos onde há captação de água; e as Figuras 4(a), 7(a) e 10(a) mostram os períodos onde há transferência de água entre os tranques; para 0%, 5% e 10% de perdas de água, para períodos de 1h. As Figuras 3(b), 6(b) e 9(b) mostram os períodos onde há captação de água; e as Figuras 4(b), 7(b) e 10(b) mostram os períodos onde há transferência de água entre os tanques; para 0%, 5% e 10% de perdas de água, para períodos de 15min.

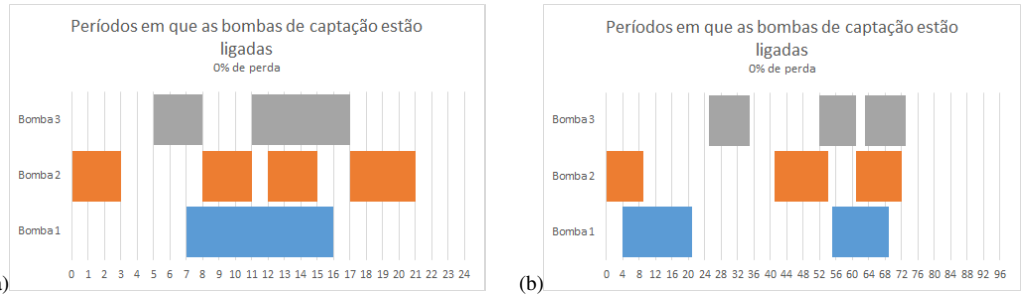
Através das Figuras 2, 5 e 8 é possível observar a tendência do sistema em manter as bombas acionadas nos períodos que antecedem os períodos críticos, de modo a acumular água nos tanques para que estes possam atender ao máximo as demandas dos períodos críticos. Desse modo, evita-se o acionamento das bombas durante os períodos críticos, onde a energia elétrica é mais cara. Além disso, independente do tamanho dos períodos considerado, quanto maior a perda de água, o

sistema tende a armazenar menos água estocada nos tanques. Isto ocorre pois, na prática, quanto maior o volume de água no tanque, maior a pressão que essa exerce no sistema e, consequentemente, maior a quantidade de vazamentos existentes, que acarretam custos.



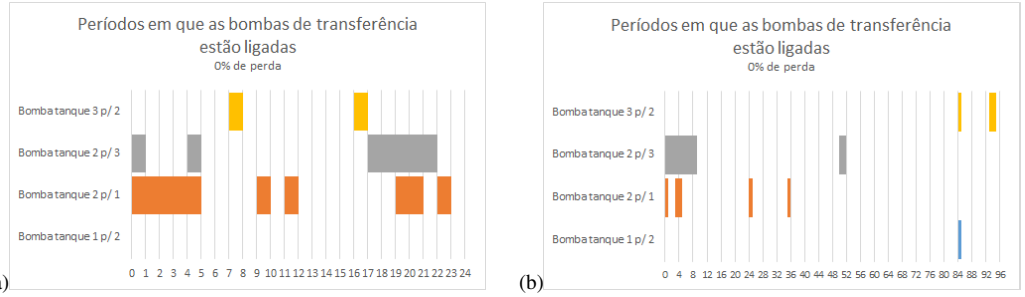
(a) (b)

Figura 2: Volume de água nos tanques ao final de cada período - 0% de perdas para (a) períodos de 1h e (b) períodos de 15min.



(a) (b)

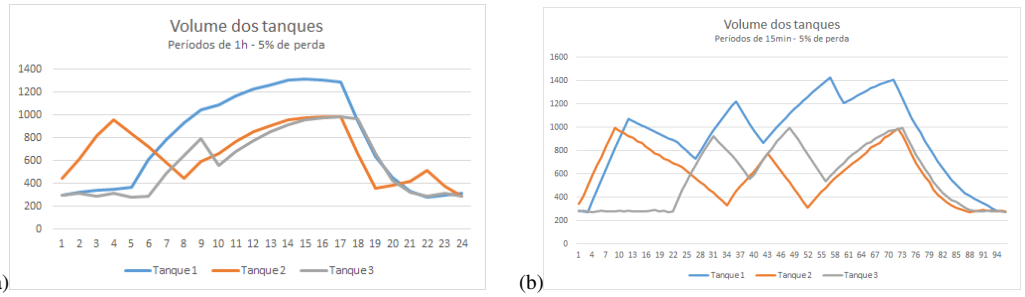
Figura 3: Períodos em que as bombas de captação estão ligadas - 0% de perdas para (a) períodos de 1h e (b) períodos de 15min.



(a) (b)

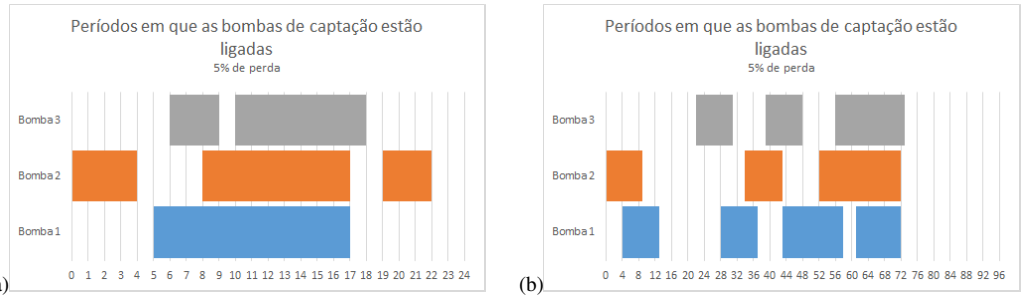
Figura 4: Períodos em que as bombas de transferência estão ligadas - 0% de perdas para (a) períodos de 1h e (b) períodos de 15min.

Comparando os testes utilizando períodos de tamanhos diferentes nota-se que, sobre a política de acionamento das bombas hidráulicas, a instância que utiliza períodos de 1h tem um número menor de acionamentos das bombas de captação do que a que utiliza períodos de 15min, porém, o tempo que as bombas permanecem ligadas após serem acionadas é maior quando utilizamos períodos de 1h, justificando os maiores valores de função objetivo nesses casos.



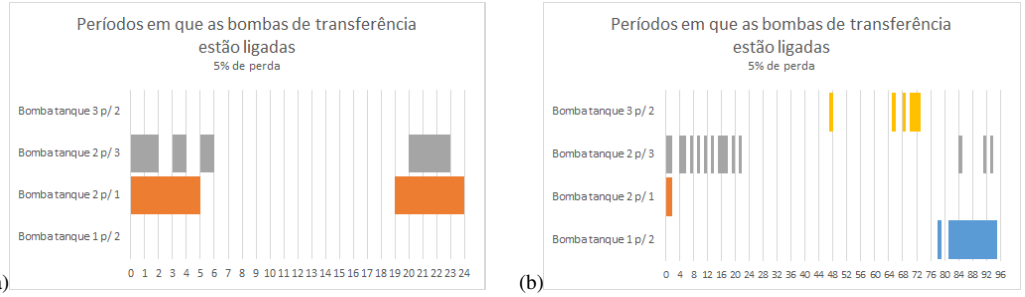
(a) (b)

Figura 5: Volume de água nos tanques ao final de cada período - 5% de perdas para (a) períodos de 1h e (b) períodos de 15min.



(a) (b)

Figura 6: Períodos em que as bombas de captação estão ligadas - 5% de perdas para (a) períodos de 1h e (b) períodos de 15min.

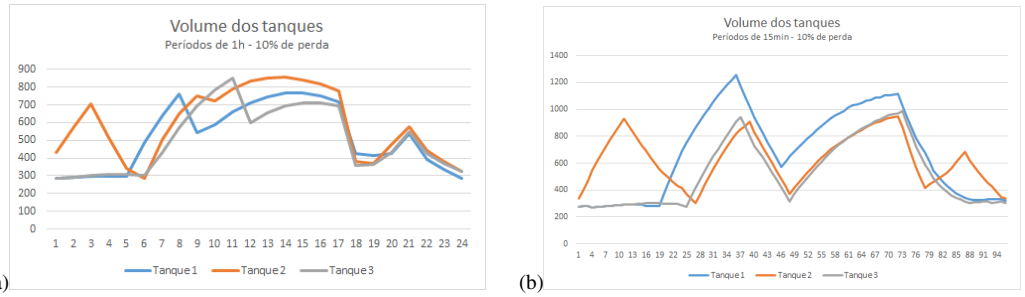


(a) (b)

Figura 7: Períodos em que as bombas de transferência estão ligadas - 5% de perdas para (a) períodos de 1h e (b) períodos de 15min.

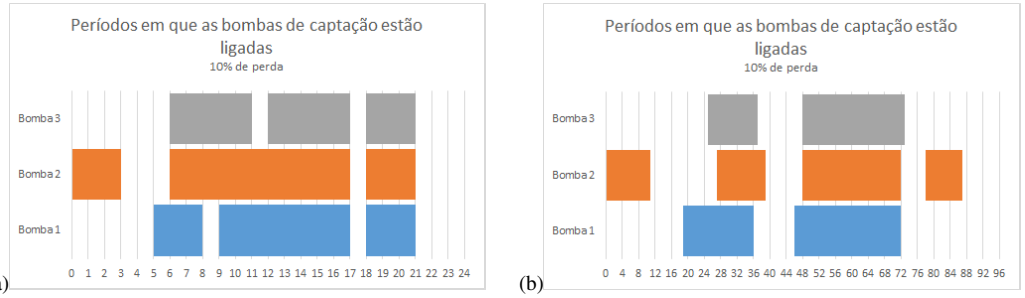
Também podemos observar que o estoque de água ao final do horizonte de planejamento permanece próximo ao estoque inicial em todos os testes. Esta característica favorece o uso do modelo de forma contínua, onde o estoque final do último período do horizonte de planejamento fornece a quantidade de água estocada no início do novo horizonte de planejamento.

Em ambos os casos, utilizando períodos de 1h e períodos de 15min, o modelo proposto se mostrou eficiente, onde os testes utilizando períodos de 15min gera menor custo com energia elétrica.



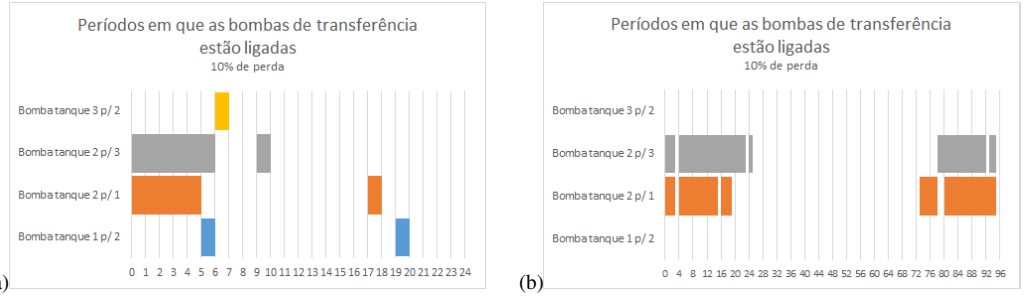
(a) (b)

Figura 8: Volume de água nos tanques ao final de cada período - 10% de perdas para (a) períodos de 1h e (b) períodos de 15min.



(a) (b)

Figura 9: Períodos em que as bombas de captação estão ligadas - 10% de perdas para (a) períodos de 1h e (b) períodos de 15min.



(a) (b)

Figura 10: Períodos em que as bombas de transferência estão ligadas - 10% de perdas para (a) períodos de 1h e (b) períodos de 15min.

4. Conclusões

Neste trabalho foi proposto um modelo matemático para a minimização dos custos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água que tem como diferencial a utilização de restrições que relacionam a pressão do sistema com o volume de água dos tanques, além de restrições que consideram o tempo que as bombas devem permanecer ligadas após serem acionadas e que os níveis do estoque de água dos tanques sejam próximos no início e no final do horizonte de planejamento.

O modelo proposto se mostrou eficiente nos testes numéricos realizados, minimizando os custos com energia elétrica. Além disso, foi possível observar que os testes utilizando períodos de 15min gera menor custo com energia elétrica. Com isso, a escolha do tamanho dos períodos pode

ser realizada pelo operador ou de acordo com a região onde o sistema de abastecimento de água se encontra.

Desta forma, concluímos que o planejamento da operação das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água se faz necessário, tanto para que haja uma diminuição dos gastos com energia elétrica, quanto a diminuição de perdas de água no sistema.

Trabalhos futuros visam a adequação do modelo, adicionando a este outras restrições direcionadas a parte hidráulica dos sistemas de abastecimento de água, de modo a preencher lacunas existentes.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Capes e ao CNPq (processo n^o 313495/2017-3) pelo auxílio financeiro concedido.

Referências

ANEEL (2010). Resolução normativa n. 414. Technical report. URL `http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf`.

Bagirov, A. M., Barton, A., Mala-Jetmarova, H., Al Nuaimat, A., Ahmed, S., Sultanova, N., e Yearwood, J. (2013). An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling. *Mathematical and Computer Modelling*, 57 (3-4):873–886.

Ghaddar, B., Naoum-Sawaya, J., Kishimoto, A., Taheri, N., e Eck, B. (2015). A lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks. *European Journal of Operational Research*, 241(2):490–501.

Kurek, W. e Ostfeld, A. (2013). Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems. *Journal of environmental management*, 115: 189–197.

Naoum-Sawaya, J., Ghaddar, B., Arandia, E., e Eck, B. (2015). Simulation-optimization approaches for water pump scheduling and pipe replacement problems. *European Journal of Operational Research*, 246(1):293–306.

SNIS (2019). *Diagnóstico dos serviços de água e esgotos: 2018*. Programa de Modernização do Setor Saneamento.

Toledo, F., Santos, M. O. d., Arenales, M. N., e Seleghim Júnior, P. (2008). Logística de distribuição de água em redes urbanas: racionalização energética. *Pesquisa Operacional*, 28(1):75–91.

Tsutiya, M. T. (2001). Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água.

Van Zyl, J. E., Savic, D. A., e Walters, G. A. (2004). Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm. *Journal of water resources planning and management*, 130(2):160–170.

Vieira, B. S., Mayerle, S. F., Campos, L. M., e Coelho, L. C. (2020). Optimizing drinking water distribution system operations. *European Journal of Operational Research*, 280(3):1035–1050.

Zessler, U. e Shamir, U. (1989). Optimal operation of water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 115(6):735–752.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings