

Dimensionamento de adutora e reservatório em sistemas de bombeamento de água a partir da otimização de regras de operação

Sizing of pipeline and reservoir in water pumping systems based on the optimization of operating rules



• **Data de entrada:**
17/04/2020




• **Data de aprovação:**
16/03/2021

Joice Cristini Kuritza^{1*} | Mariane Kempka¹ | Mauricio Dai Pra² | Juan Martin Bravo² | Marcelo Giulian Marques²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.043>

ORCID ID

Kuritza JC  <https://orcid.org/0000-0003-0485-1841>
Kempka M  <https://orcid.org/0000-0003-2619-5144>

Pra MD  <https://orcid.org/0000-0002-1858-1531>
Bravo JM  <https://orcid.org/0000-0001-5585-1257>
Marques MG  <https://orcid.org/0000-0002-9948-3094>

Resumo

Neste trabalho, um procedimento metodológico foi desenvolvido para uma tipologia genérica de sistema de bombeamento. Foram avaliadas 96 possibilidades geométricas para esse sistema a partir da combinação de diferentes alturas geométricas, comprimentos e diâmetros. Foram estudados 3 perfis de curva de consumo, com 4 volumes de consumo diário distintos para início e horizonte de projeto. O algoritmo *Shuffled Complex Evolution* foi empregado para obter a regra de operação otimizada, e a função-objetivo foi formulada para representar os custos de operação somados aos custos de instalação do sistema de bombeamento. Os resultados demonstraram que nem sempre é vantajoso o desligamento do sistema durante o período de ponta, especialmente nos casos de sistemas com elevada perda de carga. São propostos critérios de dimensionamento otimizados para o diâmetro da adutora e a capacidade do reservatório, contribuindo com a promoção da eficiência energética ainda na fase de projeto.

Palavras-chave: Sistema de bombeamento. Otimização de regras de operação. Algoritmo SCE-UA.

Abstract

In this work, a methodological procedure was developed for a generic type of pumping system. The 96 geometric possibilities for this system were evaluated from the combination of different geometric heights, lengths and diameters. In addition, three consumption curves were studied, with four distinct daily consumption volumes, in two situations, project start and project final. The mono-objective evolutionary algorithm Shuffled Complex Evolution - SCE-UA was used to obtain the optimized operation rule of the pumping system. The objective function was formulated to represent the energy costs for 20 years of operation plus the costs of installing the system. The results demonstrated that it is not always advantageous to shut down the system during the peak period, especially in the case of systems with high pressure loss. Finally, design criteria optimized for the diameter of the pipeline and the capacity of the reservoir are proposed, contributing to the promotion of energy efficiency even in the design phase.

Keywords: Pump system. Optimization of operating rules. SCE-UA algorithm.

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Guarapuava - Paraná - Brasil.

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - Porto Alegre - Rio Grande do Sul - Brasil.

* **Autora correspondente:** joicekuritza@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Existe uma importante relação entre o consumo de água e o consumo de energia utilizada para disponibilizar água tratada à população. No Brasil, em 2018, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS), foram consumidos 11,5 TWh nos sistemas de abastecimento de água (SAA) (BRASIL 2019). Gomes (2012) pontua, contudo, que a maior parte desse consumo, cerca de 90%, ocorre nos sistemas de bombeamento.

Nessa perspectiva, a adoção de programas de eficiência hidroenergética deve se adequar às particularidades do sistema, quais sejam, existência de programas de medição e monitoramento, disponibilidade de mão de obra, adequações administrativas, valores finais das tarifas de energia, etc. Dentre as medidas de economia de energia e de recursos financeiros, podem-se citar as proposições do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID, 2011), que indicam, por exemplo, a adequação da modalidade de tarifa de energia, a redução de perdas nas instalações elétricas, a melhoria da eficiência dos motores e das bombas, a redução das perdas de carga e dos vazamentos, a manutenção dos equipamentos e a melhoria na operação dos sistemas de bombeamento. Diversos pesquisadores têm direcionado esforços para fomentar as ações de eficiência energética no setor de saneamento, a destacar Ramos et al. (2010), Muranho et al. (2012), Coelho e Andrade-Campos (2014), Solera et al. (2016), Macedo e Bezerra (2017), Moreira, Ferreira e Pereira (2017), Luna et al. (2019) entre outros. Esses autores abordaram diferentes medidas voltadas à promoção da eficiência energética; contudo, neste trabalho, foi dada ênfase à otimização da regra de operação de sistemas de bombeamento operados com inversor de frequência.

Melhorias na regra de operação de sistemas de bombeamento podem ser obtidas, por exemplo,

mediante a utilização de algoritmos de otimização que determinem a variação da rotação das bombas, quando equipadas com inversores de frequência e, conseqüentemente, da vazão bombeada ao longo do dia. Outra forma de obter melhorias na operação dos sistemas de bombeamento é apontada por Tsutiya (2006), que propõe o melhor aproveitamento da capacidade de reserva do sistema, evitando, com isso, a operação das bombas durante o período de ponta do sistema elétrico.

O algoritmo *Shuffled Complex Evolution - University of Arizona* - SCE-UA é conhecido em todo o mundo como um benchmark em otimização mono-objetivo, e tem sido empregado por diversos pesquisadores de diferentes áreas (e.g. Jeon, Park e Engel (2014), Lee e Kang (2016), Kan et al. (2017), Jiang et al. (2018)). O SCE-UA apresenta uma estratégia de otimização global baseada em algoritmos genéticos que foi desenvolvida por Duan et al. (1992) para calibração automática de modelos chuva-vazão. Todavia, apesar da proposta inicial, o algoritmo vem sendo utilizado também em outras áreas da engenharia.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi propor critérios para o dimensionamento de adutoras e de reservatórios de abastecimento de água, a partir da otimização de regras de operação de sistemas de bombeamento operados com inversor de frequência, com vistas à diminuição dos custos de instalação e operação.

2 ALGORITMO SHUFFLED COMPLEX EVOLUTION – UNIVERSITY OF ARIZONA (SCE-UA)

Duan et al. (1992) desenvolveram o algoritmo SCE-UA ao analisar a superfície de resposta de funções-objetivo aplicadas à calibração de modelos hidrológicos, pois constataram que os métodos de calibração automática mono-objetivo

de busca local não conseguiam encontrar o mínimo global.

O algoritmo inicializa criando de forma aleatória um conjunto de soluções candidatas, denominado população. Essa população de pontos se encontra no interior do espaço de busca definido pelos valores máximos e mínimos que cada variável de decisão pode apresentar para que o resultado encontrado seja viável. A população é separada em complexos que evoluem em direção ao ótimo global de uma única função-objetivo, por meio de sucessivas iterações baseadas em um processo de exploração do espaço de busca. Os passos do algoritmo foram apresentados por Duan et al. (1992).

A literatura apresenta a utilização com sucesso do algoritmo em diferentes áreas como calibração automática de modelos hidrológicos (DUAN et al. 1992; DINIZ, 1999; COLLISCHONN e TUCI, 2001; COOPER et al. 2007; DAKHLAOUI et al. 2012; SALLA et al. 2015), determinação das regras de operação lineares em sistemas de reservatórios (KOUTSOYIANNIS et al., 2002; BRAVO et al., 2008; WANG et al., 2010), otimização das soluções para manutenção e reabilitação da infraestrutura de sistemas de pavimentação em centros urbanos (FERREIRA et al., 2000; NUNOO e MRAWIRA, 2004), entre outras.

Siqueira et al. (2016) observaram que, em geral, o algoritmo SCE-UA resolve problemas de otimização com pouquíssimas iterações, mesmo para funções complexas que são de difícil otimização, e Grave (2016) afirma que, alterando a função-objetivo, o método pode ser utilizado para diversos problemas de otimização, com uma vasta gama de aplicação em problemas de engenharia.

A larga utilização do algoritmo SCE-UA para resolver problemas de otimização mono-objetivo em diferentes áreas sugere que a ferramenta também poderia ser útil para o setor de abastecimento de água, passível de otimização em diver-

sos aspectos, como: determinação de regras de operação dos sistemas de bombeamento, avaliação do atendimento de demandas, tomadas de decisão sobre o volume de reservatórios bem como sua variação de nível, entre outros.

3 METODOLOGIA

3.1 Definição das características geométricas dos sistemas

A proposição de otimização de regra de operação de bombeamento foi realizada para um sistema genérico, composto por dois reservatórios, inferior e superior, conjunto motobomba e adutora. A operação do sistema de bombeamento tem velocidade de rotação variável, ou seja, o sistema é dotado de inversor de frequência. No intuito de desenvolver uma metodologia para análise geral da eficiência energética, utilizaram-se variações para altura geométrica (Hg), comprimento (L) e diâmetro (D) da linha adutora, pretendendo a representação de diferentes sistemas de bombeamento.

Foram avaliados sistemas de bombeamento com 4 diferentes alturas geométricas, 4 diferentes comprimentos e 9 diferentes diâmetros, gerando 96 possíveis combinações de sistemas de bombeamentos distintos. No caso dos diâmetros, apenas 6 dimensões foram consideradas para cada combinação das restantes variáveis, as quais eram definidas de acordo com o consumo diário de água. Ou seja, para consumos pequenos, até 2500 m³/dia, foram testados diâmetros até 350 mm; para consumos maiores do que 2500 m³/dia até 6500 m³/dia, foram testados diâmetros entre 200 e 450 mm, para os consumos superiores a 6500 m³/dia, foram testados diâmetros entre 250 e 500 mm. Essa diferenciação entre os diâmetros foi importante para a manutenção das velocidades do escoamento que, quando muito elevadas, acarretam demasiadas perdas de energia.

Além disso, as simulações foram efetuadas para dois cenários distintos, um que representasse o início da operação (ano zero) e outro que representasse o horizonte de projeto (ano 20). A diferença entre esses cenários se dá pelo envelhecimento dos condutos, portanto o coeficiente C foi alterado de 130 (ano zero) para 105

(ano 20) e, também, pelo aumento do consumo. Cabe salientar que as adutoras propostas neste trabalho são de ferro fundido dúctil da classe K7 com junta JGS.

Na Tabela 1 estão sintetizadas as informações acerca das grandezas envolvidas no processo.

Tabela 1 - Valores adotados para as grandezas que compõem o dimensionamento do sistema de bombeamento genérico

Grandeza	Dimensões adotadas				
Altura geométrica - Hg (m)	10	25	50	100	
Diâmetro - D (mm)	100	150	200	250	300
	350	400	450	500	
Comprimento - L (m)	100	500	1000	5000	
Coeficiente de Perda de Carga ¹ - C (m ^{0,367} /s)	Ano zero 130			Ano 20 105	

¹Os valores para o coeficiente de perda de carga são para tubulações de ferro fundido, conforme indicado por Azevedo Netto et al. (1998).

3.2 Curvas de Consumo

A demanda do reservatório superior foi avaliada a partir de três perfis distintos de consumo, expressos de forma adimensional, conforme apresentado na Fig. 1. Os perfis foram categorizados a partir do adimensional denominado fator de consumo (FC) dado pela relação entre os consumos médio (m³/h) e máximo (m³/h). Assim, cada perfil possui valores FC característicos, a destacar, FC1 igual a 0,63 para curva 1, FC2 igual a 0,80 para curva 2 e FC3 igual a 0,43 para curva 3.

Os diferentes valores de FC justificam-se pela origem das curvas, a saber: Curva 1 - representa o perfil de consumo de um município com população estimada em 1,5 milhão de habitantes localizado na região sul do Brasil; Curva 2 - representa o perfil de consumo de um município com população estimada em 500 mil habitantes localizado na região norte do Brasil; Curva 3 - representa o perfil de consumo de um *campus* de uma universidade federal localizado na região Sul do Brasil.

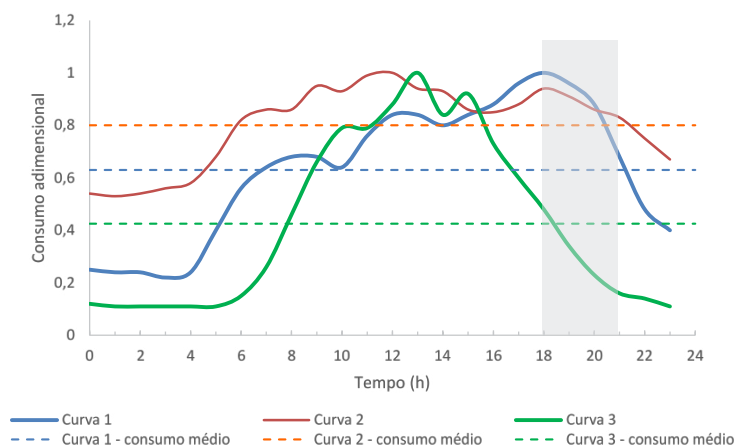


Figura 1 - Curvas de consumo associadas ao reservatório superior, seus respectivos fatores de consumo (FC) e período de ponta (18 h – 20 h59 min)

Fonte: Kuritza (2017).

Adotaram-se quatro variações para o volume de consumo diário (m³/dia) para cada curva, em duas situações: início (ano zero) e horizonte de projeto (ano 20). No ano zero, os volumes de consumo diário avaliados foram 755, 1511, 3777 e 7555 m³/dia. No ano 20, os volumes diários de consumo elevaram-se para 1231, 2463, 6157 e 12315 m³/dia, considerando-se um crescimento anual de 2,5% no consumo de água. Com isso, para início e horizonte de projeto, foram simu-

lados 12 cenários, combinando 3 perfis de curva de consumo e 4 volumes de consumo diário. Ao ter em conta um consumo per capita de 200 L/hab.dia, esses volumes abasteceriam populações bastante variadas, de 2000 a 23000 habitantes, aproximadamente.

Na Tabela 2 estão apresentados os respectivos valores de consumo máximo (m³/h) utilizados na transformação das curvas adimensionais.

Tabela 2 - Consumos máximos para início e horizonte de projeto

	Perfil de consumo	Consumo máximo (m ³ /h)			
Início de projeto (ano zero)	Curva 1 (FC1 = 0,63)	50,0	100,0	250,0	500,0
	Curva 2 (FC2 = 0,80)	39,2	78,5	196,1	392,3
	Curva 3 (FC3 = 0,43)	74,0	148,0	370,0	740,0
	Perfil de consumo	Consumo máximo (m ³ /h)			
Horizonte de projeto (ano 20)	Curva 1 (FC1 = 0,63)	50,0	100,0	250,0	500,0
	Curva 2 (FC2 = 0,80)	39,2	78,5	196,1	392,3
	Curva 3 (FC3 = 0,43)	74,0	148,0	370,0	740,0

3.3 Custos de Implantação e Operação

Os custos de instalação dizem respeito à aquisição dos equipamentos das instalações hidráulicas, tubulações, válvulas, equipamentos elétricos, bombas, entre outros gastos de implantação do sistema, como obras civis, de escavação e de montagem.

O custo de implantação considerado foi composto pelo valor das adutoras, do conjunto motobomba e dos reservatórios. As estimativas foram realizadas a partir de pesquisas em empresas fornecedoras desses materiais e também em companhias de saneamento. As Eq. 1, 2 e 3 estão associadas aos custos de implantação das adutoras, conjunto motobomba e reservatórios, respectivamente.

$$C_{Ad} = (0,0023 \cdot D^2 + 0,5306 \cdot D + 94,99) \cdot L \quad (1)$$

$$C_{MB} = (3,1688 \cdot Pot^2 + 388,55 \cdot Pot + 9022,1) \quad (2)$$

$$C_{Res} = (-0,1202 \cdot V^2 + 345,94 \cdot V + 63443) \quad (3)$$

Onde: C_{Ad} é o custo de implantação da adutora (R\$); D é o diâmetro da adutora (mm); L é comprimento da adutora (m); C_{MB} é o custo de implantação do conjunto motobomba (R\$); Pot é a potência instalada (kWh); C_{Res} é o custo de implantação do reservatório (R\$) e V é o volume do reservatório (m³).

Quanto ao custo de operação, a Tabela 3 apresenta os valores utilizados, tendo por base CEEE (2016). A demanda representa a potência solicitada ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora. O consumo de ponta representa a energia consumida no período de 3 horas diárias consecutivas, definidas pela distribuidora, considerando a curva de carga de seu sistema elétrico, e o consumo fora de ponta representa a energia consumida nas horas diárias consecutivas e comple-

mentares àquelas definidas no horário de ponta. A alíquota de ICMS é o Imposto sobre Circulação De Mercadorias e Serviços, de competência estadual, que incide sobre diversas operações de compra e venda de produtos. O PIS e a Cofins são siglas de dois tributos pertencentes à Constituição Federal, cujas siglas significam Programa de Integração Social e Contribuição para Financiamento da Seguridade Social, respectivamente. São contribuições que incidem sobre a receita bruta das empresas e têm variação mensal.

Tabela 3 - Tarifas de energia na modalidade horo-sazonal verde.

Modalidade Tarifária Horária Verde	A4 (13,8/25kV)
Demanda (R\$/kW)	9,15
Consumo Ponta (R\$/kWh)	1,0376
Consumo Fora de Ponta (R\$/kWh)	0,3327
Alíquota de ICMS	30%
PIS	0,9856%
Cofins	4,8303%

3.4 Descrição do modelo utilizado para determinação da regra de operação do sistema de bombeamento

O algoritmo de otimização SCE-UA foi utilizado para minimizar a função-objetivo, calculada em um modelo de simulação, dada pela soma do custo de instalação ao custo de operação do sistema. As variáveis de decisão foram os volumes de água disponíveis no reservatório superior, em cada intervalo de tempo horário de um dia de operação. Esse algoritmo trabalha com um conjunto de soluções candidatas denominado população. Cada solução candidata é um ponto no espaço de busca, cujas coordenadas são dadas pelos valores das variáveis de decisão. Durante a procura pelo valor ótimo, o conjunto de soluções candidatas é subdividido em subconjuntos, denominados de complexos, a partir dos quais o espaço de busca é explorado e novas soluções candidatas são geradas, substituindo soluções candidatas existentes.

Os parâmetros do algoritmo SCE-UA foram definidos da seguinte forma: 15 complexos (p), 50 pontos em cada complexo (m) resultando em 750 pontos na população e 1000 gerações. O número de 1000 gerações foi utilizado como critério de parada, pois verificou-se que, na maioria dos casos, 500 gerações eram suficientes para convergência; contudo, foi adotado o valor de 1000 gerações de modo a garantir a convergência do SCE-UA em todas as situações, pois todos os problemas de otimização foram resolvidos em batelada, de forma automática. Ressalta-se que o processo de otimização da regra de operação para todas as 96 possibilidades consumia, aproximadamente, 15 minutos em computador Intel Core i5-3320M CPU 2.60 GHz, RAM 4,00 GB.

O processo de otimização se inicia a partir da geração da população inicial de soluções candidatas. A população é composta das 23 variáveis de decisão que representam o volume disponível no reservatório superior. Portanto, a geração da população deve respeitar os níveis mínimo e máximo limites, associados às restrições impostas pelas características físicas do sistema em estudo.

O limite inferior foi fixado em zero e o limite superior foi fixado de modo a corresponder ao volume total consumido em um dia de operação. Além disso, definiu-se que cada valor de volume disponível não poderia ser menor do que a diferença entre o volume anterior e o consumo nesse intervalo de tempo. Também, como restrição, foi determinado que os volumes inicial e final do reservatório superior devem ser iguais, para garantir a continuidade da operação do sistema. O valor adotado foi igual a 5% do volume consumido em um dia de operação.

Outro aspecto a explicitar é que a capacidade total do reservatório foi definida a partir do maior valor dentre os calculados pelo algoritmo para um dia de operação. Para representar os volumes de combate a incêndio e emergência, a capacidade total foi acrescida em 20%.

3.5 Etapas de cálculo da função-objetivo

A função-objetivo foi calculada de acordo com as seguintes etapas:

Etapa A - Cálculo da vazão bombeada por balanço de massa:

Para a primeira hora do dia (Eq. 4);

$$Q_{(1)} = V_{(1)} - V_{inicial} + V_{consumido (1)} \quad (4)$$

Para as demais horas do dia (Eq. 5), sendo (i) = 2, 3, ..., 23;

$$Q_{(i)} = V_{(i)} - V_{i-1} + V_{consumido (i)} \quad (5)$$

Para última hora do dia (Eq. 6);

$$Q_{(24)} = V_{(inicial)} - V_{23} + V_{consumido (24)} \quad (6)$$

Se alguma das 24 vazões calculadas apresentasse valor negativo, o algoritmo atribuía um valor de penalidade à função-objetivo de R\$ 1.000.000,00, valor suficientemente grande para tornar a solução inviável frente às demais;

Etapa B - Cálculo da altura manométrica (Eq. 7);

$$H_m = H_g + \frac{10,67 \cdot Q_i^{1,85} \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad (7)$$

Etapa C - Determinação da velocidade de rotação específica (Eq. 8);

$$Ns = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{H_m^{3/4}} \quad (8)$$

Etapa D - Estimativa do rendimento máximo da bomba, segundo metodologia proposta por Kuritza et al. (2017) (Eq. 9);

$$\eta_{bomba} = e^{5,092 - \frac{9,121}{Ns} - 0,124 \ln(Ns)} \quad (9)$$

Etapa E - Correção do rendimento para as demais vazões de operação, conforme metodologia proposta por Coelho e Andrade-Campos (2016) (Eq. 10);

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} - 1 \right)^3 + 1 \quad (10)$$

Etapa F - Cálculo da potência motriz (Eq. 11);

$$Pot_{mot} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta_{bomba}} \quad (11)$$

Etapa G - Estimativa do rendimento do motor, de acordo com a metodologia proposta por Kuritza et al. (2017) (Eq. 12);

$$\eta_{motor} = 2,9899 \ln(Pot_{mot}) + 79,921 \quad (12)$$

Etapa H - Cálculo da potência elétrica (Eq. 13);

$$Pot_{ele} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta_{bomba} \cdot \eta_{motor}} \quad (13)$$

Etapa I - Cálculo do consumo de energia (Eq. 14);

$$E_{(i)} = Pot_{ele(i)} \cdot \Delta t \quad (14)$$

Ressalta-se que em todo o processo de simulação foi considerado que a potência calculada deve ser fornecida por um único conjunto moto-bomba, ou seja, a operação do sistema de bombeamento segue o esquema de operação (1+1).

Etapa J - Cálculo do custo mensal de operação (Eq. 15);

$$CtF = \frac{(C_P \cdot Cn_P) + (C_{FP} \cdot Cn_{FP}) + (Dm \cdot Pot)}{(1 - PIS - COFINS - ICMS)} \quad (15)$$

Etapa K - Cálculo do fator de atualização utilizado para determinar o valor presente dos custos de ope-

ração ao longo dos 20 anos de operação do sistema de bombeamento (Eq. 16). Nessa equação a taxa de aumento anual de energia e a taxa de juro foram fixadas em 9 e 10%, respetivamente (GOMES, 2009).

$$Fa = \frac{(1 + e)^n - (1 - i)^n}{(1 + e) - (1 + i)} \cdot \frac{1}{(1 + i)^n} \quad (16)$$

Etapa L - Cálculo do custo de instalação (Eq. 17) obtido pelo somatório do custo de implantação da linha adutora (Eq. 1), do conjunto motobomba (Eq. 2) e do reservatório (Eq. 3);

$$C_{ins} = C_{Ad} + C_{MB} + C_{Res} \quad (17)$$

Etapa M - Cálculo da função-objetivo (Eq. 18);

$$FO = CtF \cdot 12 \cdot Fa + C_{ins} + pnl \quad (18)$$

No cálculo das Etapas A até M, CFP é a Tarifa de consumo fora do horário de ponta (R\$/kWh), CnFP é o Consumo de energia fora do horário de ponta (kWh/mês), CnP é o Consumo de energia no horário de ponta (kWh/mês), CP é a Tarifa de consumo no horário de ponta (R\$/kWh), Ct é o Custo mensal de operação sem impostos (R\$/mês), CtF é o Custo mensal de operação com impostos (R\$/mês), D é o Diâmetro (m), Dm é a Tarifa de demanda (R\$/kW), E é a Energia (kWh), e é a Taxa de aumento de

energia, Fa é o Fator de atualização, FO é a Função objetivo (R\$), Hm é a altura manométrica (m), i é a Taxa de aumento de juros, N é a rotação (RPM), n é o horizonte de projeto (anos), Ns é a velocidade de rotação específica, pnl é a Penalidade (R\$), Q é a vazão (m³/h), Δh é a Perda de Carga (m), Δt é o tempo (h), η é o rendimento.

4 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Operação otimizada dos sistemas de bombeamento

Os resultados apresentados nas Fig. 2, 3 e 4, a critério de exemplo, correspondem às regras de operação otimizadas para uma (1) das noventa e seis (96) possibilidades de sistemas avaliados. Esse caso específico tem altura geométrica de 10 metros, comprimento de 100 metros e diâmetro de 100 milímetros e atendimento ao consumo das curvas 1, 2 e 3, respetivamente, para consumo diário de 755 m³ no ano zero e 1.231 m³ no ano 20.

Observa-se que, nos casos apresentados, o sistema manteve uma vazão de bombeamento praticamente constante ao longo do dia, exceto no período de ponta (18 h 00 min às 20 h 59 min), quando não houve bombeamento e o volume de água disponível no reservatório superior foi praticamente todo consumido.

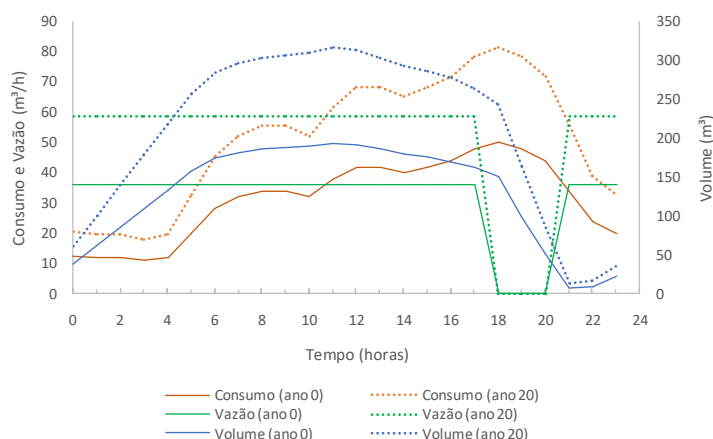


Figura 2 - Volume e vazão bombeada para a curva 1 com consumo de 755 e 1231 m³/dia

Da observação da Fig. 2, verifica-se que a vazão média de bombeamento fora do período de ponta aumentou de 36 m³/h (ano zero) para 59 m³/h (ano 20). O maior volume dentre os calculados foi 317 m³, o que aponta para a necessidade de implantação de um reservatório com capacidade de, no mínimo, 380 m³.

Para os resultados obtidos para a curva de consumo 2 (Fig. 3), verifica-se que a vazão média de bombeamento fora do período de ponta aumentou de 35 m³/h (ano zero) para 58 m³/h (ano 20). O maior volume dentre os calculados foi 207 m³, o que aponta para a necessidade de implantação de um reservatório com capacidade de, no mínimo, 248 m³.

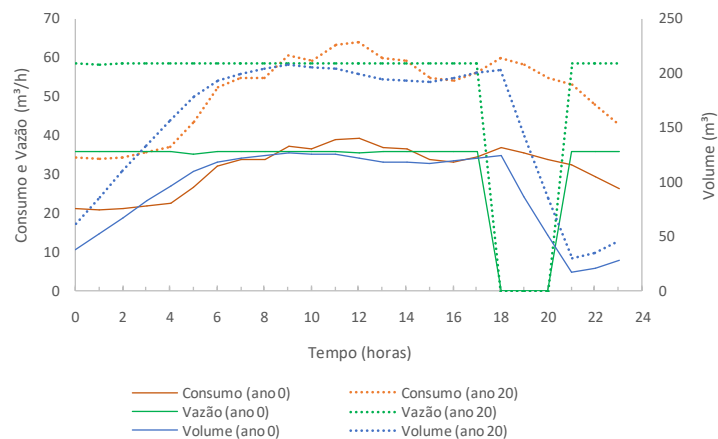


Figura 3 - Volume e vazão bombeada para a curva 2 com consumo de 755 e 1231 m³/dia

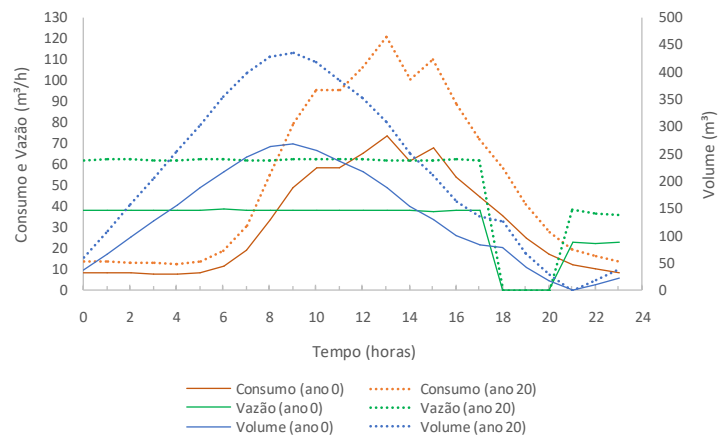


Figura 4 - Volume e vazão bombeada para a curva 3 com consumo de 755 e 1231 m³/dia

Para os resultados obtidos para a curva de consumo 3 (Fig. 4), verifica-se que a vazão média de bombeamento fora do período de ponta aumentou de 38 m³/h (ano zero) para 62 m³/h (ano 20). O maior volume dentre os calculados foi 436 m³, o que aponta para a necessidade de implantação de um reservatório com capacidade de, no

mínimo, 523 m³. Dentro desse contexto, a presença do inversor de frequência permite que os aumentos de vazão bombeada, ao longo dos 20 anos, sejam graduais. Ressalta-se, contudo, que sempre devem ser respeitados os limites de rotação dos conjuntos motobomba de 70 a 120% em relação à rotação nominal.

Como pode ser observado, as vazões bombeadas foram próximas entre si, tanto no ano zero como no ano 20, para as três curvas apresentadas. O coeficiente de variação das vazões médias bombeadas para as três curvas de consumo foi de 4% no ano zero e de 3% no horizonte de projeto (ano 20). A Tabela 4 apresenta a síntese dos resultados das três curvas de consumo, em todas as combinações geométricas e volumes de consumo diários, com os limites máximos e mínimos encontrados para vazão média bombeada fora do período de ponta (Q_{medFP}), vazão máxima bombeada fora do período de ponta (Q_{maxFP}) e vazão média bombeada no período de ponta (Q_{medP}).

Para todos os volumes de consumo diário avaliados houve pelo menos um sistema em que a solução otimizada não prevê o desligamento da bomba no período de ponta, mas apenas a redução da vazão bombeada.

O bombeamento na ponta aconteceu nos casos de menor diâmetro e maior comprimento, ou seja, quando a perda de carga assumiu valores mais elevados. Isso significa que, nestas situações, diminuir a vazão bombeada ao longo do dia, fora do horário de ponta, mesmo que seja necessário manter a bomba em operação no horário de ponta, resulta em custo menor do que se o sistema bombeasse todo o consumo diário apenas durante o período fora de ponta.

Tabela 4 - Síntese dos resultados obtidos com o algoritmo de otimização para a vazão bombeada nos períodos de ponta e fora de ponta

Consumo (m ³ /dia)	Curva de consumo 1			Curva de consumo 2			Curva de consumo 3		
	Q_{maxFP} (m ³ /h)	Q_{medFP} (m ³ /h)	Q_{medP} (m ³ /h)	Q_{maxFP} (m ³ /h)	Q_{medFP} (m ³ /h)	Q_{medP} (m ³ /h)	Q_{maxFP} (m ³ /h)	Q_{medFP} (m ³ /h)	Q_{medP} (m ³ /h)
755	33,6 a 49,7	33,6 a 35,7	0 a 16,4	33,7 a 45,4	35,9 a 36,0	0 a 16,3	35,7 a 46,5	33,5 a 36,0	0 a 17,2
1231	54,8 a 78,4	54,7 a 58,6	0 a 27,6	54,7 a 74,1	54,7 a 58,7	0 a 27,8	58,1 a 87,9	54,6 a 58,6	0 a 28,3
1511	67,2 a 97,8	67,2 a 71,9	0 a 33,5	67,1 a 97,0	67,1 a 71,9	0 a 33,8	71,3 a 83,3	67,0 a 71,9	0 a 34,7
2463	109,3 a 152,5	109,3 a 117,3	0 a 55,8	109,3 a 138,3	109,3 a 117,3	0 a 55,7	116,1 a 132,5	109,1 a 117,3	0 a 57,4
3777	167,9 a 226,6	167,8 a 179,9	0 a 84,4	167,9 a 229,6	167,9 a 179,9	0 a 83,6	178,4 a 213,1	167,5 a 179,9	0 a 86,9
6157	273,4 a 352,9	273,3 a 293,2	0 a 139,2	273,1 a 370,5	273,1 a 293,2	0 a 140,5	290,3 a 365,8	272,8 a 293,2	0 a 142,8
7555	336,9 a 445,9	336,7 a 359,8	0 a 161,1	336,3 a 478,0	336,3 a 359,8	0 a 164,55	357,2 a 437,8	335,5 a 359,7	0 a 169,8
12315	547,2 a 794,2	547,2 a 586,4	0 a 274,7	547,6 a 715,7	547,5 a 586,5	0 a 273,1	580,8 a 685,9	545,7 a 586,3	0 a 285,2

Assim, para classificar os sistemas com elevada perda carga, propõe-se o indicador dado pela relação entre a altura manométrica (H_m) e a altura geométrica (H_g) e, também, para definir em quais situações seria viável (em relação ao custo) desligar o bombeamento no horário de ponta. Os resulta-

dos para este indicador estão apresentados na Fig. 5, onde se constata que o bombeamento na ponta ($Q_{ponta}/Q_{nominal} > 0$) foi indicado para situações em que a relação H_m/H_g assumiu valores superiores a 1,82. Essa relação define, de forma indireta, a perda de carga máxima do sistema.

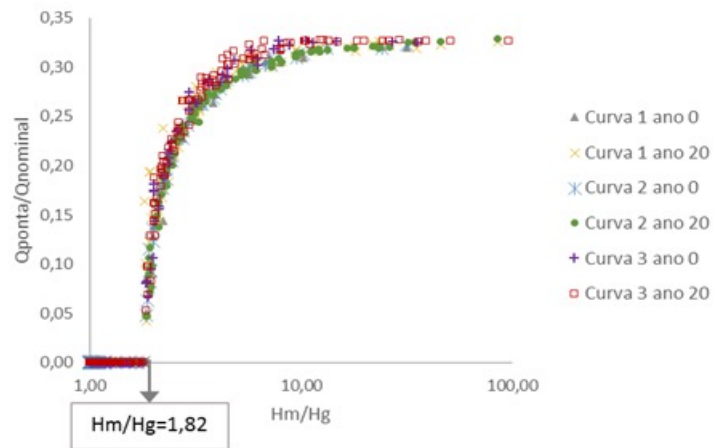


Figura 5 - Avaliação do bombeamento no período de ponta para as três curvas de consumo

A análise das 2304 possibilidades de sistemas permitiu concluir que o bombeamento durante o período de ponta foi recomendado em 118 casos para a curva de consumo 1, em 116 casos para a curva de consumo 2 e em 119 casos para a curva de consumo 3. Todavia, para cada curva, foram avaliados 768 possibilidades diferentes entre si (geometria e/ou consumo diário diferentes), ou seja, o bombeamento no período de ponta ocorreu apenas em 15% dos casos, aproximadamente. Além disso, a maior parte dos casos de bombeamento durante o período de ponta ocorreu para o horizonte de projeto (ano 20), visto que a perda de carga é mais expressiva devido ao aumento da vazão de bombeamento e ao envelhecimento dos condutos representado pela redução do coeficiente C .

Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram ser possível alcançar economia de recursos financeiros a partir do uso de técnicas de otimização para a definição de regras de operação de sistemas de bombeamento. Da mesma forma, Ramos et al. (2010) e Soleira et al. (2016) concluíram ser possível diminuir consideravelmente os custos de energia apenas com mudanças operacionais, sem a obrigatoriedade de investir em infraestrutura.

4.2 Dimensionamento da adutora a partir da regra de operação otimizada

Sabe-se que os custos instalação e operação variam de modo inversamente proporcional ao diâmetro da tubulação. O custo total, em valor presente, é dado pela soma desses dois custos aplicado o fator de atualização aos custos de operação. Nas possibilidades geométricas avaliadas, o custo de instalação foi maior na situação de menor altura geométrica, pois isso resulta em uma potência menor e, também, em menores custos de operação. Por outro lado, à medida em que a altura geométrica aumenta, os custos de operação se tornam mais representativos para o custo total, mesmo quando comparadas situações análogas de comprimento e diâmetro.

A partir dos volumes de consumo diário, ano zero e horizonte de projeto, junto às combinações de altura geométrica e comprimento, a escolha do diâmetro mais adequado foi pautada no menor custo total (função-objetivo do algoritmo de otimização). Disso resultaram 16 possibilidades de sistemas com diâmetro ótimo, ou seja, quatro alturas geométricas (H_g), quatro comprimentos (L) e apenas um diâmetro (D). A Fig. 6 expressa os diâmetros ótimos definidos para cada volume de consumo diário estudado.

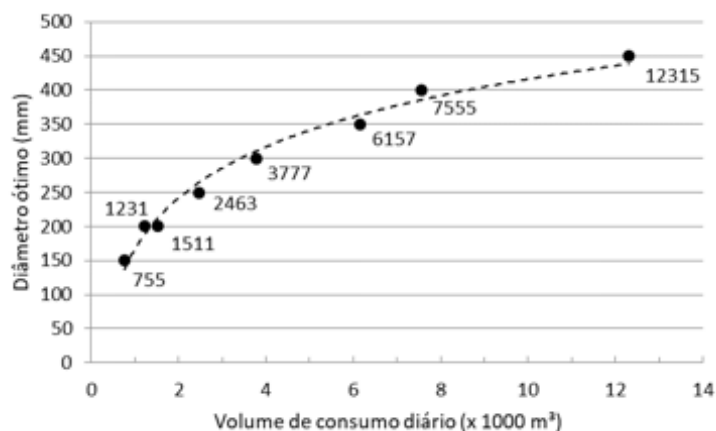


Figura 6 - Diâmetros ótimos para cada um dos volumes de consumo diário avaliados

Como a otimização ocorreu para as situações de início e horizonte de projeto, a escolha do diâmetro ótimo levou em consideração ambas as situações. Na prática, contudo, o diâmetro adotado deve levar em consideração toda a vida útil de um projeto. Em todos os casos avaliados, observou-se que a variação no custo total para os diâmetros ótimos de início e fim de projeto foi inferior a 10%, o que justifica a escolha pelo diâmetro maior.

4.3 Dimensionamento do reservatório superior a partir da regra de operação otimizada

Embora os resultados para vazão bombeada sejam semelhantes entre as curvas, os volumes de implantação dos reservatórios para cada curva de consumo foram bastante distintos. O maior volume (523 m³) foi encontrado na análise da curva 3, e o menor (248 m³), na análise da curva 2, mesmo para volumes de consumo diários iguais. A NBR 12217/1994, em seu item 5.1.2, recomenda a adoção do Método Prático para a determinação do volume dos reservatórios de água, a partir do volume de consumo diário. Do mesmo modo, Tsutya (2006) propõe que o volume deva ser igual ou maior que 1/3 do volume distribuído no dia de consumo máximo. Com a

consideração dessa metodologia, a capacidade do reservatório para as três curvas seria de 410 m³. Por outro lado, com a metodologia proposta nesta pesquisa, os volumes de implantação dos reservatórios consideram também a distribuição do consumo ao longo do dia. A Eq. 19 apresenta as faixas de variação para a capacidade do reservatório (VR) em função do volume de consumo diário (VC), e a Eq. 20 propõe o dimensionamento do reservatório a partir do volume de consumo diário e do fator de consumo (FC) da curva, sendo esse o adimensional proposto neste trabalho para categorizar o perfil de consumo das curvas. Os coeficientes R^2 para a Eq. 19 são 0,9997 para o limite superior e 0,9992 para o limite inferior. Já para a Eq. 20, o coeficiente R^2 é 0,9463.

$$0,4655 \cdot VC \leq VR \leq 0,1903 \cdot VC \quad (19)$$

$$\frac{VR}{VC} = -0,3336 \cdot FC + 0,6088 \quad (20)$$

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma aplicação do algoritmo SCE – UA (Duan et al., 1992) para a obtenção da regra de operação otimizada de uma

tipologia clássica de sistemas de bombeamento de água operados com inversor de frequência. Os dados de entrada do algoritmo foram as curvas de consumo diário e as características geométricas do sistema como altura geométrica, comprimento, diâmetro e material da adutora. A abordagem metodológica empregada conduziu a resultados que podem ser aplicados além da pesquisa, contribuindo com a promoção da eficiência energética no setor de saneamento.

O algoritmo evolucionário SCE-UA foi capaz de otimizar as variáveis de decisão para todas as possibilidades de sistemas avaliadas com tempo de processamento inferior a 15 minutos. Os parâmetros definidos para o algoritmo foram apropriados. Em especial, a condição de parada adotada em 1000 gerações (ou ciclos), mostrou-se adequada ao problema, pois a função-objetivo sempre atingiu seu ótimo global com menos de 500 gerações.

Em relação à operação otimizada pelo algoritmo, o desligamento do sistema de bombeamento foi indicado durante o período de ponta (entre 18 h e 20 h59 min), quando a tarifação é mais onerosa, conforme era esperado. No entanto, em algumas situações, quando a relação entre a altura manométrica e a altura geométrica foi maior que 1,82, ou seja, quando a perda de carga é maior que 82% da altura geométrica, o bombeamento durante este período foi apenas diminuído em vez de desativado.

Como a função-objetivo do algoritmo de otimização foi o custo total, composto pela soma dos custos de instalação e operação, esse critério também permitiu associar um diâmetro ótimo para cada um dos volumes de consumo diários avaliados. Esse resultado pode ser utilizado para nortear os profissionais envolvidos nos projetos de sistemas de bombeamento de água.

As vazões de bombeamento foram calculadas a partir da diferença entre o consumo horário de-

mandado, inserido como dado de entrada, e os volumes disponíveis no reservatório superior, variável de decisão otimizada pelo algoritmo. Para os três perfis de consumo avaliados (curvas de consumo 1, 2 e 3), a vazão de bombeamento foi similar. Todavia, os volumes e, por conseguinte, a capacidade exigida para os reservatórios foi bastante distinta. Essa diferença permitiu concluir que a distribuição do consumo ao longo do dia deve ser considerada no dimensionamento dos reservatórios que compõem as elevatórias dos sistemas de abastecimento de água e propor equações que auxiliem nesse processo.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica no Saneamento (LENHS – UFRGS), à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo recurso financeiro do projeto REDECOPE (Desenvolvimento de Tecnologias e Procedimentos Eficientes para a Gestão Hidroenergética em Sistemas de Abastecimento de Água) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR - Campus Guarapuava) pelo apoio concedido.

7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Kuritza, J. C.; **Metodologia:** Kuritza, J. C., Bravo, J. M. e Marques, M. G.; **Análise de dados:** Kempka, M. e Dai Pra, M. **Redação - Primeira versão:** Kuritza, J. C.; Kempka, M., Dai Pra, M.; **Redação - Revisão & Edição:** Kuritza, J. C.; Kempka, M., Dai Pra, M., Bravo, J. M. e Marques, M. G.

8 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12214:** Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. **NBR 12214:** Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

- AZEVEDO NETTO et al. **Manual de Hidráulica**. 8 ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1998. 335 p.
- BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento. **Avaliação de Sistemas de Bombeamento de Água**: Manual de Eficiência Energética. Disponível em: < <https://publications.iadb.org/en/avaliacao-de-sistemas-de-bombeamento-de-agua-manual-de-eficiencia-energetica> >. Acesso em 18 de ago. 2018.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento**. 2019. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2018>>. Acesso em: 23 mar. 2020.
- BRAVO J. et al. Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Previsão de Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 181-196, Jan/Mar 2008.
- CEEE - Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica. Custos e Tarifas. Disponível em: < <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1782>>. Acesso em: 10 de jul. 2019.
- COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. G. Efficiency achievement in water supply system – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 30, p. 59-84, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.010>
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Calibração automática global do modelo IPH2. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14, 2001, Aracaju. **Anais...** Aracaju, 2001, CD.
- COOPER, V. et al. Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization methods with hydrologic process-based parameter constraints. **Journal of Hydrology**. v. 334, 2007. p. 455– 466. <https://doi.org/10.1155/2015/545376>
- COURA, S. P. A Conta de Energia Elétrica no Saneamento. **Guias Práticos: Técnicas de Operação em Sistemas de Abastecimento de Água**. Organização, Airton Sampaio Gomes, v. 5. Brasília: SNSA, 2007.
- DAKHLAOUI, H. et al. Toward a more efficient Calibration Schema for HBV rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**. v. 444, p. 161-179, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.015>
- DINIZ, L. S. Calibragem de Modelos Hidrológicos. In: Sistemas Inteligentes: Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais. **Anais...** Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS/ABRH, 1999. p. 151-164.
- DUAN, Q. et al. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**. v. 28, n. 4, p. 1015-1031, apr. 1992.
- LUNA, T. et al. Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 213, p.342-356, mar. 2019. Elsevier BV.
- FERREIRA, L. A. et al. Using genetic algorithms on a PMS segment optimization mode. In: European Pavement Management Systems Conference, 1, 2000, Budapest. Proceeding: Budapest, 2000, CD.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley, Reading, Mass, 1989. 412 p.
- GOMES, H. P. **Sistemas de Bombeamento: eficiência energética**. 2 ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2012. 459 p.
- GRAVE, M. **Simulação e Controle de Enchentes Usando as Equações de Águas Rasas e a Teoria do Controle Ótimo**. 2016. 105 f. (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2016.
- JEON, J; PARK, C; ENGEL, B. Comparison of Performance between Genetic Algorithm and SCE-UA for Calibration of SCS-CN Surface Runoff Simulation. **Water**, [s.l.], v. 6, n. 11, p.3433-3456, 12 nov. 2014. MDPI AG. <https://www.mdpi.com/2073-4441/6/11/3433>. <https://doi.org/10.3390/w6113433>
- JIANG, S. et al. Hydrologic Evaluation of Six High Resolution Satellite Precipitation Products in Capturing Extreme Precipitation and Stream flow over a Medium-Sized Basin in China. **Water**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.25, 29 dez. 2017. MDPI AG. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/1/25>. <https://doi.org/10.3390/w10010025>
- KAN, G. et al. Computer Aided Numerical Methods for Hydrological Model Calibration: An Overview and Recent Development. Archives Of Computational Methods. In: **Engineering**, [s.l.], v. 26, n. 1, p.35-59, 25 abr. 2017. Springer Science and Business Media L L C. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-017-9224-5>. <https://doi.org/10.1007/s11831-017-9224-5>
- KOUTSOYIANNIS, D. et al. A Decision Support Tool for the Management of Multi-Reservoir Systems. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 38, n. 4, p. 945-958, Agosto 2002.
- KURITZA, J. C. et al. Dimensionless curves of centrifugal pumps for water supply systems: development and case study. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 22, 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170018>
- LEE, S; KANG, T. Analysis of Constrained Optimization Problems by the SCE-UA with an Adaptive Penalty Function. **Journal Of Computing In Civil Engineering**, [s.l.], v. 30, n. 3, p.04015035, maio 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000493](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000493)
- MACÊDO, J. E.S.; BEZERRA, S. T. M.. Design of Optimal Water Distribution Systems Using Particle Swarm Optimization In: Ibero-American Seminar on Water and Drainage Networks, XV., 2017. Bogotá. **Anais...** Disponível em: < https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3109110>. Acesso em 18 mar. 2020.
- MOREIRA, F. N. C.; FERREIRA, J. F. H.; PEREIRA, J. A. R.. Impact of Water Loss on Lost Electric Energy in Water Pumping Stations. In: Ibero-American Seminar on Water and Drainage Networks, XV., 2017. Bogotá. **Anais...** Disponível em: <<https://papers.ssrn.com/>

sol3/papers.cfm?abstract_id=3112994>. Acesso em 14 mar. 2020.

MURANHO, J. et al. WaterNetGen: an EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing. **Water Science And Technology: Water Supply**, [s.l.], v. 1, n. 12, p.117-123, fev. 2012.

NUNOO, C.; MRAWIRA, D. Shuffled complex evolution in infrastructure works programming. **Journal of Computing in Civil Engineering**. v. 18, n. 3, p. 257-266, 2004.

RAMOS, H. M. et al. Energy efficiency in a water supply system: energy consumption and CO2 emission. **Water Science and Engineering**. v. 3, n. 3, p. 331-340, 2010. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.03.009>

SALLA, M. R. et al. Aplicação da ferramenta EVALHID para calibração de parâmetros e simulação de vazões no alto curso do rio Ara-

guari, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 20, n. 1, p. 276–285, 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n1.p276-285>

SIQUEIRA, V. A. et al. Real-time updating of HEC-RAS model for stream flow forecasting using an optimization algorithm. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. [s.l.], v. 21, n. 4, p.855-870, 24 out. 2016. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312016000400855&lng=en&tlng=en. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616086>

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3. ed. São Paulo: EESC-USP, 2006. 643p.

WANG, L. et al. Development of an integrated modeling system for improved multi-objective reservoir operation. **Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China**, v. 4, n. 1, p. 47-55, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11709-010-0001-x>