

UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO SCE-UA PARA OBTENÇÃO DE REGRA DE OPERAÇÃO OTIMIZADA DE SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Jóice Cristini Kuritza^{1}; Giovani Camponogara²; Guilherme Santanna Castiglio³; Mariane Kempka⁴; Juan Martin Bravo⁵; Marcelo Giulian Marques⁶*

Resumo – Ações voltadas à redução do consumo de energia no setor de saneamento são importantes no cenário econômico-energético atual. Adotar conversores de frequência para controlar a operação, estabelecer regras de operação otimizadas e utilização da capacidade de reserva do sistema são exemplos de medidas que podem ser adotadas com vistas a eficiência dos sistemas de bombeamento de água. As técnicas de otimização surgem com expressivo papel nesse contexto, pois podem atuar melhorando o desempenho de diversos processos. O objetivo deste estudo foi utilizar o algoritmo SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution*) para buscar soluções otimizadas na operação de um sistema de bombeamento de água operado com conversor de frequência. Foi determinada a regra de operação otimizada para nove sistemas distintos, que variaram entre si no diâmetro da linha adutora e no volume do reservatório superior. A função objetivo minimizada pelo algoritmo foi descrita de modo que representou o custo mensal de operação do sistema. O algoritmo SCE-UA foi capaz de otimizar as variáveis de decisão, ou seja, de determinar uma regra de operação para o sistema de bombeamento, conforme abordagem apresentada, de modo que o custo de operação fosse minimizado. Os resultados evidenciaram, em geral, o desligamento do bombeamento no período de ponta.

Palavras-Chave – Sistema de Bombeamento de Água; Otimização; SCE-UA.

USE OF SCE-UA ALGORITHM FOR OBTAINING OPTIMIZED OPERATION RULE OF PUMPING SYSTEM

Abstract – Actions aimed at reducing energy consumption in sanitation are important in the current economic and energy scenario. Adopting variable speed drives to control the operation, establish optimum operating rules and use the system reserve capacity are examples of actions that can be taken to make water pumping systems more efficient. The optimization techniques come with an expressive role in this context, since they can act by improving the performance of several processes. The objective of this study was to use the SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution*) algorithm to search for optimized solutions in the water pumping system operated by variable speed drives. The optimum operating rule was determined for nine distinct systems, which varied diameter of pipe and volume of the upper reservoir. The objective function minimized by the algorithm was described in a way that represented the monthly cost of operating the system. The SCE-UA algorithm was able to optimize the decision variables, to determine an operating rule for the pumping system, according to the presented approach, so that the cost of operation was minimized. The results evidenced, in general, the shutdown of the pumping at the peak period.

Keywords – Water Pumping System; Optimization; SCE-UA.

¹ Afiliação: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – joicekuritza@gmail.com

² Afiliação: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – giovani_camponogara@hotmail.com

³ Afiliação: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – guilhermecastiglio@gmail.com

⁴ Afiliação: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – kempka.mariane@gmail.com

⁵ Afiliação: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – jumarbra@iph.ufrgs.br

⁶ Afiliação: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – mmarques@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2016, o consumo de energia elétrica no serviço público brasileiro foi de 42,7 TWh ou o equivalente a 6,9% do total distribuído (BRASIL, 2016). No saneamento, o consumo de energia elétrica anual foi de 11 TWh em 2016 (BRASIL, 2017), que representam 26% do consumo pelo serviço público e 2% do consumo nacional de energia elétrica. A ineficiência energética estimada em sistemas de bombeamento assume percentuais da ordem de 25 a 30% (GOMES, 2009), assim, ações voltadas à redução do consumo de energia nesse setor são importantes no cenário econômico-energético atual. Como exemplo de medidas que poderiam ser implementadas com objetivo de efficientização do sistema pode-se citar: adequações na contratação da tarifa de energia, aumento do rendimento do conjunto motobomba, redução da perda de carga e ajustes ou modificações na regra de operação do sistema, utilizando-se de conversores de frequência para alteração da rotação nominal da bomba.

Gomes (2012) aponta como vantagem de utilização de conversores de frequência em sistemas de bombeamento, além da economia de energia, o aumento do fator de potência, a eliminação da necessidade de válvulas para dar partida e parar o bombeamento, o melhoramento do controle do processo, a minimização da necessidade de paradas do sistema e a possibilidade de automação do sistema.

Outra forma de se obter melhorias na operação dos sistemas de bombeamento é por meio da utilização da capacidade de reserva do sistema, evitando, com isso, a operação das bombas durante o período de ponta do sistema elétrico.

Técnicas de otimização

As técnicas de otimização surgem com expressivo papel no contexto da utilização dos recursos naturais como água e energia, pois podem atuar melhorando o desempenho de diversos processos, diminuindo custos, maximizando a produção, entre outros. Um processo de otimização consiste de variáveis de decisão cujos valores otimizados deseja-se conhecer, com uma ou mais funções-objetivo e que atenda as restrições determinadas.

Os problemas de otimização podem ser resolvidos usando métodos determinísticos como programação linear, programação não-linear e programação dinâmica. Apesar de alguns desses métodos possuírem grande rapidez e precisão na busca da solução algumas desvantagens são apontadas como: necessidade de cálculo de derivadas, dificuldade de adaptação a projetos com variáveis discretas, e complexidade de implementação nos trabalhos práticos de engenharia (WU e SIMPSON, 2001).

Para Loucks e Van Beek (2005), existem diversas maneiras de classificar os modelos de otimização, contudo, todos têm em comum o fato de que estão descrevendo situações onde existem múltiplas soluções que satisfazem todas as restrições e, portanto, existe o desejo de encontrar a melhor alternativa, ou ao menos um conjunto de boas soluções.

O algoritmo SCE-UA

O algoritmo *Shuffled Complex Evolution* – SCE-UA foi inicialmente descrito por Duan *et al.* (1992) que criaram um método baseado na combinação de técnicas de busca aleatória, algoritmos genéticos e otimização local e opera com uma população de pontos que “evolui” em direção ao ótimo global através de sucessivas iterações e avaliações da função objetivo. Cada um destes pontos é definido pelos valores dos parâmetros e é um candidato ao ótimo. Ao longo do procedimento, a amostra de pontos evolui em conjunto, até que os pontos se concentrem em uma região muito pequena, ou mesmo sobre um ponto do espaço, em que está localizado o ponto ótimo.

Esse algoritmo foi amplamente testado na calibração de modelos hidrológicos (DINIZ, 1999; COLLISCHONN e TUCCI, 2001), aplicação utilizada pelos autores que o desenvolveram, mas tem sido utilizado também em outras áreas como: determinação de regras de operação de sistemas de reservatórios (BRAVO *et al.*, 2008), otimização das soluções para manutenção e reabilitação da infraestrutura de sistemas de pavimentação em centros urbanos (NUNOO e MRAWIRA, 2004), determinação da programação da geração de energia em sistemas compostos por várias unidades geradoras de modo a otimizar os resultados financeiros (DONG *et al.*, 2014), entre outras.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi encontrar as regras de operação otimizadas de um sistema de bombeamento de água operado com conversor de frequência utilizando o algoritmo SCE-UA.

METODOLOGIA

A concepção genérica do sistema de bombeamento de água utilizado neste estudo de otimização é composta por reservatório inferior, estação elevatória, adutora e reservatório superior, conforme apresentado na Figura 1.

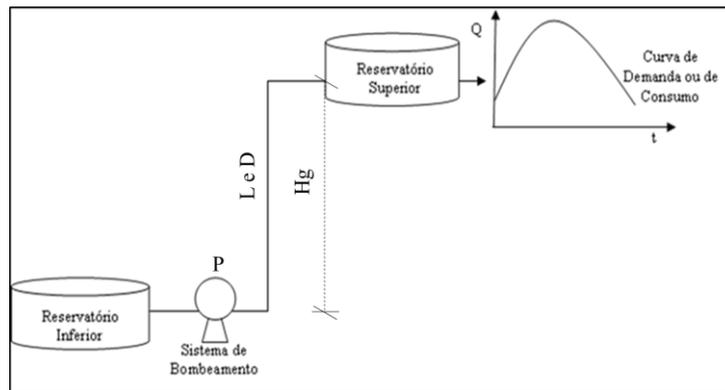


Figura 1 - Concepção geral do sistema de bombeamento utilizado no estudo de otimização

Vilanova (2012) classificou este arranjo como clássico para estação de bombeamento utilizada em sistemas de abastecimento, nos quais se deseja recalcar água de um reservatório localizado em cota topográfica inferior para outro posicionado em uma cota superior.

Os parâmetros de dimensionamento do sistema podem variar significativamente dependendo das características da localidade a que o sistema pertence e também das características da população abastecida. Neste estudo, algumas características foram mantidas fixas (altura geométrica – H_g , comprimento – L , coeficiente C de Hazem-Williams, curva de consumo) e outras foram variadas (diâmetro – D , volume do reservatório superior – V) de modo que foram constituídos 9 sistemas distintos conforme apresentado na Tabela 1. A Figura 2 apresenta a curva de consumo do reservatório superior. O volume total consumido é $1021\text{m}^3/\text{d}$.

Tabela 1 - Características do sistema de bombeamento utilizado no estudo de otimização

	H_g (m)	L (m)	C	D (mm)	V (m^3)
Sistema 1	25	1500	130	100	153
Sistema 2					357
Sistema 3					511
Sistema 4				150	153
Sistema 5					357
Sistema 6					511
Sistema 7				200	153
Sistema 8					357
Sistema 9					511

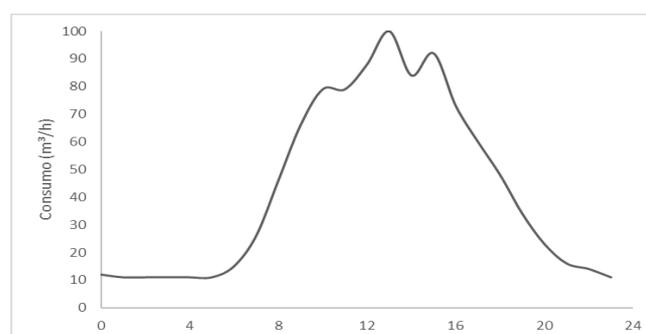


Figura 2 - Curva de consumo do reservatório superior

O algoritmo de otimização SCE-UA foi utilizado para minimizar a função objetivo representada pelo custo mensal de operação do sistema (equação 1). Dois arquivos de entrada foram inseridos no programa, um contendo as características geométricas de dimensionamento do sistema (Tabela 1) e outro contendo a curva de consumo do reservatório superior (Figura 2).

O problema de otimização foi desenvolvido de modo que as variáveis de decisão fossem os valores de volume de água disponíveis no reservatório superior de um sistema de abastecimento de água, a cada intervalo de tempo horário de um dia de operação. O volume inicial foi definido 20% do volume total e o volume final foi definido análogo ao volume inicial, para garantir as mesmas condições iniciais para a operação do próximo dia. Dessa forma, o algoritmo SCE-UA deve obter os valores otimizados de 23 variáveis de decisão, suficientes para descrever a operação de 24 horas por dia do sistema de bombeamento utilizando conversor de frequência, ou seja, a operação apresenta vazão variável ao longo do dia.

$$\text{Min: FO} = \text{Custo} = \frac{(CP \times tP) + (CFP \times tFP) + (D \times tD)}{(1 - PIS - COFINS - ICMS)} \quad (1)$$

Onde: Custo é o valor pago por mês, com impostos (R\$/mês); CP é o consumo de energia na ponta (KWh); CFP é o consumo de energia fora de ponta (KWh); D é a demanda contratada (KW); tP é a tarifa de consumo na ponta (R\$/KWh); tFP é a tarifa de consumo fora de ponta (R\$/KWh) e tD é a tarifa de demanda (R\$/KW).

Os valores das tarifas na modalidade horo-sazonal verde (valores vigentes em outubro de 2016) e das alíquotas ICMS, PIS e COFINS estão apresentados na Tabela 2. As alíquotas de PIS e COFINS têm variação mensal e os valores médios para 2016, entre os meses de janeiro e setembro, são os apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tarifas de consumo de energia e demanda na modalidade horo-sazonal verde e valores para as alíquotas de ICMS, PIS e COFINS

tP (R\$/KWh)	tFP (R\$/KWh)	tD (R\$/KW)	ICMS (%)	PIS (%)	COFINS (%)
1,03767	0,33274	9,15	30	0,9856	4,8303

Fonte: CEEE (2016)

Outros parâmetros do algoritmo SCE-UA foram definidos, como: 15 complexos, 50 pontos em cada complexo, 750 pontos da amostra inicial e 1000 gerações ou ciclos.

RESULTADOS

O algoritmo SCE-UA foi utilizado para definir a operação de cada um dos 9 sistemas de bombeamento utilizando conversor de frequência. As 23 variáveis de decisão obtidas representam valores horários de volume no reservatório superior, que permitiram calcular a vazão horária de bombeamento, por balanço de massa. A Figura 3 apresenta os resultados para

o volume, variável otimizada, a vazão bombeada e a demanda consumida ao longo de um dia de operação para os sistemas 1, 5 e 9, como forma de demonstração. Destaca-se que, para cada um dos sistemas, esses são os resultados cuja função objetivo apresentou menor valor, ou seja, menor custo mensal de operação. Já a Tabela 3 apresenta a síntese dos resultados para todos os sistemas estudados.

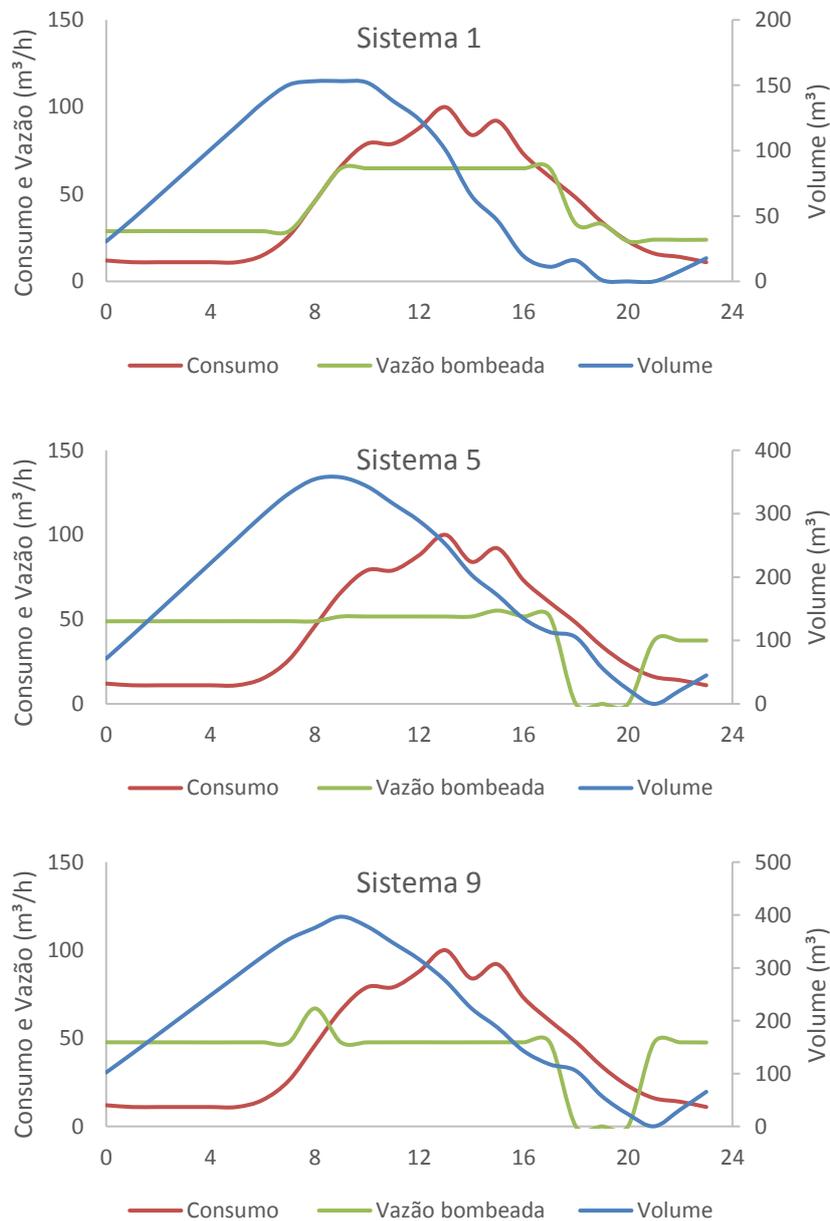


Figura 3 - Resultados obtidos no estudo de otimização para os sistemas 1, 3 e 5

A regra de operação otimizada pelo algoritmo determinou que o bombeamento diminuísse durante o período de ponta. Para os sistemas com diâmetro maior (150 e 200mm) o bombeamento foi desativado nesse período (sistemas 4 a 9). Quando há algum bombeamento no período de ponta, a vazão média fora de ponta é menor (sistemas 1 a 3). Isso mostra que, nos sistemas com maior perda de carga (menor diâmetro), o algoritmo obteve como solução

ótima manter o bombeamento na ponta e diminuir o bombeamento fora de ponta, ou seja, o custo de bombear na ponta foi menor do que ter um bombeamento maior no período fora de ponta.

Tabela 3 - Síntese dos resultados para os sistemas de bombeamento otimizados

	Qmax ¹	QmedFP ²	QmedP ³	Hm ⁴ (m)	Potência (KW)	Custo (R\$/mês)
Sistema 1	64,88	44,38	29,65	111,43	32,56	7.210,71
Sistema 2	47,48	45,94	18,69	73,51	14,55	5.215,69
Sistema 3	46,19	46,10	17,61	71,10	13,63	5.142,59
Sistema 4	75,86	48,61	0	41,02	10,67	2.205,69
Sistema 5	55,20	48,61	0	33,89	6,43	1.949,41
Sistema 6	54,43	48,61	0	33,67	6,30	1.940,34
Sistema 7	75,86	48,61	0	28,94	7,27	1.643,70
Sistema 8	67,28	48,61	0	28,16	6,30	1.588,90
Sistema 9	66,94	48,61	0	28,13	6,26	1.587,11

¹ – vazão máxima (m³/h)

³ – vazão média na ponta (m³/h)

² – vazão média fora de ponta (m³/h)

⁴ – altura manométrica (m.c.a.)

A potência foi calculada utilizando o valor da vazão máxima e da altura manométrica e seu valor foi considerado igual à demanda contratada. O custo mensal de operação foi menor nos sistemas de maior diâmetro e, entre os sistemas de mesmo diâmetro (1 a 3; 4 a 6 ou 7 a 9), foi maior quando o reservatório era menor como pode ser observado na Figura 4.

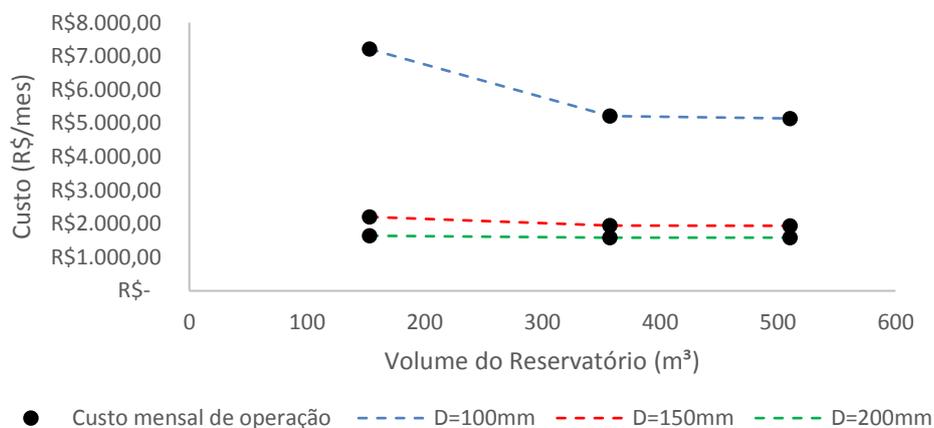


Figura 4 - Variação do custo conforme diâmetro e volume do reservatório

Também foi possível observar que o custo de operação dos sistemas com diâmetro 150 e 200 mm foram muito próximos entre si, independente do volume do reservatório. Seriam precisos estudos que considerassem os custos de instalação da linha adutora e do reservatório para confirmar quais valores de diâmetro e volume são os mais eficientes em termos de custo total (operação + instalação).

CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu concluir que:

- o algoritmo SCE-UA foi capaz de otimizar as variáveis de decisão, ou seja, de determinar uma regra de operação para o sistema de bombeamento, conforme abordagem apresentada, de modo que o custo de operação fosse minimizado;
- os resultados evidenciaram, em geral, o desligamento do bombeamento no período de ponta. Isto diferiu apenas nos sistemas com elevada perda de carga, nos quais o bombeamento do período de ponta foi apenas diminuído;
- o menor custo de operação foi de R\$1.587,11 para o sistema com diâmetro de 200 mm e volume do reservatório de 511m³.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia (IFRS) pelo fomento e incentivo a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BRASIL (2016). Ministério de Minas e Energia. *Balanço energético nacional - BEN*. Brasília: MME.
- BRASIL (2017). Ministério das Cidades. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnósticos dos Serviços de Água e Esgotos – 2015*. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2017.
- BRAVO, M.; WALTER, C.; TUCCI, C. E. M. (2008). 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.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2001). Calibração automática global do modelo IPH2. In: *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Aracaju.
- DINIZ, L. S. (1999). Calibragem de Modelos Hidrológicos. In: *Sistemas Inteligentes: Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS/ABRH. p. 151-164.
- DONG, J.; ZHENG, C.; KAN, G.; LI, Z.; ZHAO, M. (2014). Application of SCE-UA Approach to Economic Load Dispatch of Hydrothermal Generation System. *Applied Mechanics and Materials*. v. 448-453. p. 4296-4303.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*. v. 28, n. 4, p. 1015-1031, apr.
- GOMES, H. P. (2012). *Sistemas de Bombeamento: eficiência energética*. 2 ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2012. 459 p.
- GOMES (2009). *Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes Elevatórias*. 3 ed. São Paulo: ABES, 2009. 242 p.
- LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Holanda: UNESCO, v. I.
- NUNOO, C.; MRAWIRA, D. (2004). Suffled complex evolution in infrastructure works programming. *Journal of Computing in Civil Engineering*. v. 18, n. 3, p. 257-266.
- VILANOVA, M. R. N. (2012). Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água como ferramenta de suporte à tomada de decisões. (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- WU, Z. Y.; SIMPSON, A. R. (2001). Competent genetic-evolutionary optimization of water distribution system. *Journal of Computing in Civil Engineering*. v. 15, p. 89-101.