

Otimização multiobjetivo de sistema de abastecimento de água rural

Multi-objective optimization of rural water supply system

Silva, W.T.P.^{a1}, Vieira, L.T.Q.^{a2}, Rosa, D.M.S.^{a3}, Campos, M.M.^{a4}, Santos, A.A.^{a5}, Souza, M.A.A.^b

^aDepartamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Cuiabá, Avenida Fernando Corrêa da Costa, No. 2367, Cuiabá/MT, Brasil.

E-mail: ^{a1}welitom@ufmt.br, ^{a2}lorytopolniak@hotmail.com, ^{a3}david_maycom@hotmail.com, ^{a4}medinasmarcel@gmail.com, ^{a5}aldecy_allmeida@yahoo.com.br

^bDepartamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília/DF, Brasil.

E-mail: ^bmaasouza@unb.br

Recibido: 10/06/2016

Aceptado: 07/10/2016

Publicado: 31/10/2016

RESUMEN

A falta de água em sistemas de abastecimento de água obriga a população a assumir comportamentos de risco à saúde, o que é muito frequente em sistemas de abastecimento de água rural (SAA-rural). O objetivo desta pesquisa foi desenvolver e aplicar um modelo de otimização multiobjetivo para SAA-rural no município de Cuiabá, Estado de Mato Grosso, Brasil. A metodologia de pesquisa constou de: (1) formulação do modelo de otimização (MO); (2) aplicação do MO; (3) análise de resultados; e (4) implementação computacional do MO. Para resolução do problema, foi proposta e utilizada uma peça geradora de perda de carga. Constatou-se que o problema de falta de água pode ser resolvido por meio de pequenas modificações operacionais e estruturais. Foi desenvolvido um MO multiobjetivo para SAA-rural, baseado na técnica de Programação Não Linear Inteira Multiobjetivo (PNLIMO) implementado em ambiente OpenOffice.org. O MO foi aplicado a um caso real, apresentando resultados satisfatórios.

Palavras chave | saneamento rural; hidráulica; falta de água; modelagem.

ABSTRACT

Lack of water in water supply systems forces people to take risk behaviors to health, which is very common in rural water supply systems (WSS-rural). The objective of this research was to develop and apply a multi-objective optimization model for WSS-rural in the county of Cuiabá, Mato Grosso State, Brazil. The research methodology consisted of: (1) formulation of the optimization model (OM); (2) application of OM; (3) analysis of results; and (4) computer implementation of OM. To solve the problem, it was proposed and used a load loss generator part. It was found that the problem of water shortage can be solved by small operational and structural modifications. It was developed a multi-objective OM for WSS-rural based on Multi-objective Nonlinear Integer Programming technique (MONLIP) implemented in OpenOffice.org environment. The developed OM was applied to a real case with satisfactory results.

Key words | rural sanitation; hydraulics; water shortage; modelling.

INTRODUÇÃO

A incidência de problemas no sistema de abastecimento de água ou a indisponibilidade de água para consumo humano podem gerar comportamentos de risco, como, por exemplo, a utilização de fontes de água inadequadas para o consumo. Isso é especialmente válido para áreas rurais (AR), onde a população comumente não possui nenhum tipo de solução para o abastecimento de água ou, quando a possui, essa solução opera de forma bastante precária. A literatura confirma a existência de inúmeras situações com características similares incluindo os trabalhos de Mackintosh e Colvin (2003), Sadeghi *et al.* (2007), Muthusi *et al.* (2007). Da mesma forma, estudos de casos realizados no Brasil, também relatam pontos em comum, conforme os trabalhos de Azevedo (2004), Reis (2004), Souza *et al.* (2015) e Ferreira *et al.* (2015). A situação das AR do município de Cuiabá, Estado de Mato Grosso, região Centro-Oeste do Brasil, não diverge do contexto apresentado anteriormente. A população residente nessas AR não é abastecida com água do sistema público (PMSS, 2008), sendo utilizadas como fonte de abastecimento cisternas escavadas e poços tubulares, situação que justifica a realização de estudos com o intuito de contribuir para redução de comportamento de risco.

Dentre as causas da indisponibilidade de água, em AR, apresentam-se as condições hidráulicas deficitárias dos sistemas de abastecimento de água rural (SAA-rural), e a sua resolução considera técnicas para busca de eficiência, envolvendo modelos de otimização com enfoque mono e multiobjetivo. Alguns exemplos abrangem os estudos de Jowitt e Germanopoulos (1992), León *et al.* (2000), Zyl *et al.* (2004), Farmani *et al.* (2006) e Fu *et al.* (2008).

Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver e aplicar um modelo de otimização multiobjetivo em um SAA-rural no município de Cuiabá, considerada como estudo de caso. Mais especificamente deseja-se, simultaneamente, a equidade de pressões nos pontos de consumo (residências), o mínimo custo com a operação do SAA-rural e o mínimo custo com modificação física no SAA-rural. Também, assumiu-se como verdadeira a hipótese de que a otimização multiobjetivo do SAA-rural garante condições para que não haja falta de água para a população e, conseqüentemente, não ocorra procura por fontes de água potencialmente insalubres.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A pesquisa foi realizada na comunidade rural do “Cinturão Colina Verde”, situada na periferia da cidade de Cuiabá, Estado de Mato Grosso, Brasil. Na Figura 1 está apresentada a localização da área de estudo.

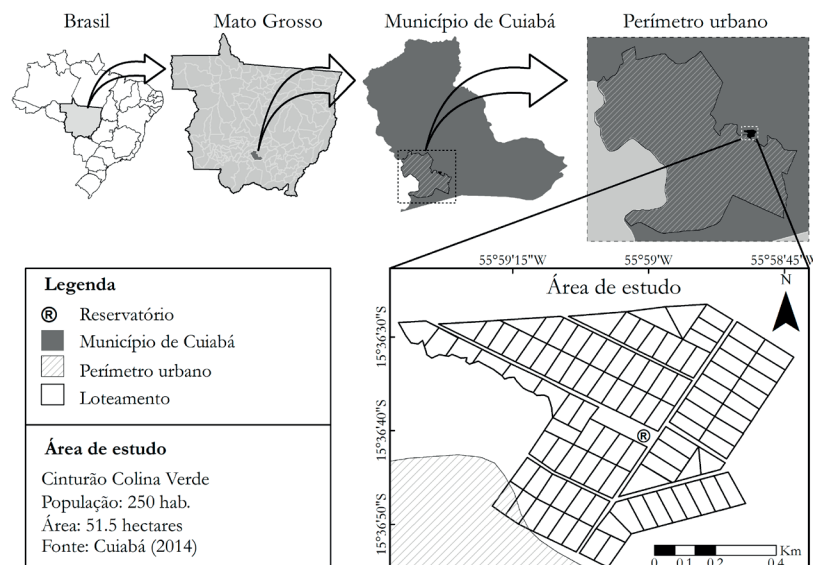


Figura 1 | Localização da área de estudo.

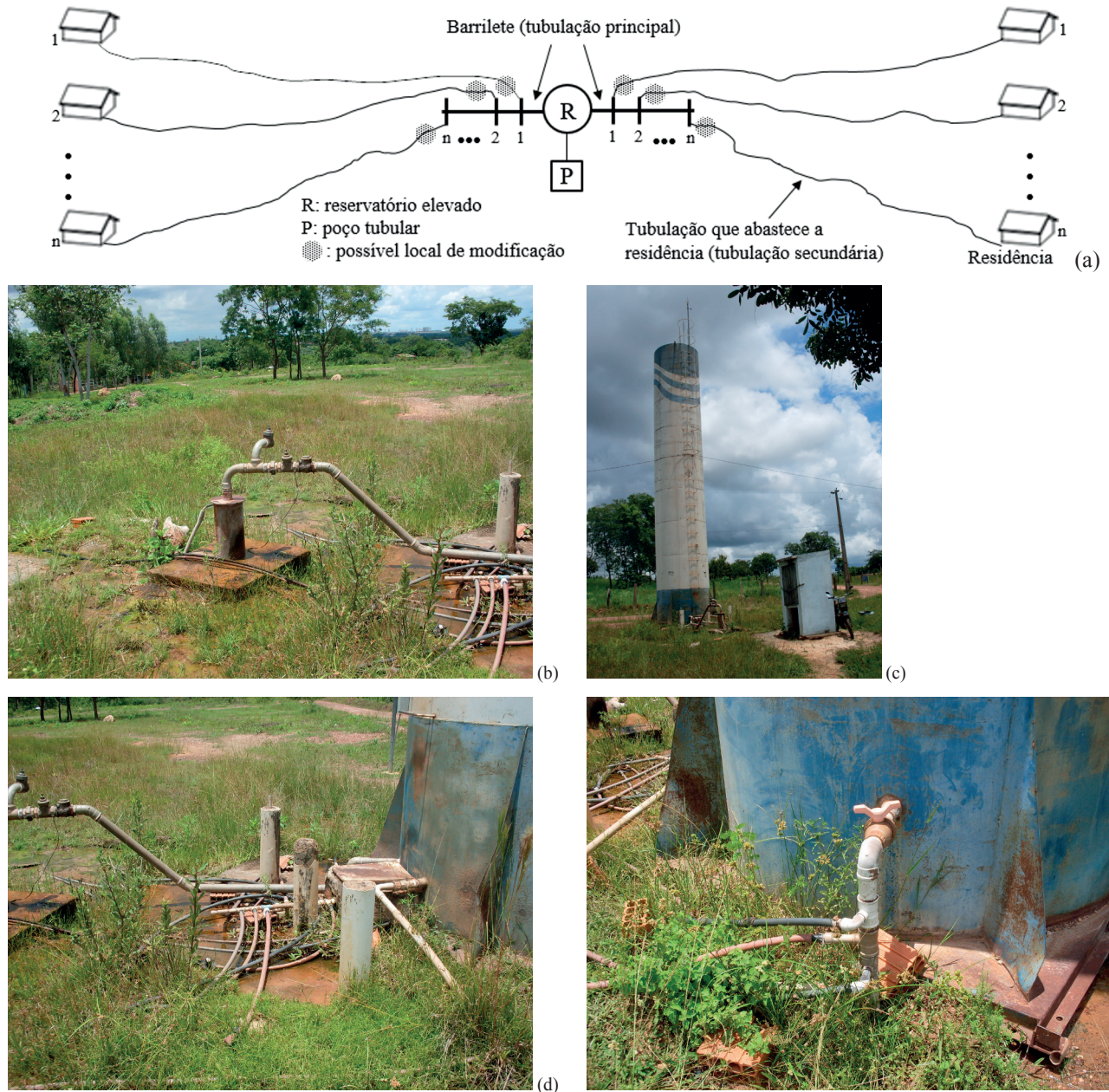


Figura 2 | (a) Sistema de abastecimento rural de água (SAA-rural); (b) poço tubular; (c) Reservatório elevado; (d) tubulação principal sistema “ $j=1$ ” e tubulações secundárias; (e) tubulação principal sistema “ $j=2$ ” e tubulações secundárias.

A comunidade rural possui uma área de 51.5 hectares e uma população de 250 habitantes. A população local é de classe social baixa (renda média inferior a dois salários mínimos) e a área está distribuída em 107 lotes de aproximadamente 5000 m², de dimensões 50 m×100 m (Cuiabá, 2014). O SAA-rural da comunidade Cinturão Colina Verde possui uma rede de distribuição de água que pode ser classificada como rede ramificada. O abastecimento se faz a partir de um reservatório de montante, seguido de barrilete (tubulação principal, construída em PVC) e de tubulações que alimentam as residências (tubulação secundária, de material PEAD não reciclado e reciclado). Na Figura 2(a) mostra-se uma representação desse sistema. O fornecimento de água é obtido por meio da captação em poço tubular explorando o aquífero do Grupo Cuiabá, unidade geológica do tipo fraturado com características de heterogeneidade litológica e anisotropia estrutural (Nicochelli *et al.*, 2009).

Na captação, feita em um poço tubular com profundidade de 120 m, utiliza-se uma bomba submersa que funciona 12 horas por dia, e o sistema conta com um reservatório com capacidade de 45 m³, sendo a pressão na saída do reservatório de 11 mH₂O (com o reservatório na capacidade máxima). Esse SAA-rural serve a 34 residências que, devido a limitações econômicas e estruturais, são abastecidas de forma intermitente (dias alternados, um dia com abastecimento, um dia sem abastecimento). Para isso, existem dois barriletes (tubulações principais), aqui denominados de sistemas “j=1” e “j=2”. A definição de que residência será abastecida por qual sistema (“j=1” ou “j=2”) é realizada ao acaso. A atual forma de operação gera reclamações por parte da população, devido à baixa pressão nos pontos de consumo localizados nos pontos altos. As Figuras 2(b), 2(c), 2(d) e 2(e) mostram o poço tubular, o reservatório (indicado na Figura 1), as tubulações principais e secundárias do SAA-rural.

Fundamentação teórica

Essa pesquisa se fundamentou na interação entre os princípios fundamentais da hidráulica de sistemas de tubulações e otimização multiobjetivo. Uma breve introdução sobre temas importantes para essa pesquisa é apresentada na sequência.

Na primeira parte da fundamentação teórica são apresentados, resumidamente, os princípios fundamentais da hidráulica de sistemas de tubulações. Assim, inicia-se aqui, a apresentação do princípio da energia de trabalho, ou princípio da energia, ou Equação de Bernoulli, segundo o qual, para um fluxo unidimensional de um líquido numa tubulação, por unidade de peso do fluido, a conservação de energia entre duas seções dessa tubulação pode ser descrita conforme o apresentado na Equação 1. A perda de carga (h_f) pode ser obtida por meio de diversas equações, com destaque às Equações de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Manning (Larock *et al.*, 2000). Nesta pesquisa, em função das características do sistema estudado (diâmetros inferiores a 50 mm e tubos muito lisos) adotou-se, para o cálculo da h_p , uma combinação das Equações de Darcy-Weisbach e Blasius, seguindo o sugerido por Larock *et al.* (2000), conforme o apresentado na Equação 2. Informações adicionais podem ser obtidas nos trabalhos de Larock *et al.* (2000) e Porto (2001).

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \sum h_f - h_m \quad (1)$$

$$h_f = 7.779 \times 10^{-4} \cdot \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} \cdot L = J \cdot L \therefore J = 7.779 \times 10^{-4} \cdot \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} \quad (2)$$

Em que: $V^2/2g$ é a carga de velocidade; p/γ é a carga de pressão; z é a carga de elevação; $\sum h_f$ é o somatório de perdas de carga, por unidade de peso; h_m é a energia mecânica, por unidade de peso, adicionada (conjunto motor-bomba) ou retirada (turbina) ao sistema hidráulico de tubulações; Q é a vazão transportada; D é o diâmetro da tubulação; L é o comprimento da tubulação; e, J é a perda de carga unitária.

Na segunda parte da fundamentação teórica, uma síntese dos conceitos importantes à otimização multiobjetivo é apresentada. Como ponto de partida está o conceito de problema de otimização multiobjetivo, que se trata de um problema com dois ou mais objetivos que precisam ser otimizados simultaneamente. Tradicionalmente, um problema de otimização multiobjetivo pode ser formulado conforme é apresentado na Equação 3. Os objetivos a serem considerados podem ser conflitantes por natureza, e, nesse caso, ao tratar de satisfazer todos eles simultaneamente, a ideia de uma única solução deixa de ser aplicável (Porto *et al.*, 2002).

$$\begin{aligned} \text{mín } z &= f(x) \\ \text{sujeito a:} \\ g_j(x) &\geq 0, j = 1, \dots, J \\ h_k(x) &= 0, k = 1, \dots, K \\ X^L &\leq x \leq X^U \end{aligned} \quad (3)$$

Na qual: $z = f(x)$ é o vetor n -dimensional de funções-objetivo $[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T$ que pertencem ao espaço dos objetivos; $g_j(x)$ são restrições de desigualdades; J é o número de restrições de desigualdade; $h_k(x)$ são restrições de igualdades; K é o número de restrições de igualdade; x é um vetor m -dimensional de variáveis de decisão $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$; X^L e X^U são os limites inferiores e superiores das variáveis de decisão, respectivamente.

Segundo Goicoechea *et al.* (1982), o primeiro passo para resolução de problemas multiobjetivo consiste em determinar o conjunto de soluções não dominadas. De acordo com o conceito de soluções não dominadas, ou dominantes, simplesmente não existe um único ótimo em um problema com múltiplos objetivos, mas existe um conjunto de ótimos que satisfazem, de forma diferente, os diferentes objetivos envolvidos na análise (Porto *et al.*, 2002). Entre as técnicas que geram soluções não dominadas, o método da Soma Ponderada dos Objetivos é um método clássico e um dos mais conhecidos e utilizados. Esse método consiste na transformação do problema multiobjetivo num problema mono-objetivo por meio da atribuição de pesos para cada função-objetivo (Porto *et al.*, 2002). Dessa forma, a escolha dos pesos é crucial, pois afeta diretamente a relevância de cada objetivo. Além disso, o método requer a normalização de cada função-objetivo, pois elas podem ter diferentes magnitudes. Naturalmente, outros conceitos importantes são necessários para a compreensão da otimização multiobjetivo, e, para isso, sugere-se a consulta a Goicoechea *et al.* (1982) e Porto *et al.* (2002).

Formulação do modelo de otimização

A formulação do modelo de otimização (MO) pressupõe o conhecimento dos conceitos básicos da hidráulica, dos processos e rotinas operacionais em SAA-rural e em instalações prediais. O MO assume como verdadeira a hipótese da existência de uma combinação ótima das residências abastecidas com ou sem intermitência, com ou sem presença da peça geradora de perda de carga (Ghf) e com ou sem presença de pressurização (conjunto motor-bomba). Nesta pesquisa, entende-se a Ghf como um conjunto de peças/conexões incluindo: (1) adaptador de compressão RM em PP (rosca macho, material polipropileno); (2) luva roscável; (3) bucha de redução; (4) conexão reta macho; e, (5) tubo flexível (Ø3 mm) de comprimento variável. Um registro fotográfico da Ghf está apresentado na Figura 3. A Ghf está associada à ideia de equidade de pressão nas residências do SAA-rural. As residências em cotas baixas têm disponibilidade de água, devido aos altos valores de pressão. No caso contrário, tem-se a falta de água, devido aos baixos valores de pressão. Então, propõe-se a compensação das residências em cotas altas através da equidade de pressão, via geração artificial de perda de carga, instalando para isso a Ghf nos locais possíveis (conforme Figura 2(a)) nas residências situadas em cotas baixas.

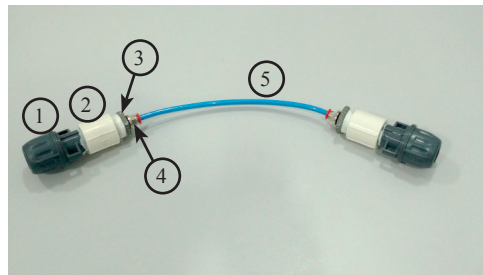


Figura 3 | Componentes da peça geradora de perda de carga (Ghf): (1) adaptador de compressão RM em PP (rosca macho, material polipropileno); (2) luva roscável; (3) bucha de redução; (4) conexão reta macho; e, (5) tubo flexível (Ø3 mm) de comprimento variável.

Esse MO se fundamentou numa das técnicas de otimização multiobjetivo, a técnica de Programação Não Linear Inteira Multiobjetivo (PNLIMO). Como método de otimização multiobjetivo, fez-se uso do método da Soma Ponderada dos Objetivos. Para resolver o MO, foi utilizado o algoritmo Social Cognitive Optimization (SCO), disponível na planilha de cálculo do OpenOffice.org. Como justificativa, menciona-se a indicação de algoritmos evolutivos para otimização multiobjetivo e para o tratamento de problemas complexos, conforme apresentado em Xie *et al.* (2002). Informações adicionais sobre processos internos do SCO podem ser encontrados no endereço eletrônico <http://wiki.services.openoffice.org/wiki/NLPSolver> e no trabalho de Xie *et al.* (2002).

O MO consistiu basicamente no cálculo da pressão disponível em cada residência, a partir da equação da energia, sendo os respectivos termos de perda de carga, energia mecânica e do consumo de água mostrados nas Equações de 4 até 8.

$$p_i = Hm_i - z_i - h_{fi} + h_{mb} \quad (4)$$

$$Hm_t = Hm_{t0} - 1.273 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot t}{D_{RA}^2} \quad (5)$$

$$Hm_{t0} = z_{RA} + H_{t0} \quad (6)$$

$$h_{fi} = J_i \cdot L_i + J_{Ghf} \cdot c_{Ghf,i} \quad (7)$$

$$Q_i = K_1 \cdot K_2 \cdot P \cdot q \cdot 0.125 \quad (8)$$

Na qual: p_i é a pressão na residência i (mH₂O); Hm_t é a altura manométrica no reservatório de abastecimento, no tempo t (m); z_i é a cota do terreno na residência i (m); h_{fi} é a perda de carga total do reservatório de abastecimento até a residência i (m); h_{mb} é a altura manométrica fornecida pelo conjunto motor-bomba; Hm_{t0} é a altura manométrica no reservatório de abastecimento, no tempo $t=0$ h (m); Q_i é a vazão de consumo na residência i (m³.h⁻¹); n é o número total das residências a serem abastecidas pelo SAA-rural; t é o tempo de funcionamento do SAA-rural (h); D_{RA} é o diâmetro do reservatório (m); z_{RA} é a cota do terreno no reservatório de abastecimento (m); H_{t0} é o nível de água no reservatório de abastecimento, no tempo $t=0$ h (m); J_i é a perda de carga unitária na residência i (m·m⁻¹); L_i é o comprimento da tubulação que abastece a residência i (m); J_{Ghf} é a perda de carga unitária da geradora de perda de carga localizada (m·m⁻¹); $c_{Ghf,i}$ é o comprimento do tubo flexível (Ø3 mm) existente na Ghf da residência i (m); D_i é o diâmetro da tubulação que abastece a residência i ou do tubo flexível (Ø3 mm) existente na Ghf da residência i (m); K_1 é o coeficiente do dia de maior consumo; K_2 é o coeficiente da hora de maior consumo; P é a população a ser abastecida (hab); q é o consumo per capita de água (m³.hab⁻¹.d⁻¹). Os valores de K_1 e K_2 foram 1.2 e 1.5, respectivamente, e seguiram a recomendação de Tsutiyu (2006).

As funções-objetivo consideradas incluem o custo de aquisição e instalação da Ghf, a diferença de pressão entre as n residências e o custo operacional, e são traduzidas por meio das Equações 9, 10, 11 e 12. A função multiobjetivo z do MO é apresentada na Equação 13. Aqui, reforça-se que o objetivo do modelo é minimizar a falta de água no SAA-rural existente, e que limitações econômicas tornam inviáveis soluções que induziriam a elevados custos (por exemplo, aumento do volume do reservatório ou implantação rede de abastecimento de água).

$$\text{mín } Ca_i = (pc + (c_m \cdot c_{Ghf})) \cdot b + bc \cdot d \quad (9)$$

$$\text{mín } \Delta p_i = p_{rs} - p_{rs}^* \quad (10)$$

$$\text{mín } Co = Pot \cdot T \cdot C_e \quad (11)$$

$$Pot = \frac{\gamma \cdot (Q_b / 3600) \cdot h_{mb}}{\eta} \quad (12)$$

$$\text{mín } z = \sum_{j=1}^m Ca_{ij,N} \cdot w_{Ca} + \sum_{j=1}^m \Delta p_{ij,N} \cdot w_{\Delta p} + \sum_{j=1}^m Co_{j,N} \cdot w_{Co} \quad (13)$$

Na qual: Ca_i é o custo de aquisição e instalação da Ghf na tubulação que abastece a residência i (R\$); pc é o custo total de peças/conexões (R\$); c_m é o custo unitário do tubo flexível (Ø3mm); bc é o custo de aquisição e instalação peças/conexões para alimentação com bomba (R\$); b , d são variáveis binárias (0,1); Δp_i é a diferença de pressão entre a residência i e a residência localizada na maior cota topográfica (mH₂O); p_{rs} é a pressão na residência, tempo $t=8$ h (mH₂O); p_{rs}^* é a pressão na residência localizada na maior cota topográfica, tempo $t=8$ h; Co é o custo de operação mensal (R\$); T é o número de horas mensais de funcionamento do sistema (h); C_e é o custo unitário de referência (R\$.kW⁻¹); Pot é a potência da bomba (kW); γ é o peso específico da água (N·m⁻³); Q_b é a vazão transportada pela bomba (m³.s⁻¹); η é o rendimento global da fonte de energia; j é o número do barrilete; m é o número total de barriletes; N é a versão normalizada da função-objetivo, escala 0 até 1 (Equação 14); w_{Ca} é o peso de ponderação do objetivo custo de aquisição e implantação de Ghf; $w_{\Delta p}$ é o peso de ponderação do objetivo diferença de pressão

entre os pontos de consumo (residência); w_{Co} é o peso de ponderação do objetivo custo operacional. O tempo de funcionamento de 8 h foi adotado considerando a jornada de trabalho de um operador de SAA-rural e a restrição econômica para contratação adicional operador. Os pesos (w_{Ca} , w_{Ap} , w_{Co}) foram definidos a partir do painel decisor (composto por membros da associação de moradores) e da interação tipo Face-to-face. Nesse tipo de interação (Face-to-face) os membros do painel decisor se conhecem e discutem suas opiniões até se alcançar o consenso (Beinat, 1997). Adicionalmente, foi realizada análise, do ponto de vista técnico, dos valores dos pesos obtidos.

$$x_N = \frac{x_i}{x_{máx}} \quad (14)$$

Na qual: x_N é a versão normalizada da variável x ; x_i é o valor da variável x ; $x_{máx}$ é o máximo valor que a variável x pode assumir.

As equações de restrição expressam: a necessidade de abastecimento de todas as residências (Equação 15); a limitação física de abastecimento da residência i por uma única tubulação principal (Equação 16); a observância da existência ou não de Ghf (Equação 17); a limitação do máximo comprimento de tubo flexível ($\varnothing 3$ mm) na Ghf (Equação 18); o abastecimento da residência i por um conjunto motor-bomba ou não (Equação 19); a necessidade da pressão no ponto de consumo (residência) ser suficiente para abastecer um reservatório apoiado (caixa de água com altura de 1 m) e como justificativa apresentam-se limitações estruturais e econômicas importantes do SAA-rural (Equação 20); as obrigatoriedades, somatório dos pesos ser igual a unidade (Equação 21); e que os pesos e os comprimentos de tubo flexível ($\varnothing 3$ mm) devem ser não negativos (Equação 22).

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} = n, \forall a_{ij} = (0, 1) \quad (15)$$

$$a_{i1} + a_{im} = 1 \quad (16)$$

$$b_{ij} = (0, 1) \quad (17)$$

$$c_{Ghf, ij} = \begin{cases} 0, & \text{se } b_{ij} = 0 \\ \leq 10, & \text{se } b_{ij} = 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$d_{ij} = (0, 1) \quad (19)$$

$$p_{ijt} \geq 1, \forall t = 0, 2, 4, 6, 8 \quad (20)$$

$$w_{Ca} + w_{Ap} + w_{Op} = 1 \quad (21)$$

$$w_{Ca}, w_{Ap}, w_{Co}, c_{Ghf, ij} \geq 0 \quad (22)$$

Na qual: a_{ij} é a variável binária que representa o abastecimento da residência i , pelo barrilete j ; b_{ij} é a variável binária que representa a instalação Ghf, na tubulação da residência i , do barrilete j ; c_{ij} é o comprimento de tubo flexível ($\varnothing 3$ mm) instalado na Ghf da residência i , do barrilete j ; d_{ij} é variável binária que representa a pressurização, na tubulação da residência i , do barrilete j ; p_{ijt} é a pressão na residência i , do barrilete j , no tempo t . Os valores das variáveis a_{ij} , b_{ij} e d_{ij} estão definidos nas Equações 23, 24 e 25, respectivamente.

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i \text{ for abastecida } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (23)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se Ghf for instalada na } i \text{ do } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (24)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } a_{ij} = 1 \text{ e pressurizada por bomba} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (25)$$

Finalmente, chega-se aos três componentes básicos do MO, as variáveis de decisão que incluem a_{ij} , b_{ij} , $c_{Ghf, ij}$ e d_{ij} , os objetivos, apresentados nas Equações 9 até 14 e as restrições, apresentadas nas Equações 15 até 25.

Aplicação e implementação computacional

Para aplicação do MO, inicialmente, realizou-se a coleta de dados, incluindo: população; localização; tipo de fonte de água; tipo do solo; dimensões e área dos lotes; tipo de unidades, rotinas e regime de funcionamento do SAA-rural; volume e pressão de saída do reservatório; profundidade do poço; diâmetro, material e comprimento das tubulações secundárias; e, número de residências abastecidas. Também foram realizadas consulta a instituições como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Administração Municipal de Cuiabá e a Associação de Moradores. Foram realizadas, ainda, visitas técnicas para coletas de dados em campo e aplicação de questionários. Por fim, para aplicação do MO, realizou-se a implementação, a entrada de dados e a execução do MO no ambiente OpenOffice.org Calc (planilha de cálculo do OpenOffice.org). Na análise dos resultados, realizou-se a comparação entre a situação atual e pós-otimização (aplicação do MO) via análise gráfica e estatística descritiva (valores de máximo, média, mínimo, mediana e moda) e estudo do grau de compromisso entre soluções não dominadas, conforme é indicado no trabalho de Francato e Barbosa (2004).

Para a implementação computacional do MO, realizou-se a codificação do MO em ambiente OpenOffice.org, usando para isso macros, formulários e outros recursos, seguindo o protocolo que foi realizado por Makropoulos *et al.* (2008). A implementação do MO, aqui denominado de OSAA-rural (OSAA é formada pelas iniciais de “Otimização de Sistemas de Abastecimento de Água”), teve a finalidade de tornar amigável sua interação com o usuário e sua utilização em outros casos com características similares.

RESULTADOS

Aplicação do modelo ao estudo de caso

Como resultados da etapa de aplicação do MO, têm-se os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2, e nas Figuras 4, 5 e 6. Da Tabela 1 nota-se que há informações que podem auxiliar, preliminarmente, a tomada de decisão acerca da instalação ou não de Ghf e de respectivos comprimentos de $c_{Ghf,ij}$, além de apresentar características do estudo de caso. Por exemplo, notou-se importante diferença entre os valores de z_r , cerca de 25 m, entre as residências, o que implicará em importantes diferenças nos valores de pressão entre as residências. Assim, pode-se sugerir, de forma inicial, que nas residências com menores z_i (residências $i=1$ até $i=22$) sejam instalas as Ghf com maiores valores de $c_{Ghf,ij}$, ou seja, sugere-se a retirada de energia excessiva com o fim de obter equidade de pressões entre residências. Outros pontos importantes referem-se a: (1) a existência basicamente de dois diâmetros, Ø20 mm ($D_i=0.0154$ m) e Ø32 mm ($D_i=0.0260$ m); (2) a existência de, em média, cinco habitantes por residência; (3) o comprimento das tubulações de abastecimento de residências (L_i) variando de 62 até 699 m; (4) o consumo per capita de água de $57 \text{ L} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$; (5) a maior importância, dada pela população, para o objetivo diferença de pressão entre as residências ($w_{\Delta p_i}=0.70$) e menor importância ao custo de aquisição de Ghf ($w_{C_{ai}}=0.20$) e custo operacional ($w_{C_o}=0.10$), em outras palavras, para a população é muito mais importante receber água ao longo de todo o período de operação do SAA-rural do que ter baixos custos com a instalação e operação de Ghf, sendo esta a visão do decisor acerca do problema. Do ponto de vista técnico, a maior importância seria a garantia de pressão mínima de $10 \text{ mH}_2\text{O}$, conforme Tsutiya (2006), em todas as residências, em seguida o custo operacional e, finalmente, o custo com a aquisição de Ghf. Assim, um conjunto de pesos adequado, para uma visão técnica, poderia ser $w_{\Delta p_i}=0.50$, $w_{C_o}=0.30$ e $w_{C_{ai}}=0.20$. Naturalmente, em uma análise técnica do problema, mudanças estruturais importantes deveriam ser implementadas (por exemplo, implementação de rede convencional de abastecimento de água), o que contraria a ideia inicial da pesquisa, que privilegia a solução possível (ótimo possível) e não a solução técnica (ótimo técnico).

Na Tabela 2, são encontrados resultados da estatística descritiva, para a situação atual e pós-otimização (visão do decisor e visão técnica). Problemas na situação atual (importante diferença de pressão entre as residências, $20.32 \text{ mH}_2\text{O}$, e falta de água, pressão de $0.00 \text{ mH}_2\text{O}$), bem como sua solução no pós-otimização (reduzida diferença de pressão entre as residências, $4.44 \text{ mH}_2\text{O}$ e $8.08 \text{ mH}_2\text{O}$, abastecimento contínuo de água, pressão de $1.00 \text{ mH}_2\text{O}$), também são observados na Tabela 2. A diferença entre os máximos valores de pressão, entre a visão decisor e a visão técnica, são atribuídas aos valores de importância do decisor (equidade de pressão entre as residências) e da técnica (garantia de pressão mínima em todas as residências e custo operacional).

Tabela 1 | Dados do estudo de caso (tubulações e residências).

i	z_i (m)	Habitantes	D_i (m)	L_i (m)	Variáveis	Unidades	Valores
1	195.5	4	0.0154	550.0	q	$\text{m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	0.057*
2	200.1	6	0.0154	175.0	D_{RA}	m	2.20
3	202.7	4	0.0154	180.0	Z_{RA}	m	211.9
4	203.4	5	0.0154	62.0	pc	R\$	10.00
5	203.4	4	0.0260	212.0	c_m	$\text{R\$} \cdot \text{m}^{-1}$	4.00
6	205.2	3	0.0154	549.0	H_{j0}	m	11.00
7	205.3	4	0.0260	75.0	No. bar.	adimensional	2
8	205.6	5	0.0154	220.0	bc	R\$	15.00
9	205.7	5	0.0154	699.0	w_{Ca}	adimensional	0.20
10	206.4	2	0.0260	474.0	w_{Ap}	adimensional	0.70
11	206.6	4	0.0154	200.0	w_{Op}	adimensional	0.10
12	206.9	4	0.0154	599.0			
13	207.2	4	0.0154	500.0			
14	207.3	3	0.0154	325.0			
15	207.3	5	0.0154	250.0			
16	208.6	4	0.0154	275.0			
17	208.6	20	0.0260	100.0			
18	208.6	6	0.0260	325.0			
19	209.3	4	0.0154	500.0			
20	209.6	5	0.0154	262.0			
21	209.9	5	0.0154	225.0			
22	210.2	4	0.0154	100.0			
23	213.2	4	0.0260	443.0			
24	214.5	5	0.0260	393.0			
25	216.3	4	0.0260	343.0			
26	216.9	5	0.0154	250.0			
27	217.0	3	0.0260	187.0			
28	217.6	2	0.0154	112.0			
29	217.8	5	0.0260	368.0			
30	217.8	3	0.0154	217.0			
31	219.4	4	0.0260	370.0			
32	219.8	5	0.0260	424.0			
33	219.8	6	0.0154	225.0			
34	220.4	5	0.0154	175.0			

i é a identificação da residência, ordenada por ordem crescente de cota topográfica.

No. bar. é o número do barrilete na saída do reservatório.

* Obtido a partir do volume diário consumido e população residente na área de estudo (valor médio).

Tabela 2 | Estatística descritiva dos valores de pressões, no tempo $t = 8$ h, situação atual e pós-otimização.

Situação	Máximo (mH_2O)	Média (mH_2O)	Mínima (mH_2O)	Mediana (mH_2O)	Moda (mH_2O)
atual ($j = 1$)	20.32	8.22	0.00	8.82	0.00
atual ($j = 2$)	15.36	7.31	0.00	8.00	0.00
pós-otimização, visão decisor ($j = 1$)	4.44	1.38	1.00	1.00	1.00
pós-otimização, visão decisor ($j = 2$)	2.71	1.13	1.00	1.00	1.00
pós-otimização, visão técnica ($j = 1$)	1.90	1.16	1.00	1.00	1.00
pós-otimização, visão técnica ($j = 2$)	8.08	1.63	1.00	1.00	1.00

Na Figura 4, pode-se constatar a falta de água ($p_{ijt} < 1.00 \text{ mH}_2\text{O}$) na situação atual, mais especificamente, nas primeiras cinco residências localizadas nos pontos altos (residências $i=31j=1$, $i=32j=1$, $i=26j=2$, $i=33j=2$ e $i=34j=2$). Ainda, na Figura 4,

constata-se a inexistência de Ghf ($C_{Ghfj} = 0.00$) e de pressurização ($d_{ij} = 0.00$) nas tubulações secundárias, já que, obviamente, isso implica em severas diferenças de pressões entre as residências. A Figura 5 apresenta a combinação ótima entre residências (residências $i = 1, 2, \dots, 34$), tubulações principais (sistemas “ $j = 1$ ” e “ $j = 2$ ”), comprimentos de Ghf (C_{Ghfj}) e da pressurização de tubulação secundária (d_{ij}), segundo a visão do decisor. A observação da evolução temporal dos valores de pressão em todas as residências do SAA-rural, segundo a Figura 5, indica pressões maiores que 1.00 mH₂O, ou seja, nessa situação não se observa falta de água nas residências. Também, na Figura 5, notam-se ganhos significativos na equidade de pressões, já que se tem baixa variação nos valores de pressão entre as residências, independentemente de sua localização topográfica (por exemplo, $p_{i=1j=1t=0} \cong p_{i=32j=1t=0}$, $p_{i=1j=1t=2} \cong p_{i=32j=1t=2}$, ..., $p_{i=1j=1t=8} \cong p_{i=32j=1t=8}$). O resultado evidencia a existência de condições adequadas para garantia de abastecimento de água, evitando comportamentos de risco.

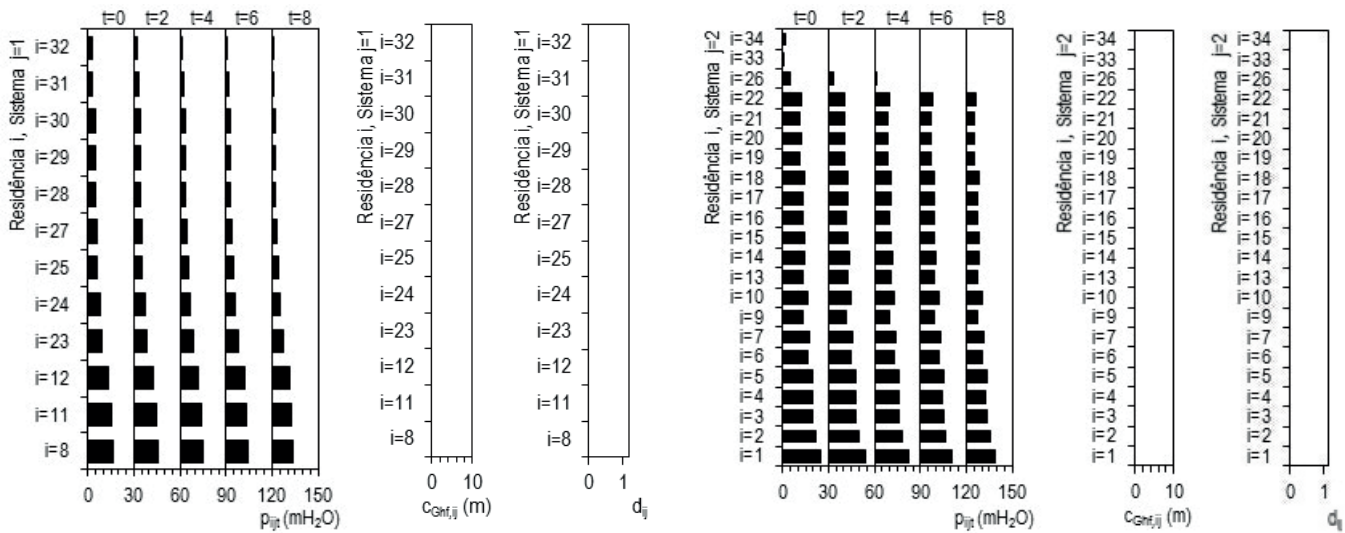


Figura 4 | Evolução temporal de pressões, comprimentos da Ghf e pressurização (d_{ij}): situação atual.

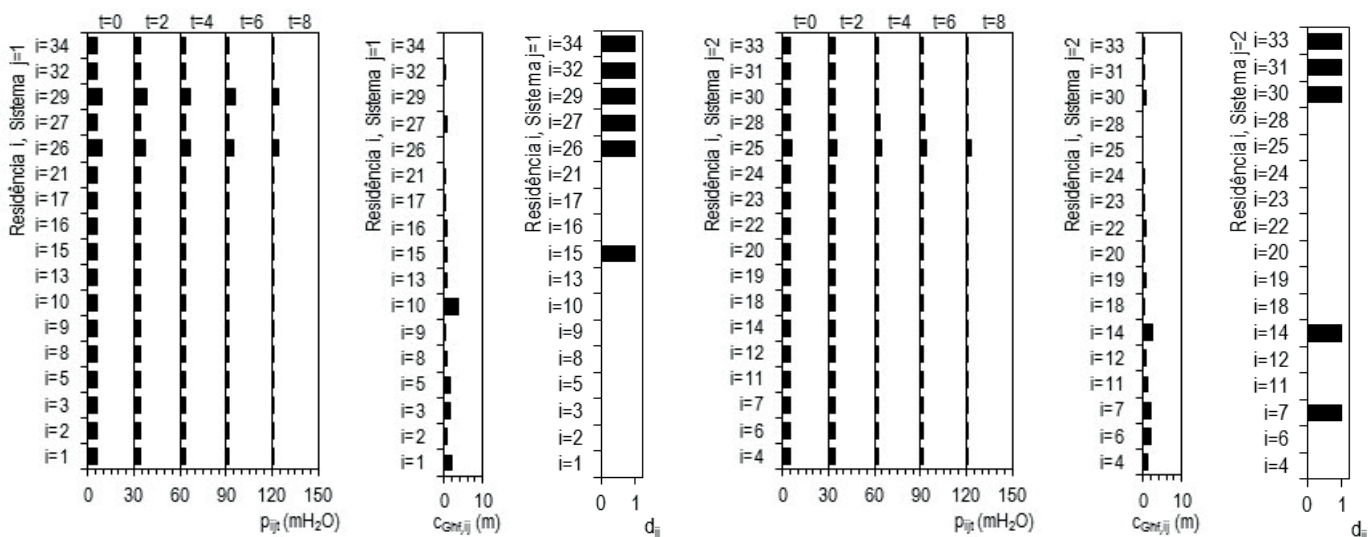


Figura 5 | Evolução temporal de pressões, comprimentos da Ghf e pressurização (d_{ij}): situação após-otimização, visão do decisor.

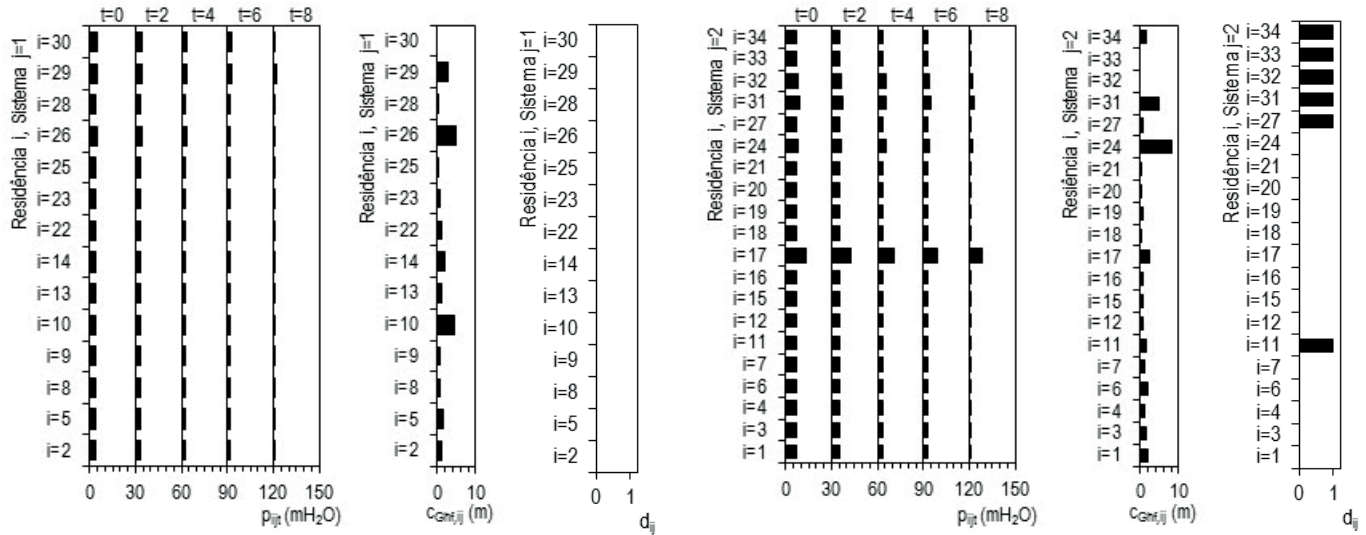


Figura 6 | Evolução temporal de pressões, comprimentos da Ghf e pressurização (d_{ij}): situação após-otimização, visão técnica.

Com base na visão do decisor, que enfrenta o problema e financiará os custos de sua solução, pode-se mencionar que o custo de aquisição e instalação da Ghf encontrado, por residência, foi cerca de R\$ 16.77, custo considerado baixo e aceitável para população de baixa renda. Ainda, com base na visão do decisor, tem-se que o custo de energia elétrica para operação do sistema pode ser considerado pouco importante, já que a tarifa energia local possui subsídio (energia rural). Os dados de altura manométrica e a vazão da bomba ($h_{mb} = 4.4 \text{ mH}_2\text{O}$, $Q_b = 0.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) sugerem que uma bomba com potência de 1/4 CV pode facilmente atender à necessidade de otimização desse SAA-rural.

De modo similar a Figura 5, a Figura 6 apresenta a combinação ótima entre residências (residências $i = 1, 2, \dots, 34$), tubulações principais (sistemas “ $j = 1$ ” e “ $j = 2$ ”), comprimentos de Ghf ($C_{Ghf,ij}$) e da pressurização (d_{ij}), agora segundo uma visão técnica. Nesta visão, observa-se maior variação de pressão entre as residências, maiores comprimentos de Ghf ($c_{Ghf,ij}$) e a redução na quantidade de tubulações secundárias pressurizadas ($\sum d_{ij} = 11$ na visão do decisor, $\sum d_{ij} = 6$ na visão técnica), quando comparados a visão do decisor. A visão do decisor prioriza a equidade de pressões nas residências, enquanto que a visão técnica prioriza o atendimento a pressões mínimas e o baixo custo com a operação do SAA-rural, o que explica as diferenças entre os resultados apresentados nas Figuras 5 e 6. Em ambas as visões (visão do decisor e visão técnica) pôde-se observar que a implantação da Ghf tem importante função, graças a ela as residências localizadas nos pontos altos, pontos intermediários e pontos baixos podem possuir mesmo valor de pressão. A compensação das diferentes cotas topográficas se deu devido ao aumento da perda de carga (aumento de $c_{Ghf,ij}$) e, conseqüentemente, mesma disponibilidade de água ao longo da operação do SAA-rural, coincidindo com a ideia inicial pesquisa.

O estudo do grau de compromisso entre soluções não dominadas, conforme Tabela 3, tem seus resultados nas Figuras 7 e 8. Foi realizada uma análise com maior atenção à função-objetivo Δp_{ij} , já que o julgamento da população (decisor) dá maior importância ($w\Delta p_{ij} = 0.70$) para essa função. Assim, observou-se, na Figura 7(a), que a minimização da função Δp_{ij} provoca um aumento na função Ca_{ij} . Da Figura 7(b), não se notaram tendências de redução ou elevação da função Co_j com a redução da função Δp_{ij} . Uma possível explicação pode ser atribuída ao fato de que, para se alcançar maior equidade de pressões (mín Δp_{ij}), faz-se necessário maior custo com Ghf (mín Ca_{ij}). Ainda, acrescenta-se que não há relação linear entre equidade de pressões (mín Δp_{ij}) e custo operacional (mín Co_j), já que uma bomba pode ou não ser necessária no SAA-rural e que o volume e cota topográfica do reservatório têm grande influência sobre a relação dessas funções-objetivo.

Tabela 3 | Combinações de pesos (função-objetivo C_{ai} , Δp_i e Co).

Combinação	$C_{ai} (w_{Ca})$	$\Delta p_i (w_{\Delta p})$	$Co (w_{Co})$	Combinação	$C_{ai} (w_{Ca})$	$\Delta p_i (w_{\Delta p})$	$Co (w_{Co})$
cw-1	0.00	0.00	1.00	cw-6	0.30	0.60	0.10
cw-2	0.00	1.00	0.00	cw-7	0.20	0.40	0.40
cw-3	1.00	0.00	0.00	cw-8	0.40	0.20	0.40
cw-4	0.10	0.30	0.60	cw-9	0.40	0.40	0.20
cw-5	0.60	0.10	0.30	cw-10	0.33	0.33	0.33

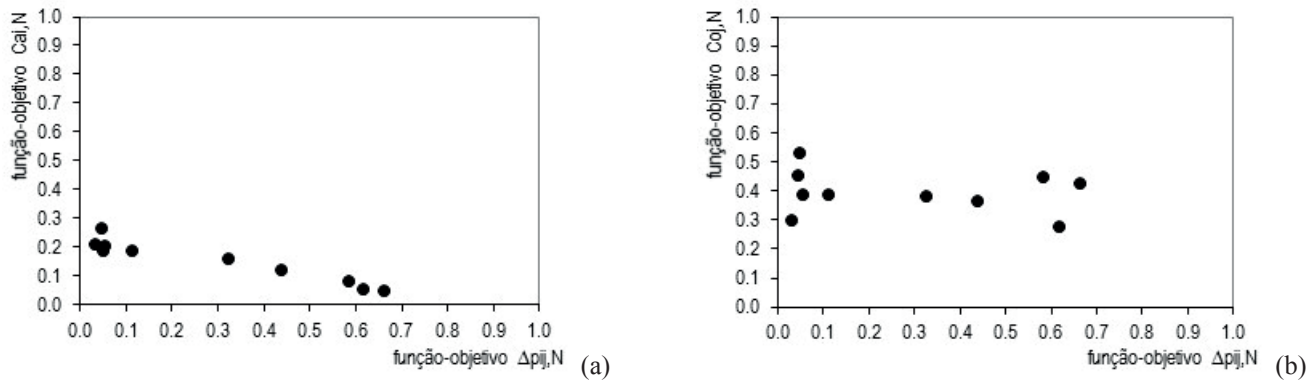


Figura 7 | Dispersão de soluções não dominadas.

A Figura 8 reforça a ideia de não linearidade entre a função-objetivo Co e as funções-objetivo C_{ai} e Δp_i , já que mesmo quando se deu preferência para a função Co (maior peso para essa função), ela não alcançou os menores valores. O mesmo não foi notado para as demais funções, conforme ilustrado na Figura 8 (cw-1, cw-2, ..., cw-9).

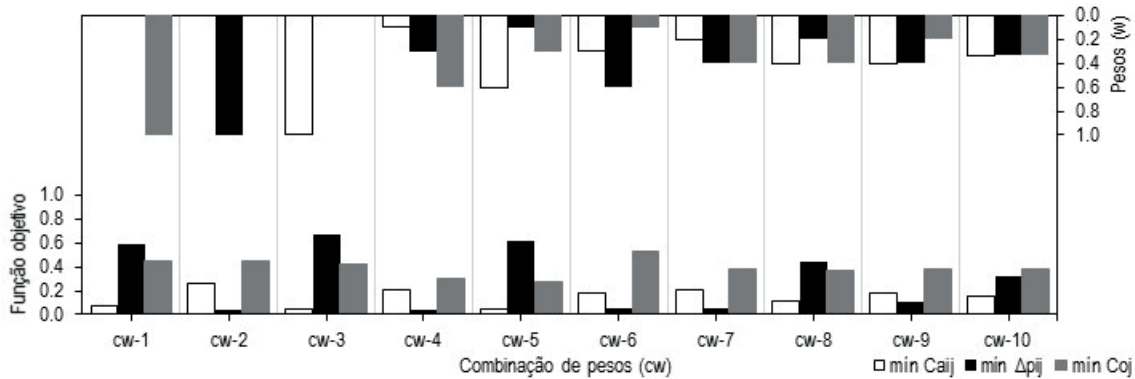


Figura 8 | Resultados de testes com funções-objetivos e combinações de pesos.

As otimizações foram realizadas em computador pessoal de mesa, com microprocessador *Intel Core i7*, com 2.4 GHz de velocidade e 8 GB de memória RAM, em Plataforma Windows. Os tempos de processamento computacional nos processos de otimização e os detalhes acerca das taxas adotadas no algoritmo de otimização SCO estão apresentadas na Tabela 4. Estes sugerem busca de alternativas para redução desse tempo de processamento computacional.

Tabela 4 | Tempo de processamento computacional e especificações do algoritmo SCO.

Combinação	Tempo computacional (min)	Combinação	Tempo computacional (min)	Parâmetros utilizados do SCO	Valores adotados
cw-1	20.6	cw-6	588.0	Learning cycles ⁽¹⁾	50000
cw-2	480.7	cw-7	518.0	Size of library ⁽²⁾	210*
cw-3	13.4	cw-8	29.6	Size of swam ⁽³⁾	70*
cw-4	454.0	cw-9	52.1	Stagnation limit ⁽⁴⁾	70*
cw-5	74.0	cw-10	39.7	Stagnation tolerance ⁽⁵⁾	0.000001*
				Use random starting point ⁽⁶⁾	Ativado*

⁽¹⁾ número de interações que o algoritmo deve realizar.

⁽²⁾ quantidade de informação alojada na biblioteca pública.

⁽³⁾ número de indivíduos que deve participar do processo.

⁽⁴⁾ número indivíduos que devem ser considerados semelhantes para que o processo pare por estagnação.

⁽⁵⁾ precisão para que as soluções sejam consideradas semelhantes.

⁽⁶⁾ se ativado, os indivíduos iniciais são escolhidos aleatoriamente.

* Valores sugeridos por Xie *et al.* (2002) para resolução de problemas complexos

Elaboração do suporte computacional

Por fim, a implementação computacional do MO (software OSAA-rural) foi realizada em planilha de cálculo do OpenOffice.Org. Naturalmente, o software OSAA-rural somente poderá ser utilizado em SAA-rural que possui características semelhantes ao SAA-rural estudado, conforme apresentado na Figura 2(a). Isso pode ser considerado como uma desvantagem, já que limita sua aplicação. Por outro lado, pode ser considerado como um avanço importante, uma vez que esse tipo sistema é comum em comunidades rurais carentes, para as quais, de modo geral, inexistem estudos acerca de falta de água, de otimização hidráulica e operacional. A estrutura de trabalho do software OSAA-rural inclui: (1) interface de entrada do modelo; (2) interface de entrada de dados; (3) interface de solicitação de processamento; e (4) interface de visualização de resultados. O OSAA-rural serve de molde computacional para construir e resolver o sistema de equações (Equações 4 até 25). Usando esse molde computacional, pode-se construir sistemas similares para qualquer configuração de SAA-rural. A Figura 7 apresenta as interfaces do software OSAA-rural. A utilização do software OSAA-rural se dá de maneira simplória, via acionamento de botões de entrada, de processamento e de saída de dados. Os dados a serem inseridos estão apresentados na Tabela 1. Após a entrada dos dados, o usuário deverá executar a primeira etapa do processamento (implementação das Equações 4 até 25 na planilha de cálculo). Na próxima ação, o usuário executará a segunda etapa do processamento, a determinação das variáveis de decisão do MO usando para isso o algoritmo de SCO. Na última atividade, o usuário visualiza os resultados, organizados no formato de tabelas e Figuras 4, 5 e 6.



Figura 9 | Interfaces software OSAA-rural: (a) tela de entrada; (b) tela de navegação.

CONCLUSÃO

Um modelo de otimização multiobjetivo de SAA-rural foi desenvolvido e aplicado em um caso real, apresentando resultados satisfatórios. Para o estudo de caso considerado, o Cinturão Colina Verde (área rural do município de Cuiabá, Estado de Mato Grosso, no Brasil), o modelo indicou que a implementação de pequenas modificações no SAA-rural poderá resultar na resolução dos problemas de falta de água e de má distribuição de pressões, além de minimizar custos com energia elétrica e a necessidade de grandes alterações físicas. Pequenas modificações no SAA-rural consistem da instalação de gerador de perda de carga (Ghf) e bomba centrífuga de 1/4 CV, ações de baixo custo e facilmente implementáveis.

LISTA DE SÍMBOLOS

H_{mt}	Altura manométrica no reservatório de abastecimento, no tempo t (m)
z_i	Cota do terreno na residência i (m)
h_{fi}	Perda de carga total do reservatório de abastecimento até a residência i (m)
h_{mb}	Altura manométrica fornecida pelo conjunto motor-bomba
H_{mt0}	Altura manométrica no reservatório de abastecimento, no tempo $t = 0$ h (m)
Q_i	Vazão de consumo na residência i ($m^3 \cdot h^{-1}$)
n	Número total das residências a serem abastecidas pelo SAA-rural
t	Tempo de funcionamento do SAA-rural (h)
D_{RA}	Diâmetro do reservatório (m)
z_{RA}	Cota do terreno no reservatório de abastecimento (m)
H_{t0}	Nível de água no reservatório de abastecimento, no tempo $t = 0$ h (m)
J_i	Perda de carga unitária na residência i ($m \cdot m^{-1}$)
L_i	Comprimento da tubulação que abastece a residência i (m)
J_{Ghf}	Perda de carga unitária da geradora de perda de carga localizada ($m \cdot m^{-1}$)
$c_{Ghf,i}$	Comprimento do tubo flexível ($\varnothing 3$ mm) existente na Ghf da residência i (m)
D_i	Diâmetro da tubulação da residência i ou do tubo flexível ($\varnothing 3$ mm) existente na Ghf da residência i (m)
K_1	Coefficiente do dia de maior consumo
K_2	Coefficiente da hora de maior consumo
P	População a ser abastecida (hab.)
q	Consumo per capita de água ($m^3 \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}$)
C_{ai}	Custo de aquisição e instalação da Ghf na tubulação que abastece a residência i (R\$)
pc	Custo total de peças/conexões (R\$)
cm	Custo unitário do tubo flexível ($\varnothing 3$ mm)
bc	Custo de aquisição e instalação peças/conexões para alimentação com bomba (R\$)
b, d	Variáveis binárias (0, 1)
Δp_i	Diferença de pressão entre a residência i e a residência localizada na maior cota topográfica (mH_2O)
p_{t8}	Pressão na residência, tempo $t = 8$ h (mH_2O)
p^*_{t8}	Pressão na residência localizada na maior cota topográfica, tempo $t = 8$ h
Co	Custo de operação mensal (R\$)
T	Número de horas mensais de funcionamento do sistema (h)

C_e	Custo unitário de referência (R\$·kW ⁻¹)
P_{ot}	Potência da bomba (kW)
g	Peso específico da água (N·m ⁻³)
Q_b	Vazão transportada pela bomba (m ³ ·s ⁻¹)
h	Rendimento global da fonte de energia
j	Número do barrilete; m é o número total de barriletes
N	Versão normalizada da função-objetivo (escala 0 até 1)
w_{Ca}	Peso de ponderação do objetivo custo de aquisição e implantação de Ghf
$w_{\Delta p}$	Peso de ponderação do objetivo diferença de pressão entre os pontos de consumo
w_{Co}	Peso de ponderação do objetivo custo operacional
x_N	Versão normalizada da variável x
x_i	Valor da variável x
$x_{máx}$	Máximo valor que a variável x pode assumir
a_{ij}	Variável binária que representa o abastecimento da residência i , pelo barrilete j
b_{ij}	Variável binária que representa a instalação Ghf, na tubulação da residência i , do barrilete j
c_{ij}	Comprimento de tubo flexível (Ø3 mm) instalado na Ghf da residência i , do barrilete j
d_{ij}	Variável binária que representa a pressurização, na tubulação da residência i , do barrilete j
p_{ijt}	Pressão na residência i , do barrilete j , no tempo t

REFERENCIAS

- Azevedo, R.P. (2004). Caracterização de sistema de abastecimento de água em comunidades rurais de várzea na Amazônia. *Anais do 2º Seminário Internacional de Engenharia de Saúde Pública*, Dezembro 1-3, Goiânia, Brasil, 705-710.
- Beinat, E. (1997). *Value Functions for Environmental Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NED. doi:10.1007/978-94-015-8885-0
- Cuiabá. (2014). *Prefeitura de Cuiabá: Bairros*. Disponível em: <http://www.cuiaba.mt.gov.br/imprime.php?cid=7884&sid=377>. Acesso em: 05 de nov. 2014.
- Farmani, R., Walters, G., Savic, D. (2006). Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality. *Journal of Hydroinformatics*, 8(3), 165-179. doi:10.2166/hydro.2006.019
- Ferreira, E.P., Ferreira, Y.P., Venturini, A.F., Moura, A.S., Rolim Neto, F.C. (2015). Saneamento rural – o desafio para o abastecimento de água em comunidades quilombolas no Estado de Alagoas. *Anais do 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Outubro 4-8, Rio de Janeiro, Brasil, 1-5.
- Francato, A.L., Barbosa, P.S.F. (2004). Soluções de compromisso na tomada de decisão sobre a operação diária de sistemas urbanos de abastecimento de água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 9(2), 39-50. doi:10.21168/rbrh.v9n2.p39-50
- Fu, G., Butler, D., Khu, S.T. (2008). Multiple objectives optimal control of integrated urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software*, 23(2), 225-234. doi:10.1016/j.envsoft.2007.06.003
- Goicoechea, A., Hansen, D.R., Duckstein, L. (1982). *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Jowitt, P.W., Germanopoulos, G. (1992). Optimal pump scheduling in water-supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(4), 406-422. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(1992)118:4(406)

- Larock, B.E., Jeppson, R.W., Watters, G.Z. (2000). *Hydraulics of Pipeline Systems*. CRC Press LLC, Washington D.C., USA.
- León, C., Martín, S., Elena, J.M., Luque, J. (2000). EXPLORE – Hybrid expert system for water networks management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(2), 65-74. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:2(65)
- Mackintosh, G., Colvin, C. (2003). Failure of rural schemes in South Africa to provide potable water. *Environmental Geology*, 44(1), 101-105. doi:10.1007/s00254-002-0704-y
- Makropoulos, C.K., Natsis, K., Liu, S., Mittas, K., Butler, D. (2008). Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Environmental Modelling & Software*, 23(12), 1448-1460. doi:10.1016/j.envsoft.2008.04.010
- Muthusi, F.M., Mahamud, G., Abdalle, A., Gadain, H.M. (2007). Rural Water Supply Assessment, Technical Report No-08, FAO-SWALIM, Nairobi, Kenya. Disponível em: http://sddr.faoswalim.org/Documents_Repository/water_reports/W-08%20Rural%20Water%20Supply%20Assessment.pdf. Acesso em: 12 de mai. 2016.
- Nicochelli, L.M., Siqueira, A.J.B., Migliorini, R.B., Albrecht, K.J., Delguingaro, A.R. (2009). Análise de vulnerabilidade à contaminação de aquífero no Distrito Industrial de Cuiabá – MT, através do método GOD. *Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Abril 25-30, São José dos Campos, Brasil, 4109-4116.
- PMSS. (2008). Municipalização dos Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário no Estado de Mato Grosso. Brasília. Disponível em: <http://www.pmss.gov.br/>. Acesso em: 29 de abr. 2011.
- Porto, A.L.L., Lanna, A.E.L., Braga Jr., B.P.F., Cirilo, J.A., Jahed Filho, K., Gobetti, L., Azevedo, L.G.T., Barros, M.T.L., Barbosa, P.S.F. (2002). *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. UFRGS/ABRH, Porto Alegre, BRA.
- Porto, R.M. (2001). Sistemas hidráulicos de tubulações. Em: *Hidráulica Básica* (R.M. Porto, ed.). EESC-USP, São Paulo, BRA, 93-117.
- Reis, M.G.C. (2004). Estabelecendo parcerias – ampliação da rede de abastecimento de água e implantação de sistema de esgotamento sanitário por meio de mutirão – a experiência do serviço autônomo de água e esgoto de Alagoinhas-BA. *Anais do 2º Seminário Internacional de Engenharia de Saúde Pública*, Dezembro 1-3, Goiânia, Brasil, 929-935.
- RWSN. (2010). Myths of the Rural Water Supply Sector. St.Gallen. Disponível em: <http://www.ircwash.org/sites/default/files/RWSN-2010-Myths.pdf>. Acesso em: 14 de mai. 2016.
- Sadeghi, G.H., Mohammadian, M., Nouran, M., Peyda, M., Eslami, A. (2007). Microbiological Quality Assessment of Rural Drinking Water Supplies in Iran. *Journal of Agriculture & Social Sciences*, 3(1), 31-33.
- Souza, K.S., Dutra, L.K.A., Rêgo, N.F.L., Silva, J.F. (2015). Levantamento das condições de saneamento na comunidade km 32, zona rural de Barreiras-BA. *Anais do 21º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Novembro 22-27, Brasília. Brasil, 1-8.
- Tsutiya, M.T. (2006). Redes de distribuição de água. Em: *Abastecimento de água* (M.T. Tsutiya, ed.). PHA-EPUSP, São Paulo, São Paulo, BRA, 389-455.
- Xie, X.F., Zhang, W.J., Yang, Z.L., (2002). Social cognitive optimization for nonlinear programming problems. *Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, November 4-5, Beijing, CHN, 779-783.
- Zyl, J.E., Savic, D.A., 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. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(160)