

Metodologia para otimização operacional de sistema de bombeamento de água com velocidade rotacional constante

Methodology for optimization of water pumping operational system at constant rotating speed

- **Data de entrada:** 02/11/2021
- **Data de aprovação:** 20/12/2021

Raynner Menezes Lopes^{1*} | Pedro Guido Mottes Bassegio² | Guilherme Santanna Castiglio² | Thaise Daniele Paixão Teixeira³ | Mariane Kempka⁴ | Maurício Dai Prá⁵ | Marcelo Giulian Marques⁵ DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.023>

ORCID ID

Lopes RM  <https://orcid.org/0000-0001-8346-1280>
 Bassegio PGM  <https://orcid.org/0000-0001-5854-8843>
 Castiglio GS  <https://orcid.org/0000-0002-2554-7884>

Teixeira TDP  <https://orcid.org/0000-0002-0737-131X>
 Kempka M  <https://orcid.org/0000-0003-2619-5144>
 Prá MD  <https://orcid.org/0000-0002-1858-1531>
 Marques MG  <https://orcid.org/0000-0002-9948-3094>

Resumo

As despesas com energia elétrica têm onerado os custos dos Sistemas de Bombeamento de Água (SBA) no Brasil. As ações de eficiência energética são utilizadas para reduzir essas despesas, permitindo um melhor planejamento das companhias de saneamento e melhorias na manutenção e operação dos SBAs. No presente estudo foi utilizado um algoritmo de otimização para minimizar os custos operacionais e de implantação de 441 SBAs fictícios, com velocidade rotacional constante. Posteriormente, foram utilizados dois indicadores de desempenho operacional nos SBAs, sendo eles o Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado (CEEN) e o Fator de Carga (FC). Nos resultados, foram indicados pelo CEEN bons desempenhos operacionais nos SBAs. Para o FC, os desempenhos variaram de péssimo a regular. Essa característica é previsível e pode ser melhorada se o sistema for dimensionado e operado em etapas.

Palavras-chave: Abastecimento de Água. Energia Elétrica. Eficiência Energética. Custo. Algoritmo Genético.

Abstract

Electricity expense has increased the cost of Water Pumping Systems (WPS) in Brazil. Energy efficiency actions are necessary to reduce these expenses, allowing for a better planning by the sanitation companies, as well as improvements in the maintenance and operation of the WPSs. In the present study, an optimization algorithm is used to minimize the operational and implementation costs of 441 fictitious WPSs, operating at constant rotational speed. Subsequently, two operational performance indicators were used in the SBAs, namely, the Standardized Energy Consumption (SEC) and the Load Factor (LF). In the results, the SEC indicated good operational performance in the WPSs. For the LF, performances ranged from poor to regular. This characteristic is predictable and can be improved if the system is constructed to be scaled and to operate in stages.

Keywords: Water Supply. Electricity. Energy Efficiency. Cost. Genetic Algorithm.

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA) - Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC) - Tucuruí - Pará - Brasil.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - Campus do Vale - Porto Alegre - Rio Grande do Sul - Brasil.

³ Universidade Federal do Pará (UFPA) - Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE) - Tucuruí - Pará - Brasil.

⁴ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Campus Guarapuava - Guarapuava - Paraná - Brasil.

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - Campus do Vale - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) - Porto Alegre - Rio Grande do Sul - Brasil.

* **Autor correspondente:** raynnerlopes@ufpa.br.

1 INTRODUÇÃO

O setor elétrico brasileiro, na última década, passou por reformulações no sistema tarifário. Os impasses na geração da energia e o crescente consumo levaram à criação do sistema de bandeiras tarifárias no ano de 2015 (BRASIL, 2019). Nesse sistema, o repasse dos custos de geração de energia elétrica ao consumidor é realizado de acordo com o tipo de fonte de energia adotado considerando o sistema interligado nacional.

Essa mudança impactou as Despesas de Exploração (DEX) das concessionárias de saneamento, que vêm realizando ações de eficiência energética para reduzir essas despesas.

O Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS), por exemplo, registrou aumento do percentual da participação da energia elétrica nas DEX das concessionárias. No ano de 2014, a despesa com energia elétrica foi de 11,24 %, enquanto no ano de 2015 (ano de início do sistema de bandeiras), a despesa subiu para 15,61%, representando aumento de 4,37% (BRASIL, 2016; 2017). Entre os anos de 2013 e 2014, antes do sistema de bandeiras, o crescimento havia sido de apenas 0,38 % (BRASIL, 2015; 2016).

Dentre os componentes da infraestrutura de saneamento, os sistemas de bombeamento estão entre os que mais consomem energia elétrica, e o aumento na tarifa do kWh eleva substancialmente o custo operacional desses sistemas. Esse custo operacional normalmente é o maior dentre os custos do ciclo de vida do sistema de bombeamento, seguido do custo de manutenção, custo inicial e outros (SAHOO et al., 2009). A gestão hidroenergética das instalações é necessária e urgente e precisa de soluções para atender às demandas de água com a menor despesa de energia elétrica (LOPES et al., 2020). Nesse sentido, o desenvolvimento de métodos para reduzir o consumo de energia elétrica nos sistemas de bombeamento é importante, pois reduz os gas-

tos da concessionária, colaborando para o aumento da cobertura com serviços de saneamento, especialmente água e esgoto, além de trazer consigo o fator sustentabilidade.

A aplicação de técnicas computacionais de otimização para solucionar problemas em Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), como minimizar custos operacionais (CO), custos de implantação (CI) ou calibração de modelos, por exemplo, tem crescido. A exemplo, recomenda-se consulta a Wu et al. (2012) e Wu, Maier e Simpson (2013).

No presente estudo foi utilizado um algoritmo de otimização mono-objetivo para minimizar os custos operacionais e de implantação de 441 Sistemas de Bombeamento de Água (SBA) fictícios, com velocidade rotacional constante. Buscou-se verificar se esse método retornaria bons resultados operacionais e de eficiência. Para isso, foi utilizado um indicador de desempenho operacional denominado Consumo Específico Normalizado (CEEN). Adicionalmente, foi utilizado outro indicador de desempenho operacional, denominado Fator de Carga (FC), para verificar outro aspecto da questão energética: a utilização racional da energia elétrica.

2 OBJETIVO

Propor método para a otimização de operação de SBA com velocidade rotacional constante, considerando o horizonte de projeto do sistema.

3 METODOLOGIA

Para a minimização dos custos em um SBA qualquer, foram levados em consideração três elementos, indicados na Fig. 1. O primeiro elemento é o consumo (demanda) por água, e o SBA deverá operar com o reservatório para supri-lo. Esse consumo pode ser representado por um gráfico de vazões horárias de água consumida durante

24 horas. O segundo elemento são as características físicas do sistema, como diâmetro, material e comprimento da tubulação, volume de reservação de água, entre outros. Essas características

definirão o custo inicial do sistema. Por fim, o terceiro elemento é a rotina de operação do SBA, a partir da qual será determinado o kWh consumido e o custo operacional.

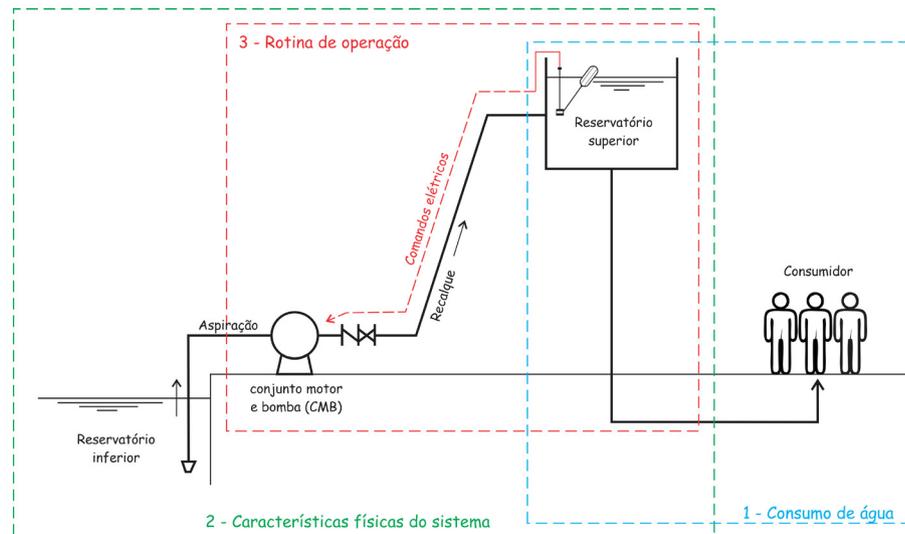


Figura 1- Elementos considerados para minimização dos custos do SBA.

Fonte: O autor (2022)

Inicialmente foram definidas as demandas por água que um SBA qualquer deve suprir. Foram utilizados sete gráficos (curvas) de vazões, que representam sete perfis de variação distintos de consumo de água. As curvas utilizadas foram monitoradas com macromedidores de vazão instalados nos SAAs do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) de Porto Alegre, Rio Grande do Sul (KURITZA, 2017), Setor básico da Universidade Federal do Pará (UFPA), campus Belém (SÁ, 2012), Reservatório Jardim Popular, da região metropolitana de São Paulo (SILVA, 2003), e do município de Santana do Livramento, Rio Grande do Sul (LENHS/UFGRS, 2017). Cada curva foi adimensionalizada, isto é, dividiu-se cada vazão horária de consumo da curva pela vazão máxima de consumo da mesma curva (Fig. 2). As curvas de consumo adimensionais são úteis pois preservam o perfil da variação de consumo de

água. Esse perfil acaba por se manter, independentemente do valor de vazão de pico adotado para aquela curva.

As curvas deslocadas, também indicadas na Fig. 2, foram obtidas movendo-se o pico de consumo da curva original para o início do horário de ponta, definido para ocorrer das 18:00h às 20:59h. O horário de ponta é o período de três horas consecutivas em que o valor da tarifa de energia elétrica é maior do que o cobrado nas demais horas do dia (FERREIRA et al., 2020).

Essas curvas foram utilizadas para determinar o volume diário (V) de água consumida no primeiro e último ano do horizonte de projeto (que neste estudo foi de 20 anos). Para isso foi utilizada população de 22.977 habitantes¹, coeficiente do dia de maior consumo ($K1$) de 1,3 (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ, 2015), consumo per capi-

¹De acordo com o estudo realizado por Kuritza (2017), a população de 22.977 habitantes, é representativa no Brasil.

ta de água (q) de $0,185 \text{ m}^3/\text{hab.dia}$ no início do horizonte de projeto e de $0,25 \text{ m}^3/\text{hab.dia}$ no fim desse horizonte, representando o aumento do padrão de vida da população, que tende a ob-

ter mais equipamentos residenciais (como lavapropas, banheiras etc.). Para obter o consumo no último ano, foi utilizada taxa de crescimento populacional de $0,65\%$ ao ano.

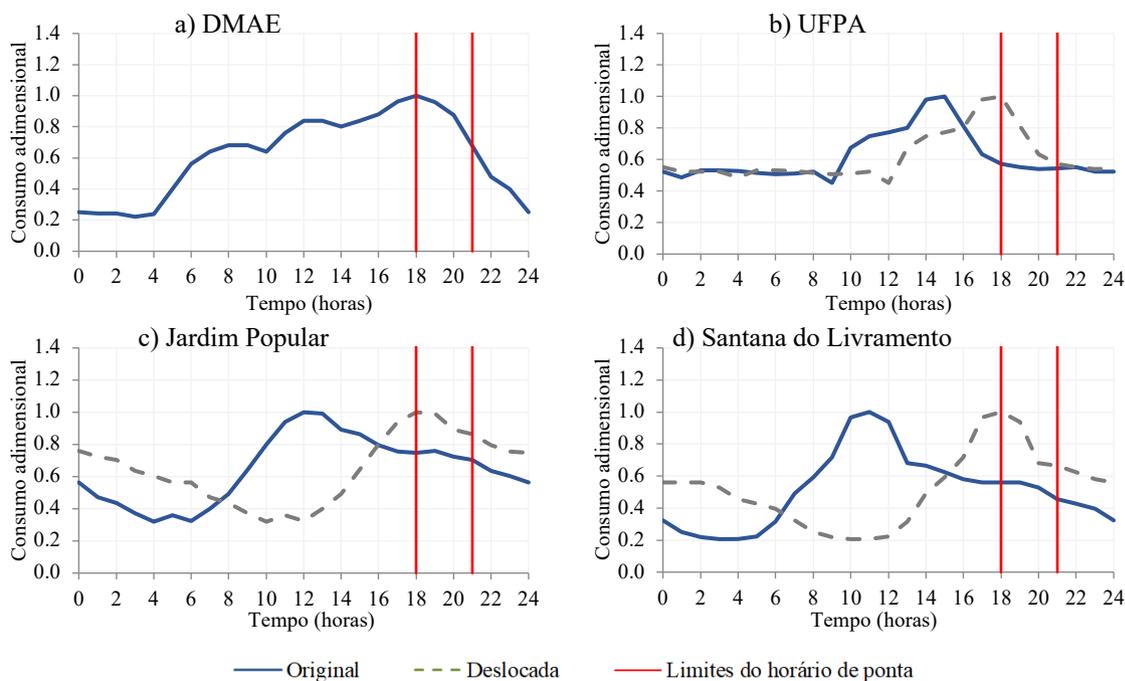


Figura 2 - Curvas de consumo adimensionais utilizadas no estudo.
 Fonte: Kuritza (2020); Sá (12); Silva (2013); LENHS/UFRGS (2017).

Após tornar as curvas adimensionais, estas foram discretizadas em intervalos de 1 minuto para refinar posteriormente o balanço de volume de água no reservatório.

A concepção adotada para o SBA foi uma concepção típica, composta por dois conjuntos motor e bomba (CMB), um operante e um reserva. A bomba recalca água do reservatório inferior (que pode ser um rio, poço etc.) para o reservatório superior interligado à bomba pela tubulação adutora².

3.1 Simulação - Otimização

Definida a concepção geral do SBA, foram inseridas no programa de simulação combinações de valores de comprimento (L) e diâmetro interno da tubulação da linha de recalque (D_i), além da altura geométrica (H_g). Para L os valores utilizados foram 100 m, 500 m e 1000 m. Os valores de D_i utilizados foram 274 mm, 326 mm, 378 mm, 429 mm, 480 mm, 532 mm, 635 mm (SAINT GOBAIN, 2015). Para H_g foram selecionados os valores de 25 m, 50 m e 75 m. No total, foram otimizados

² Existem diversas outras concepções de SBA, como uma com três CMBs e duas tubulações de recalque transportando água para dois reservatórios superiores distintos. No entanto, optou-se neste estudo pela concepção mais típica, como forma de evitar análise mais complexa (e maior esforço computacional) com um SBA de concepção específica.

os custos de 441 sistemas de bombeamento teóricos (3L x 7Di x 3Hg x 7 curvas de consumo). O material da tubulação foi o ferro fundido.

O processo de otimização adotado (Fig. 3) utilizou uma derivação do Algoritmo Gené-

tico (AG) convencional. O algoritmo SCE-UA, que foi desenvolvido por Duan et al. (1992), inicialmente foi usado para a calibração de modelos hidrológicos.

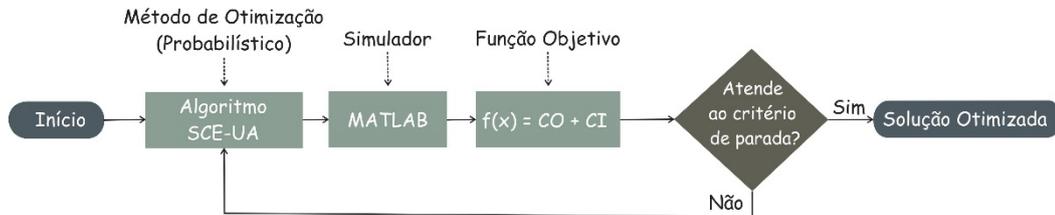


Figura 3 - Processo de otimização adotado.
Fonte: Adaptado de Gomes (2017)

A variável de decisão x_1 , indiretamente, determina a vazão de bombeamento no primeiro ano de operação (Q_{b1}), pois foi definida como sendo a relação entre a vazão de bombeamento no primeiro ano de operação e a vazão de bombeamento no último ano desse horizonte de projeto (Q_{b20}). Admitiu-se, ainda, que a vazão no último ano do horizonte de projeto ocorreria no ponto de máxima eficiência do conjunto elevatório³. Para manter essa condição, foi necessário definir o es-

paço de busca para x_1 , como sendo entre 1 e 1,1 (ver Fig. 4a e Fig 4b), pois dessa forma a vazão de bombeamento no ano 1 será sempre maior que a vazão de bombeamento no ano 20 (vazão no ponto de máximo rendimento), garantido a reprodução das mudanças reais que ocorrem no sistema de bombeamento (a tubulação envelhece ao longo do tempo, tendo sua capacidade hidráulica reduzida, e por conta disso, transporta menor vazão de bombeamento ao longo dos anos).

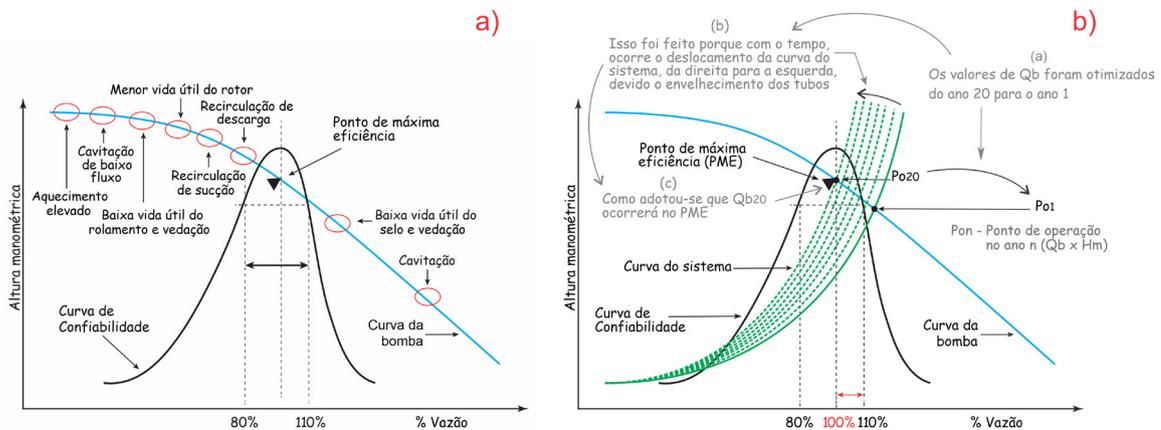


Figura 4 - a) faixa de maior confiabilidade da bomba, b) deslocamento ao longo dos anos, da curva do sistema, para o ponto maior eficiência do SBA.

Fonte: Adaptado de Bloch (2012).

³ Para informações sobre tornar o conjunto elevatório mais eficiente, consultar Gomes (2009), pág. 70.complexa (e maior esforço computacional) com um SBA de concepção específica.

A variável de decisão x2 (vazão de bombeamento no ano 20) teve como limite inferior do seu espaço de busca, a vazão máxima da curva de consumo de água utilizada para aquela simulação específica. Essa condição garante que a vazão de bombeamento sempre estará acima da vazão máxima de consumo, mantendo a confiabilidade do fornecimento de água e permitindo que o conjunto elevatório desligue para que o reservatório possa esvaziar.

O limite de busca superior foi definido de modo que a velocidade não fosse superior a 3 m/s, conforme recomendado por ABNT (2017).

A variável de decisão x3 foi o volume do reservatório superior, e seu espaço de busca variou entre 1/30 do volume consumido diariamente⁴ e o

valor de 1000 m³, valor máximo de volume citado por Tsutiya (2006a).

Os tempos de bombeamento das vazões do ano 1 e 20 foram definidos por meio de uma regra de operação, associada aos esvaziamentos do reservatório, no ano 1 e no ano 20. Esses esvaziamentos, por sua vez, dependem do perfil de consumo de água (curvas de consumo).

Para determinar o custo operacional ao longo do horizonte de projeto, foi realizada projeção linear a partir do custo com energia elétrica no primeiro e no último ano de operação (Fig. 5). Buscou-se, inicialmente, realizar a otimização para todos os 20 anos de operação, individualmente, a fim de caracterizar o perfil de crescimento dos custos, porém o esforço computacional foi elevado, inviabilizando a análise.

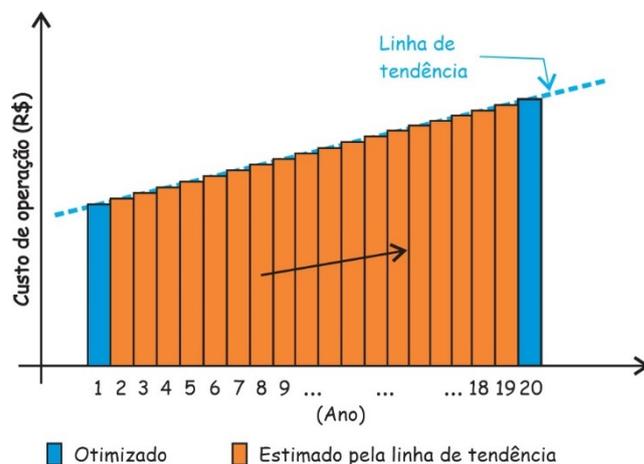


Figura 5 - Estimativa dos custos operacionais anuais intermediários ao ano 1 e ano 20.

Fonte: O autor (2022)

No cálculo dos custos anuais com energia elétrica, foi utilizada a tarifa verde, com os valores de 1,515010 R\$/kWh (consumo na ponta), 0,324990 R\$/kWh (consumo fora da ponta), 18,89 R\$/kW (demanda) e foram consideradas

as alíquotas de 4,75% para PIS+COFINS e de 30% para o ICMS (CEEE, 2018, 2019). Posteriormente os custos foram corrigidos à inflação de 8,1% e, na sequência, trazidos para valor presente com taxa de 10% ao ano.

⁴ O volume diário foi definido pela soma das vazões horárias da curva de consumo utilizada na simulação.

Em relação à implantação do SBA, foram utilizadas equações dentro de rotinas programadas para selecionar a potência comercial do CMB, estimar eficiência desse CMB, calcular o volume do dispositivo de proteção contra transientes, e outros procedimentos. Para a modelagem do custo de implantação, foram utilizadas as Eq. 1, 2 e 4, propostas por Kuritza (2017), e as Eq. 3 e 5, desenvolvidas para este estudo, sendo que a Eq. 5 foi gerada a partir de dados disponibilizados por Tassinari (2017).

$$C_{\text{Adução}} = 0,0023.Di^2 + 0,5306.Di + 94,999 \quad (1)$$

$$C_{\text{CMB}} = 3,1688.P_{\text{inst}}^2 + 388,55.P_{\text{inst}} + 9022,1 \quad (2)$$

$$C_{\text{CMB}} = 387,4 * P_{\text{inst}}^{1,1538} \quad (3)$$

$$C_{\text{Reservatório}} = -0,1202.V_u^2 + 345,94.V_u + 63443 \quad (4)$$

$$C_{\text{Chaminé}} = 1,4685.(V_{\text{Chaminé}})^2 + 683,81.(V_{\text{Chaminé}}) + 39933 \quad (5)$$

Onde: C_{adutora} é o custo da linha de adução (R\$); Di é o diâmetro interno da linha (mm); C_{CMB} é o custo do conjunto motor e bomba (R\$), P_{inst} é a potência instalada (kW), $C_{\text{reservatório}}$ é o custo do reservatório (R\$), V_u é o volume útil do reservatório superior (m^3), $C_{\text{Chaminé}}$ é o custo da chaminé de equilíbrio⁵ e $V_{\text{Chaminé}}$ é o volume da chaminé de equilíbrio.

Finalizada a simulação-otimização, foram utilizados dois indicadores para verificar o desempenho operacional dos SBAs. Os indicadores utilizados foram o Consumo Específico de Energia Normalizado – CEEN, em kWh/m³/100m (equação (6)) e Fator de Carga – FC, adimensional (Eq.

7). Informações sobre esses indicadores podem ser encontradas em Tsutiya (2006b), Gomes (2009) e Capelli (2013).

$$CEE_N = \frac{C_E}{V_b \cdot \frac{H_m}{100}} \quad (6)$$

$$FC = \frac{C_E}{D \cdot H} \quad (7)$$

Onde: C_E – consumo energia elétrica/mês (kWh), V_b – volume bombeado (m^3), H_m – altura manométrica (m) D – demanda (kW), H – horas de funcionamento/mês.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o método proposto, foram otimizadas as operações de 441 SBA fictícios. Na Fig. 6 é observado o exemplo das rotinas operacionais otimizadas de um dos SBA, durante cinco dias para o ano 1 e cinco dias para o ano 20. Esse SBA alimenta o reservatório superior que abastece um dos sete perfis de consumo de água adotados nesse estudo (chamado na Fig. 6 de vazão de saída do reservatório). Para essa rotina, a vazão bombeada no ano 1 foi de 625,01 m³/h (2,94 m/s), e a vazão bombeada no ano 20 foi de 576,53 m³/h (2,71 m/s). O volume otimizado do reservatório superior, para este SBA, foi de 623,2 m³. Observa-se que na rotina do ano 1 a bomba foi desligada em algum momento, dentro dos horários de ponta dos cinco dias, mostrando dessa forma que o programa, de fato, buscou a operação mais barata em consonância com o custo de implantação do sistema.

No ano 20, com o crescimento populacional estimado e aumento do consumo per capita de água,

⁵ Chaminé de equilíbrio (*standpipe*) é um dispositivo de proteção contra transientes hidráulicos, utilizado em sistemas hidrelétricos e estações de bombeamento de água.

a demanda por água elevou-se, fazendo com que o sistema de bombeamento permanecesse mais tempo ligado, inclusive nos horários de ponta. Nessa rotina operacional, o sistema desligou nos

horários de ponta de três dias apenas e o volume acumulado no reservatório superior passou a ter crescimento mais lento em comparação ao primeiro ano de operação.

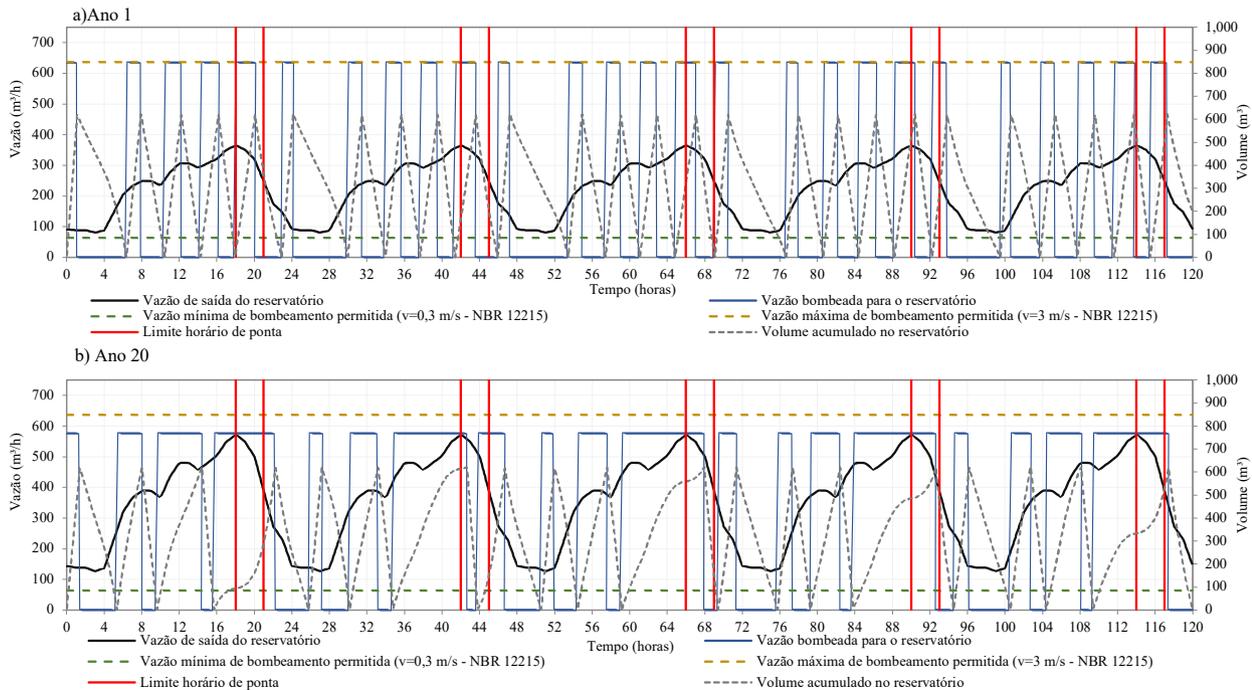


Figura 6 - Rotina de bombeamento otimizada para 5 dias (120 h) de operação, gerada para o SBA com $H_g = 75 \text{ m} / L = 1000 \text{ m} / D_i = 274 \text{ mm}$, com o objetivo de suprir a curva de consumo do DMAE, no ano 1 e no ano 20.

4.1 Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado (CEEN)

Esse indicador pode ser avaliado por períodos menores que um ano, mas é necessário cuidado na interpretação dos resultados quando usado para comparações internas ou externas (ALEGRE et al. 2016). A Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) de Portugal usa valores de referência como faixas de qualidade do serviço de bombeamento. De acordo com ERSAR (2016), se $0,27 \leq \text{CEEN} \leq 0,4$, a qualidade do serviço é boa. Caso $0,4 < \text{CEEN} \leq 0,54$, a qualidade é mediana. Se $0,54 < \text{CEEN} < 5$, a qualidade é insatisfatória.

Esses valores de referência são utilizados em estudos de auditoria energética como ferramenta para melhorar a eficiência dos serviços de SAAs (MAMADE et al. 2014). A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) também aplica esses valores em suas estações de bombeamento (Sabesp, 2014). Portanto, na Fig.7 é possível observar que no ano 1 (onde os SBAs teriam a menor eficiência, já que esta foi simulada para ser elevada ao longo dos anos, conforme a Fig. 4b) os desempenhos operacionais foram bons e apresentaram valores de CEEN muito próximos. Logo, os SBAs analisados podem ser considerados eficientes.

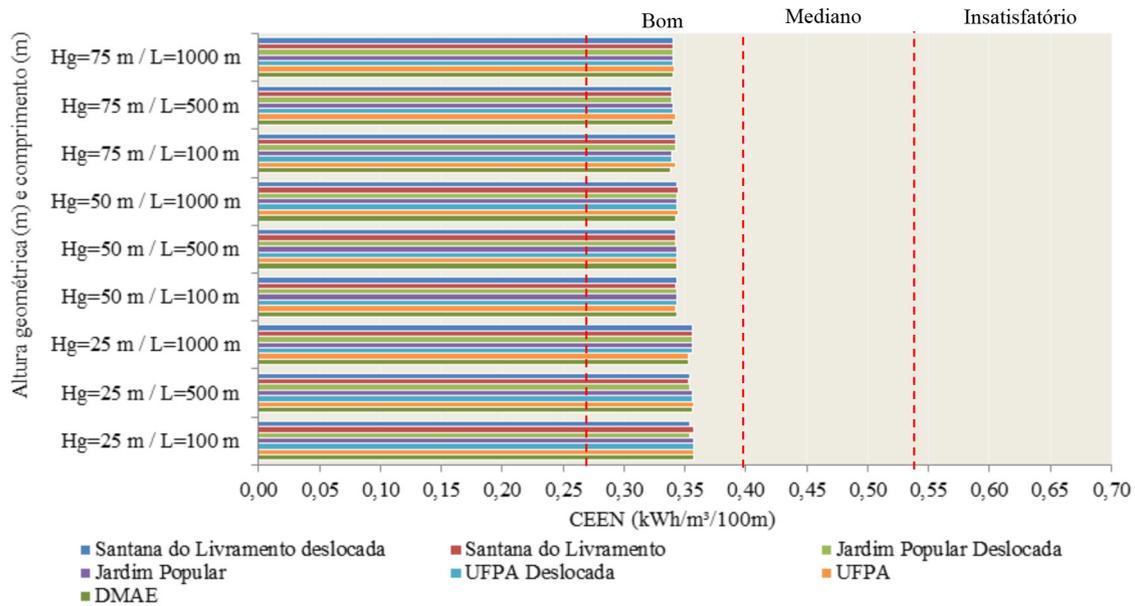


Figura 7 - CEEN no ano 1 para os diâmetros ótimos de cada combinação de Hg e L.

Também é importante citar que serviços de bombeamento com bom CEEN têm rendimento do conjunto elevatório superior a 68% (SABESP, 2014) e que ERSAR (2016) não propõe ações de melhorias para sistemas com um bom serviço de bombeamento, o que pressupõe que estudos ou ações para sistemas de bombeamento com essa classificação não compensem na prática, dada a realidade das dificuldades operacionais diárias de um sistema de bombeamento.

4.2 Fator de Carga (FC)

Para o dimensionamento de sistemas de bombeamento, é recomendado na literatura que se usem margens de segurança, de modo a garantir a confiabilidade do abastecimento. No entanto, vazões de bombeamento muito superiores às de consumo caracterizam superdimensionamento do sistema, levando ao uso pouco racional da energia elétrica.

O FC é um indicador de uso racional da energia elétrica que pode variar de 0 a 1. Se mais próximo de 1 melhor é o FC e menor é o valor do kW (demanda de potência) faturável, já que essa demanda estará

mais próxima do consumo de energia. Nos instantes em que a demanda de potência for excessivamente maior que o consumo, há custos inadequados na conta de energia elétrica (CAPELLI, 2013). O FC pode ser classificado como péssimo se estiver entre 0 e 0,35, ruim se for de 0,35 a 0,55, regular, se for de 0,55 a 0,75, bom, caso esteja entre 0,75 e 0,90 e ótimo, caso o FC ultrapasse 0,9 (TSUTIYA, 2006b).

A fim de analisar o FC nas operações otimizadas, foi elaborada a Fig. 8, que mostra o FC no ano 1 e no ano 20 para as operações dos SBAs fictícios desse estudo, cujos diâmetros da tubulação de recalque foram os ótimos (resultaram em menor custo de operação somado ao de implantação, dentre os 7 Di simulados). Foi observado que no ano 1 o uso racional transitou entre “péssimo” e “ruim”. Contudo, um FC baixo nos primeiros anos de operação é previsível, já que os sistemas, de modo geral, são projetados para atender populações futuras, onde a demanda por água é mais elevada. Tsutiya (2006b) observa que, na ocasião da implantação, normalmente os conjuntos elevatórios que estão superdimensionados têm FC da ordem de 0,3 (péssimo), e podem permanecer baixos se a previsão de vazão realizada pelo projetista falhar.

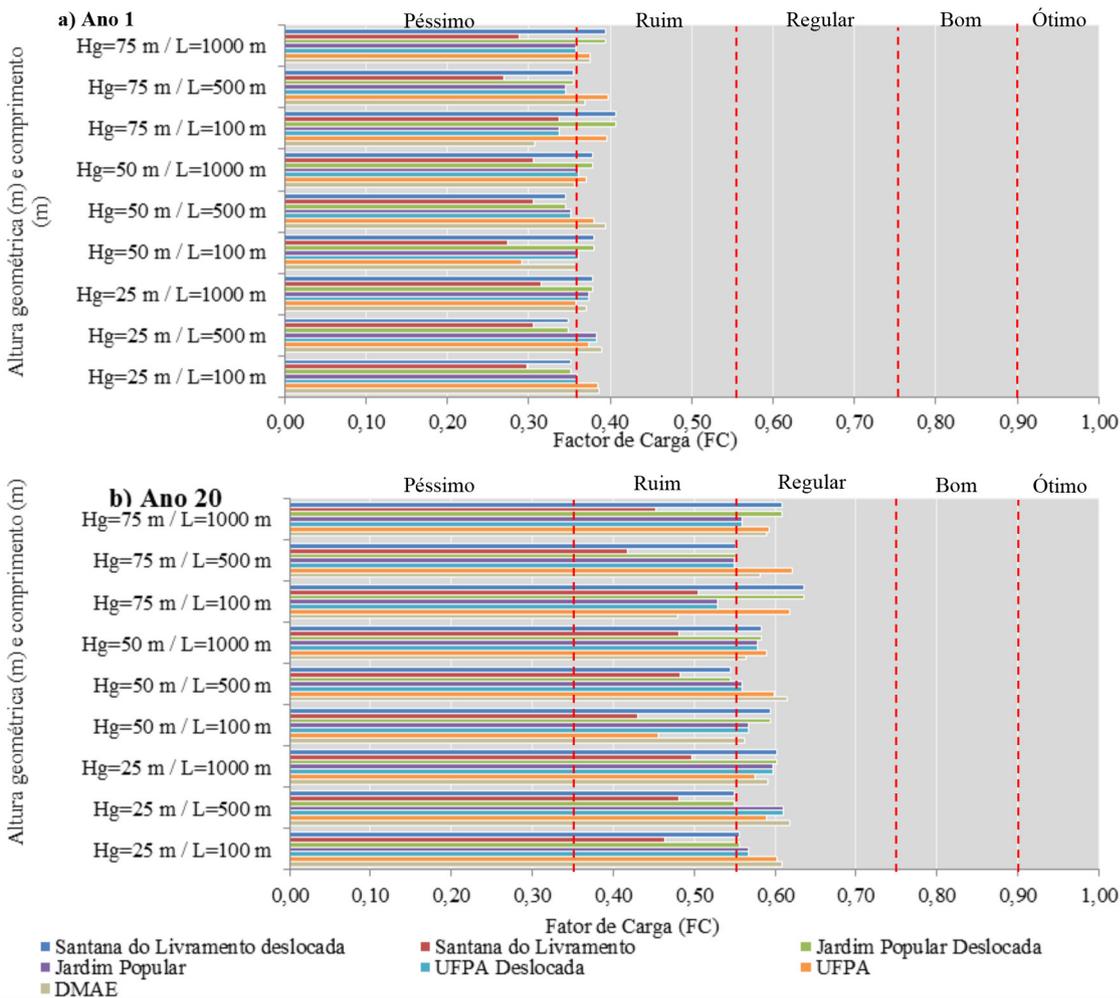


Figura 8 - Fator de carga no ano 1 (a) e no ano 20 (b) para os diâmetros ótimos de cada combinação de Hg e L.

Tsutiya (2006b) recomenda ainda, para melhor gerenciamento do uso racional da energia elétrica, que o sistema de bombeamento seja implantado em etapas com intervalos de 5 anos, e que ao longo desses períodos o índice de utilização mínima seja de 14 horas/dias, isto é, que o sistema tenha FC de aproximadamente 0,6 (regular).

O FC no ano 20 classificou o desempenho operacional entre ruim e regular. Dentre as causas está a concepção do SBA adotada neste estudo, na qual há um único conjunto elevatório operando ao longo de todo o horizonte de projeto, ao invés da implantação em etapas. Além disso, a variável de decisão x2 foi parametrizada para ser igual ou superior à vazão máxima da curva de consumo.

Essa condição fez com que as potências nominais dos motores elétricos comerciais selecionados no programa também fossem maiores.

Outro fator a contribuir para o baixo FC pode ter sido o volume do reservatório elevado (variável de decisão x3) que, sendo grande nas soluções otimizadas (próximo a 1000 m³), pode ter condicionado o sistema a desligar até o esvaziamento. Essa condição e as condições descritas anteriormente podem ter contribuído para que o tempo de bombeamento variasse entre 8 horas (FC ruim) e 18 horas (FC regular) para o último ano do horizonte de projeto.

Observa-se que, embora os SBAs analisados tenham bom desempenho operacional indicado

pelo CEEN, isto não ocorreu para o FC. Em estudos realizados Mamade et al. (2014), os autores sugeriram que outros indicadores, como o Consumo Específico de Energia (CEE) e o rendimento da bomba, não são suficientes para avaliar a eficiência energética de um determinado sistema. Assim, a análise da eficiência energética em sistemas de bombeamento deve ser feita utilizando um conjunto diversificado de indicadores.

5 CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida neste estudo simulou SBAs com bom desempenho energético, conforme indicado pelo CEEN. Embora as rotinas otimizadas não tenham sido satisfatórias em termos de uso racional da energia, conforme indicado pelo FC, isto não é uma falha do método desenvolvido, pois esse comportamento já é previsto na literatura, e irá depender principalmente do quão superdimensionado o sistema de bombeamento estará, principalmente no ano inicial. Esse superdimensionamento dependerá do projetista e do contexto/condição da elaboração do projeto. Na concepção adotada neste estudo, apenas um conjunto elevatório operou durante todo o horizonte de projeto. Para elevar o FC, é importante considerar a implantação do SBA em etapas. Aplicando-se a metodologia proposta neste estudo a um sistema implantado em etapas, é possível obter operações simuladas com melhor classificação para os dois indicadores.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da UFRGS e ao Grupo Ama-

zônico de Pesquisa em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos (SARH) da UFPA.

7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Lopes, R.M, Marques, M.G., Bassegio, P.G.M., Castiglio, G.S., Prá, M. D., Teixeira, T.d.p.; Kempka, M. **Metodologia,** Lopes, R. M, Marques, M.G., Bassegio, P.G.M., Castiglio, G.S., Prá, M. D., Teixeira, T.D.P.; Kempka, M. **Investigação,** Lopes, R. M, Marques, M.G., Bassegio, P.G.M., Castiglio, G.S., Prá, M. D., Teixeira, T.D.P.; Kempka, M. **Redação – Primeira Versão,** Lopes, R. M, Marques, M.G., Bassegio, P.G.M., Castiglio, G.S., Prá, M. D., Teixeira, T.D.P.; Kempka, M. **Redação – Revisão & Edição,** Lopes, R. M, Marques, M.G., Bassegio, P.G.M., Castiglio, G.S., Prá, M. D., Teixeira, T.D.P.; Kempka, M.; **Recursos,** Lopes, R. M.; Marques, M.G.; Dai Prá, M.

8 REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12215 - **Projeto de adutora de água Parte 1: Conduto forçado**. 1ed, 2017.
- ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, J. M.; CABRERA, JR. E.; CUBILLO, F.DUARTE, P. HIRNER, W.; MERKEL, W. PARENA, R. **Performance indicators for water supply services**. Londres: IWA, 2016.
- AZEVEDO NETTO, J.M. **Manual de Hidráulica**. 9ª ed. São Paulo: Blucher, 2015. 632 p.
- BLOCH, H.P. Problem pumps: a thing of the past. **World Pumps**. Vol. 2012, n.10, October 2012, p.34-38. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(12\)70257-2](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(12)70257-2).
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Bandeiras Tarifárias**. 2019. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>>. Acesso em 10 de janeiro de 2020.
- BRASIL. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). **Diagnóstico Anual dos Serviços de Água e Esgoto do Ano de 2013**. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2013>>. Data de acesso: 10 de janeiro de 2020.
- BRASIL. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). **Diagnóstico Anual dos Serviços de Água e Esgoto do Ano de 2014**. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>>. Data de acesso: 10 de janeiro de 2020.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). **Diagnóstico Anual dos Serviços de Água e Esgoto do Ano de 2015**. Brasília, 2017. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>>. Data do acesso: 10 de janeiro de 2020.

CAPELLI, A. **Energia elétrica. Qualidade e eficiência para aplicações industriais**. 1ª Ed. São Paulo: Érica, 2013.

CEEE. Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul. **Custos e Tarifas**. 2018. Disponível em: http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/Tarifas_A2018_35007.pdf. Acesso em 21 de fevereiro de 2019.

CEEE. Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul. **Custos e Tarifas**. 2019. Disponível em: <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1782>. Acesso em 21 de fevereiro de 2019.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V.K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**. Vol.28, n.4, 1992, p.1015-1031

ERSAR. Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos. **Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal|2016: caracterização do setor de águas e resíduos**. Vol. 1, 2016. Disponível em: http://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/sitenoticias/Documents/RASARP2016_Volume_1.pdf. Acesso em: 11 de fevereiro de 2020.

FERREIRA, J.F.H.; LOPES, R.M.; PEREIRA, J.A.R. Impacto do desempenho hidroenergético de sistema de abastecimento de água no consumo de energia elétrica em campus universitário. **Revista DAE**. Vol. 68, n. 222, Março, 2020. p.104-120. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.019>

GOMES, H.P. **Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética**. João Pessoa. Editora Universitária/UFPB, 2009. 460 p.

GOMES, P.H. G. **Geometria de dutos de escape otimizada para aplicação na cogeração da produção de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação). Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC). Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiás, 2017. 118 p.

KURITZA, J.C. **Metodologia para avaliação da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água com velocidade de rotação variável**. (Tese Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017. 160 p.

LENHS/UFRGS. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento/ Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Diagnóstico Hidroenergético Preliminar dos Sistemas de Abastecimento de Água : Prado 1, Registro, Brigada e Zona Baixa da cidade de Santana do Livramento**. Projeto Redecope, Porto Alegre-RS, abril, 2017.

LOPES, R.M.; ALVES, A.C.F.; FERREIRA, J.F.H.; MARQUES, M.G.; PEREIRA, J.A.R. Determinação da despesa com energia elétrica na lavagem de filtro rápido de estação de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Vol.25, n.1. Jan/fev 2020, p.145-155. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020176367>

MAMADE.A.; LOUREIRO D.; COVASB, D., ALEGRE H. Energy Auditing as a Tool for Improving Service Efficiency of Water Supply Systems. **Procedia Engineering**. Vol. 89, 2014.p. 557-564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.478>.

SÁ, J. H. M. **Análise do volume ideal do reservatório elevado (RE) do sistema de abastecimento de água do Setor Básico da Cidade Universitária Professor José da Silveira Netto - Belém (PA)**. (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Pará. Belém. 2012. 86 p.

SABESP (2014). **Eficiência Energética e Gestão de Energia na Sabesp**. <www2.fiescnet.com.br/web/recursos/VUVR05EZzRN-QT09> Acesso em 23 de junho de 2017.

SAHOO, T.; GUHARROY, A. Energy cost savings with centrifugal pumps. **World Pumps**.2009, p.35-p. 37. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(09\)70104-X](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(09)70104-X).

SAINT GOBAIN. **Catálogo Saint-Gobain canalização**. 2015. Disponível em: <https://www.sgpam.com.br/downloads/115/catalogos>. Acesso em 5 de janeiro de 2019.

SILVA, C.S. **Previsão multivariada da demanda de água em sistemas urbanos de abastecimento**. (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2003. 278 p.

TASSINARI, L.C.S. **Transientes hidráulicos em sistemas de bombeamento: influência do material do conduto e dispositivo de proteção**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, 2017.

TSUTIYA, M.T. **Sistema de Abastecimento de Água**. 4ª Ed. São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006a. 643 p.

TSUTIYA, M.T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006b. 185 p.

WU, W.; SIMPSON, A. R.; MAIER, H. R.; MARCHI, A. Incorporation of Variable-Speed Pumping in Multiobjective Genetic Algorithm Optimization of the Design of Water Transmission Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Vol. 138, n.5, september, 2012, p. 543-552. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000195.

WU W.; MAIER, H. R., SIMPSON, ANGUS R. Multiobjective optimization of water distribution systems accounting for economic cost, hydraulic reliability, and greenhouse gas emissions. **Water Resources Research**. Vol. 49, n. 3, march, 2013. <https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1002/wrcr.20120>.