

## XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM OPERAÇÃO INTERMITENTE**

*Rui Gabriel Modesto de Souza<sup>1</sup>; Gustavo Meirelles Lima<sup>2</sup>; Bruno Melo Brentan<sup>3</sup> & Ricardo Poley Martins Ferreira<sup>4</sup>*

#### **RESUMO**

O consumo de energia representa cerca de 90% dos custos operacionais da distribuição de água. Desta forma, ações de eficientização das estações elevatórias, como substituição de conjuntos motobombas, limpeza de adutoras e uso de inversores de frequência são comumente estudados como forma de redução de gastos. O consumo de energia está diretamente relacionado ao consumo de água, uma vez que o volume consumido necessariamente deverá ser bombeado nas estações. Entretanto, o volume de água bombeado é maior que o consumido, pois existem perdas por vazamentos. Ou seja, uma parte do volume bombeado é desperdiçada nestes pontos, e, consequentemente, parte da energia consumida poderia ser evitada. Para reduzir este problema, o controle de pressão, especialmente no período noturno, onde a pressão é elevada, é uma ferramenta eficaz, uma vez que o volume de vazamentos está diretamente relacionado a este parâmetro. Uma solução alternativa, seria operar o sistema de forma intermitente, o que faria com que durante este período de baixo consumo e altas pressões o índice de vazamentos, que normalmente seria alto, se tornasse nulo. Devido a existência de reservatórios domiciliares em grande parte das residências no Brasil, dificilmente problemas de desabastecimento ocorreriam neste período. Assim, este trabalho avaliou a eficiência hidroenergética de diferentes condições operacionais de intermitência, comparando os resultados obtidos com a operação contínua. Em ambos os casos foi feita a otimização da escolha das bombas e de sua operação a partir do uso de inversores de frequência proporcionando uma redução do custo de operação intermitente de até 26,6%.

**Palavras-Chave** – Eficiência energética; Operação intermitente; Otimização Meta-Heurística.

#### **INTRODUÇÃO**

A variação de consumo de água ao longo de um dia, manobras na operação, extensão do sistema, entre outros aspectos, fazem com que a operação de uma rede de distribuição seja uma tarefa complexa. As ações tomadas no instante atual, por melhor que sejam, podem ter reflexo negativo no futuro, caso ocorra por exemplo uma situação emergencial, como o combate a um incêndio. Este dinamismo e incertezas fazem com que a tomada de decisão seja difícil, sendo necessário então que as ações operacionais sejam tomadas com cautela (Tsakiris e Spiliotis, 2017; Chung *et al.*, 2009).

1) Engenheiro Civil e Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental (PUC MINAS). Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH – UFMG). Endereço: Avenida Antônio Carlos, 6627, Bloco 1, Sala 4619, Escola de Engenharia – UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901. Telefone (31) 3409-1882. E-mail: rui.g182@gmail.com

2) Engenheiro Hídrico e Mestre em Engenharia de Energia (UNIFEI). Doutor em Engenharia Civil e Pós-Doutor (UNICAMP). Professor da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Endereço: Avenida Antônio Carlos, 6627, Bloco 1, Sala 4613, Escola de Engenharia (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901. Telefone (31) 3409-1882. E-mail: gustavo.meirelles@ehr.ufmg.br

3) Engenheiro Civil, Mestre e Doutor em Engenharia Civil (UNICAMP). Pós-Doutor (UL) e Pós-Doutor (UFMG). Professor da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Endereço: Avenida Antônio Carlos, 6627, Bloco 1, Sala 4612, Escola de Engenharia – UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901. Telefone (31) 3409-1882. E-mail: brentan@ehr.ufmg.br

4) Engenheiro Aeronáutico (ITA). Mestre em Engenharia Mecânica e Doutor em Ciência da Computação (UFMG). Pós-Doutor (LIMOS). Professor da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Endereço: Avenida Antônio Carlos, 6627, Bloco 1, Sala 4612, Escola de Engenharia – UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901. Telefone (31) 3409-5145. E-mail: poley@demec.ufmg.br

Do ponto de vista matemático, o problema de operação de bombas e válvulas pode ser definido como a busca por uma solução que minimize os gastos operacionais – função objetivo, e que atenda à demanda dos consumidores respeitando as restrições, por exemplo, de pressão e velocidade. Por ser um problema não-linear e descontínuo, diversos estudos fazem uso de algoritmos de otimização meta-heurísticos em conjunto com simuladores hidráulicos para encontrar esta solução (Mala-Jetmarova *et al.*, 2017). Normalmente, as variáveis de decisão do problema a ser otimizado são os pontos de operação de elementos de controle do sistema, como bombas e válvulas, pelos quais é possível atuação que modifique as condições hidráulicas do sistema. Assim, as soluções geradas pelo algoritmo de otimização são repassadas ao simulador hidráulico para verificar sua viabilidade, ou seja, verificar se há ou não violação das restrições. Sahu e Gupta (2020) observam uma redução média de 10,43% nos vazamentos de água e, Brentan *et al.* (2018), uma economia energética na ordem de 50%, ambos com a operação otimizada de estações de bombeamento em conjunto com válvulas redutoras de pressão (VRPs).

O maior desafio na operação de redes de distribuição em países em desenvolvimento é reduzir a perda de água (IFC, 2013). A perda de água é dívida entre perda real, volume perdido na distribuição antes que seja entregue ao consumidor, por vazamentos e/ou extravasamentos, e, perda aparente, que corresponde ao volume entregue ao consumidor, mas não faturado, involuntariamente ou por má gestão. A perda real, objeto de estudo deste trabalho, pode ser gerenciada através do controle de pressão do sistema. Gomes e Bezerra (2012) citam três medidas para o controle de pressão, sendo eles: setorização da rede e utilização de válvulas redutoras de pressão e bombas com velocidades de rotação variáveis, sendo as duas últimas, processos elementos de controle.

Outra forma de atuar no processo operacional dos elementos de controle é limitar sua operação, ou seja, operar a rede de distribuição de forma intermitente. Andey e Kelkar (2009) destacam a redução no consumo de água ao adotar esta estratégia, não só devido ao menor número de horas de fornecimento de água, mas também por evitar a operação em períodos com altas pressões, onde os vazamentos são elevados (Al-Washali *et al.*, 2019). Como destacado por Dantas Junior (2012), a existência de reservatórios domiciliares no Brasil faz com que o consumo per capita não se altere significativamente com a operação intermitente, desde que, seja realizado com um número de horas suficiente. Entretanto, os benefícios observados ainda podem ser alcançados devido à diminuição da perda real.

A operação do sistema comumente propicia momentos em que a tubulação permanece total ou parcialmente vazia possibilitando a intrusão de patógenos – com maior frequência no suprimento intermitente – proporcionando decaimento da qualidade da água. No processo de enchimento, quando reiniciado o abastecimento, o ar contido na tubulação, quando não evacuado corretamente, cria bolsões de ar presos e comprimidos entre o líquido escoado que podem acarretar problemas como: redução da seção de escoamento (perda de carga localizada), perturbação ao sistema (golpe de aríete), redução da eficiência de bombas, vibrações e ruídos excessivos (Fuertes-Miquel *et al.*, 2019). Logo, o entendimento e execução correta do processo de enchimento do sistema, como também a implantação de dispositivos que garantam tal procedimento, como por exemplo ventosas, é demasiado importante para evitar problemas e manter o sistema hidráulicamente íntegro e seguro. Apesar disso, tal procedimento não foi avaliado neste trabalho.

Desta forma, neste trabalho é avaliada a eficiência hidroenergética da rede OBCL, uma rede *benchmark* proposta por Eliades *et al.* (2016). Tanto o consumo de energia quanto o volume de vazamentos serão considerados na obtenção da melhor solução operacional. Os resultados obtidos na operação contínua serão confrontados com diferentes níveis de intermitência, variando de 21h a 12h de operação, para identificar os reais benefícios econômicos que a operação intermitente pode gerar. Em cada um dos casos, o algoritmo de otimização *Particle Swarm Optimization* – PSO, será utilizado para selecionar as bombas mais adequadas e definir sua rotina operacional através do ajuste de suas rotações.

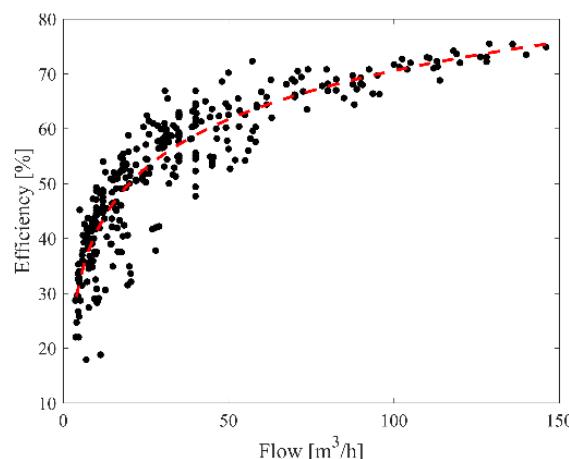
## METODOLOGIA

### Características das Bombas

Para realizar a seleção das bombas durante o processo de otimização foi utilizado o método proposto por Moller *et al.* (2020). Nele, as características de 346 bombas classificadas como A pelo INMETRO, ou seja, as bombas mais eficientes disponíveis no mercado, foram coletadas, permitindo a obtenção da Equação 1, que relaciona a eficiência da máquina  $\eta$  com sua vazão de projeto  $Q_{BEP}$ , conforme ilustra a Figura 1.

$$\eta = 12,81 \cdot \ln (Q_{BEP}) + 11,62 \quad (1)$$

Figura 1 – Relação entre rendimento e vazão de projeto das bombas Classe A



Fonte: Moller *et al.* (2020)

Para obter a curva característica de carga x vazão, consideram-se apenas a altura manométrica,  $H_{BEP}$ , e vazão,  $Q_{BEP}$ , no ponto de máximo rendimento da máquina. Com isto, o *software* utilizado, EPANET (Rossman, 2000), estabelece dois pontos adicionais: o primeiro para vazão nula, onde a carga será de 133% de  $H_{BEP}$ , e o segundo para uma vazão teórica máxima, igual ao dobro de  $Q_{BEP}$ , onde a altura seria nula. Assim, a curva característica pode ser descrita pela Equação 2, onde os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes de ajuste da curva.

$$H = a - bQ^c \quad (2)$$

### Características Hidroenergéticas

Para a avaliação hidroenergética os parâmetros de tarifa de energia e custo de produção de água são dados de entrada de grande importância na função objetivo. Para o primeiro parâmetro – tarifa de energia – que geralmente varia de acordo com o consumo horário e com a demanda, foram adotados os valores conforme Tabela 1, correspondentes aos valores da tarifa horossazonal verde (período úmido e bandeira verde) praticados pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG e, também adotado por Moller *et al.* (2020) para abrangência do local de estudo, Minas Gerais.

Tabela 1 – Valores de tarifas de energia e de demanda

Consumo – Horário fora do pico (HFP) [R\$/kWh]	0,3567
Consumo – Horário de pico (FP) [R\$/kWh]	0,5342
Demand – Horário fora do pico (HFP) [R\$/kW]	13,950
Demand – Horário de pico (HP) [R\$/kW]	43,950

De acordo com Brasil (2019) o indicador IN003 do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) revela o quanto se gasta para produzir e tratar um metro cúbico de água e esgoto faturado respectivamente. A Tabela 2 apresenta os valores de despesa total média (IN003) dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2018, segundo abrangência. De acordo com os valores apresentados na Tabela 2, o custo de produção de água apresenta grande variabilidade aos

diferentes níveis de abrangência. Desta forma, foram estudados três diferentes cenários: para os cenários 1 e 2, respectivamente, o custo adotado corresponde aos valores mínimo e máximo da variação da despesa total média do Brasil, de 0,3 R\$/m<sup>3</sup> e 7,82 R\$/m<sup>3</sup> e, para o cenário 3, o valor da despesa total média do Brasil de 3,57 R\$/m<sup>3</sup>. Desta forma, os cenários 1 e 2 correspondem aos valores extremos enquanto o cenário 3 ao valor médio, possibilitando verificar a sensibilidade do parâmetro na viabilidade da operação intermitente.

Tabela 2 – Valores de despesas totais de acordo com a abrangência

Abrangência	Variação das despesas total média (IN003) [R\$/m <sup>3</sup> ]	Despesa total média (IN003) [R\$/m <sup>3</sup> ]
Regional	1,87 a 7,61	3,96
Microrregional	1,05 a 5,53	3,48
Local	0,30 a 7,82	2,68
Brasil	0,30 a 7,82	3,57

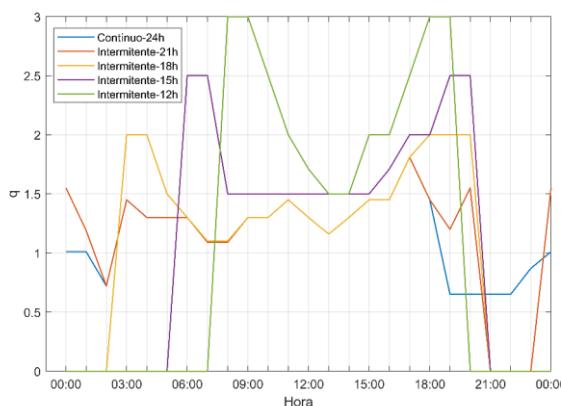
## Curva de Demanda

Em um sistema com suprimento de água contínuo a variação de consumo é expressa através da curva de demanda, onde um fator adimensional  $q$  é criado com base na Equação 3, que relaciona o consumo  $D$  no instante  $i$  com consumo médio diário  $D_m$ .

$$q = \frac{D_i}{D_m} \quad (3)$$

Como o consumo per capita na operação intermitente não deve se alterar significativamente no Brasil (Dantas Junior, 2012), este trabalho objetivou-se em avaliar a eficiência de um sistema que opere de forma intermitente nas mesmas condições de consumo da operação contínua, sendo apenas as variações no consumo de energia e volume de vazamentos variáveis do gasto operacional diário. Desta forma, novas curvas de demanda para operações intermitentes de 21h, 18h, 15h e 12h foram criadas, conforme ilustra a Figura 2. O consumo médio diário  $D_m$  foi mantido, ajustando-se o parâmetro  $q$  em cada uma das curvas. Como não há informações sobre como esta alteração na curva ocorre em um sistema intermitente, considerou-se a existência de picos significativos no momento anterior e posterior à interrupção no fornecimento de água, instantes onde espera-se que os consumidores tentem realizar algum tipo de armazenamento adicional para o período de desabastecimento.

Figura 2 – Curva de demanda para as diferentes condições operacionais



Além do consumo efetivo de água, o volume de vazamentos  $D_v$  também foi considerado. Sua modelagem foi feita de acordo com a Equação 4, característica de orifícios, onde a vazão é uma função da pressão  $p$  do local vezes o passo de tempo  $\Delta t$ . Os coeficientes do emissor,  $C$  e  $y$ , foram ajustados na operação contínua, de forma que o índice de vazamentos fosse da ordem de 20-40 %, valores comuns de operação no Brasil (Brasil, 2019).

$$Dv = C \cdot p^y \cdot \Delta t \quad (4)$$

## Operação e Seleção Otimizada

Para cada cenário operacional definido, um processo de otimização foi realizado para selecionar os pontos de operação ( $Q_{BEP}$  e  $H_{BEP}$ ) das respectivas bombas da estação elevatória e suas respectivas rotação de trabalho a cada hora ( $n_i$ ). Desta forma, para cada bomba existente no sistema serão  $t+2$  variáveis a serem otimizadas, onde  $t$  é o tempo de operação do sistema. A função objetivo ( $FO$ ) a ser avaliada é descrita pela Equação 5, e representa os custos totais operacionais. As tarifas de energia e demanda,  $te$  e  $td$ , foram retiradas do site da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG (CEMIG, 2021), enquanto o custo de produção de água,  $ta$ , foi obtido pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (Brasil, 2019) conforme descrito no item “Característica Hidroenergéticas”.

$$FO = \sum_{b=1}^{nb} \sum_{i=1}^{24} \left[ \frac{\gamma \cdot Q_i \cdot H_i}{1000 \cdot \eta_i} \cdot te_i \right] + \sum_{b=1}^{nb} P_{máx} \cdot td_i + \sum_{i=1}^{24} [Dv_i \cdot \Delta t \cdot ta] + Pen \quad (5)$$

Como restrição do problema, considerou-se apenas a pressão mínima admissível,  $p_{min}$ , valor preconizado conforme NBR 12218 como 10 m (ABNT, 1994). Assim, os casos em que ocorreram a violação neste parâmetro receberam um acréscimo de penalização,  $tp$ , à função objetivo conforme Equação 6. O valor adotado de  $\beta$  é de  $10^8$ , valor testado e verificado para desprezar rapidamente soluções com valores de pressão muito distantes do mínimo admissível.

$$Pen = \beta \cdot |p_{min} - p| \quad (6)$$

A solução do problema é feita através do algoritmo de otimização *Particle Swarm Optimization* (PSO), desenvolvido por Eberhart e Kennedy (1995). Nele, partículas representam possíveis soluções do problema (vetor com as variáveis do problema), que buscam a melhor posição dentro do grupo (valor da  $FO$ ). Desta forma, as partículas se movem livremente no espaço de busca, tendo sua velocidade como a resultante de três componentes que irão definir direção e intensidade: inércia ( $\omega$ ), coeficiente cognitivo ( $c_1$ ) e coeficiente social ( $c_2$ ). As Equações 7 e 8 representam matematicamente este processo de busca.

$$V_i^{t+1} = \omega \cdot V_i^t + c_1 \cdot \omega \cdot rand_1 \cdot \omega \cdot \frac{(x_{p_i^t} - x_i^t)}{\Delta t} + c_2 \cdot \omega \cdot rand_2 \cdot \omega \cdot \frac{(x_g - x_i^t)}{\Delta t} \quad (7)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \cdot \Delta t \quad (8)$$

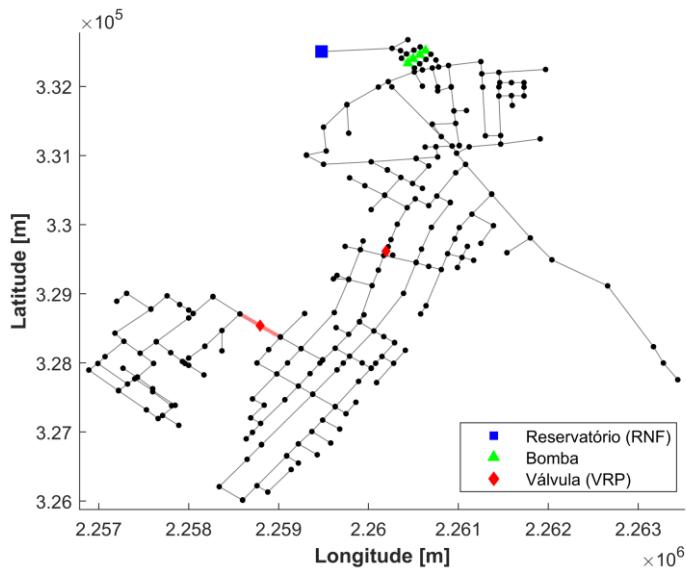
Foi adotado como 1,1 o valor de inércia ( $\omega$ ) e, 1,49 o valor de memória ( $c_1$ ) e influência social ( $c_2$ ), respectivamente, que se referem aos valores *default* implementados no *software* MATLAB®, desenvolvido pela MathWorks® e, adotado neste estudo. Os critérios de parada, para um número de partículas igual a 100, foram: um número máximo de 1000 iterações ou variação da função objetivo igual ou inferior a  $10^{-10}$  por 20 vezes seguidas.

## RESULTADOS

### Estudo de Caso

O estudo de caso é feito na rede OBCL, apresentada por Eliades *et al.* (2016) como parte de uma série de redes *benchmarking* a serem utilizadas para testes de simulações hidráulicas e ilustrada na Figura 3. Ela possui 269 nós e 294 tubos, sendo uma rede de médio porte. O abastecimento é feito por um reservatório de nível fixo, com uma estação elevatória logo em sua saída. Uma adaptação foi feita nesta estação, onde originalmente havia apenas uma bomba. A adição de outros três conjuntos, totalizando quatro, foi feita para dar maior flexibilidade operacional ao sistema, permitindo que bombas com diferentes pontos de operação fossem selecionadas para operar durante diferentes períodos do dia. Por fim, a rede ainda conta com duas válvulas redutora de pressão (VRPs). Porém sua atuação não foi considerada neste estudo, ou seja, ela permaneceu aberta durante todo o período de simulação.

Figura 3 – Esquema da rede OBCL



## Otimização

A Tabela 3 apresenta a vazão,  $Q_{BEP}$ , e a altura manométrica,  $H_{BEP}$ , no ponto de máximo rendimento das máquinas (BEP), obtidos como solução ótima para o estudo de caso. As Tabelas 4 e 5 apresentam um resumo dos principais parâmetros relativos à eficiência hidroenergética do sistema para cada cenário estudado. A Figura 4 apresenta os resultados dos custos otimizados para cada cenário, enquanto a Figura 5 compara a eficiência dos resultados do funcionamento intermitente com o contínuo.

Os resultados da Tabela 3 demonstram que na maioria dos cenários avaliados o abastecimento foi realizado apenas por um único conjunto motobomba. Tal fato se deve ao maior rendimento de conjuntos de maior potência, ou seja, maior vazão e altura manométrica. Tanto a vazão quanto a altura manométrica das bombas ( $Q_{BEP}$  e  $H_{BEP}$ ) apresentaram uma tendência de aumento conforme o aumento da intermitência, o que se justifica pela necessidade de entregar o mesmo volume de água em menos tempo.

Tabela 3 – Vazão ( $Q_{BEP}$ ) e altura manométrica ( $H_{BEP}$ ) no ponto de máximo rendimento

	Bomba B1		Bomba B2		Bomba B3		Bomba B4		
	$Q_{BEP}$ [L/s]	$H_{BEP}$ [m]							
Cenário 1	24h	293	36	-	-	25	13	252	39
	21h	-	-	-	-	-	-	380	61
	18h	-	-	-	-	-	-	391	57
	15h	-	-	-	-	-	-	407	152
	12h	-	-	-	-	-	-	459	173
Cenário 2	24h	-	-	-	-	10	13	461	41
	21h	-	-	-	-	-	-	566	48
	18h	10	67	-	-	-	-	396	61
	15h	-	-	-	-	-	-	458	118
	12h	-	-	-	-	-	-	502	145
Cenário 3	24h	468	20	10	17	-	-	326	39
	21h	-	-	-	-	-	-	333	47
	18h	42	57	-	-	-	-	428	68
	15h	-	-	-	-	-	-	435	120
	12h	-	-	-	-	-	-	453	174

A Tabela 4 apresenta um aumento, tanto da demanda de potência (kW) como do consumo energético (kWh), à medida que o número de horas de funcionamento, diminui o que proporcionou um aumento do consumo total diário de energia de 600 kWh/dia para 1800 kWh/dia, aproximadamente. Na Tabela 5, em contrapartida, o volume distribuído diariamente de 24h para 12h

reduziu aproximadamente de 20000 m<sup>3</sup> para 17000 m<sup>3</sup>. Esta redução se refere à perda real do sistema, uma vez que o consumo diário foi mantido constante, premissa adotada conforme item “Curva de demanda”. Também na Tabela 5, observam-se valores de pressão média menores entre 21h e 18h, mas bem próximos aos demais, devido ao *PSO* otimizar o ponto de operação dos conjuntos motobombas de forma a obter pressões à níveis mínimos aceitáveis e, por consequência, reduzir a parcela de custo energético na função objetivo (*FO*). Os parâmetros energéticos e hidráulicos, apresentados na Tabela 4 e 5 são analisados na função objetivo (*FO*) a seguir, e, de acordo com as Figuras 4 e 5.

Tabela 4 – Parâmetros energéticos da operação:

a) Cenário 1; b) Cenário 2; c) Cenário 3

	24h	21h	18h	15h	12h
Demanda-HP [kW]	35	37	57	67	211
Consumo-HP [kWh]	92	95	161	180	416
Demanda-HFP [kW]	29	35	76	182	261
Consumo-HFP [kWh]	489	439	561	1063	1272
Consumo total [kWh/dia]	581	535	722	1243	1689

(a)

	24h	21h	18h	15h	12h
Demanda-HP [kW]	41	46	56	71	199
Consumo-HP [kWh]	97	116	144	181	417
Demanda-HFP [kW]	32	49	76	180	258
Consumo-HFP [kWh]	512	593	577	1046	1250
Consumo total [kWh/dia]	608	710	721	1227	1668

(b)

	24h	21h	18h	15h	12h
Demanda-HP [kW]	36	36	55	70	211
Consumo-HP [kWh]	94	88	151	173	416
Demanda-HFP [kW]	40	38	77	180	262
Consumo-HFP [kWh]	463	430	636	1080	1410
Consumo total [kWh/dia]	556	518	788	1253	1825

(c)

Tabela 5 – Parâmetros hidráulicos da operação: a)

a) Cenário 1; b) Cenário 2; c) Cenário 3

	24h	21h	18h	15h	12h
Pressão média [m]	82	76	76	84	85
Distribuição diária [m <sup>3</sup> ]	20171	19214	18532	18063	17346
Consumo diário [m <sup>3</sup> ]	14270	14270	14270	14270	14270
Perda real [m <sup>3</sup> ]	5900	4944	4262	3793	3076

(a)

	24h	21h	18h	15h	12h
Pressão média [m]	80	76	75	82	84
Distribuição diária [m <sup>3</sup> ]	20068	19210	18500	17999	17329
Consumo diário [m <sup>3</sup> ]	14270	14270	14270	14270	14270
Perda real [m <sup>3</sup> ]	5798	4940	4230	3729	3059

(b)

	24h	21h	18h	15h	12h
Pressão média [m]	81	76	76	81	81
Distribuição diária [m <sup>3</sup> ]	20108	19214	18543	17998	17203
Consumo diário [m <sup>3</sup> ]	14270	14270	14270	14270	14270
Perda real [m <sup>3</sup> ]	5837	4943	4273	3728	2933

(c)

Na Figura 4 é notada uma redução do custo total de operação – soma do custo energético e de perda – com o funcionamento intermitente para todos os 3 cenários. Para o cenário 1 a redução só aconteceu com a redução da operação em um único nível, de 24h para 21h, enquanto, os cenários 2 e 3, tiveram valores menores em todos os níveis, em exceção à operação de 12h para o cenário 3. O menor custo de operação foi alcançado com a operação intermitente de 21h para o cenário 1 e de 15h para os cenários 2 e 3. Em comparação com a operação contínua, a redução dos custos operacionais na melhor solução foi de 11,3%, 26,6%, 17,7% para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente (Figura 5a).

O custo energético para operação intermitente apresentou aumento significativo, superiores a 400% para 12h de operação, com exceção da operação com 21h dos cenários 1 e 3, em que houve uma redução dos gastos de 7,8% e 14,5%, respectivamente (Figura 5b). A melhoria da operação com 21h dos cenários 1 e 3 deve-se à redução do índice de perdas – de 29,0% para 25,7% – o que reduziu o volume a ser bombeado sem um significativo aumento nas perdas de carga devido ao deslocamento da demanda de água em um menor período de tempo. Em todos os outros casos, mesmo com uma redução do índice de perdas de aproximadamente 29,0% para 17,0%, que representa uma redução de 3000 m<sup>3</sup> diário, a necessidade de se recalcar o mesmo volume diário eleva progressivamente as velocidades de escoamento à medida que o período de funcionamento diminui, resultando em perdas de cargas excessivas no sistema. Uma maneira de contornar esse problema e, contribuir economicamente para a operação intermitente, mas não contemplado no presente estudo, é através da substituição de tubulações principais do sistema a fim de reduzir uma parcela das perdas de carga excessivas.

As perdas demonstram proporções lineares de redução (Figura 5c) à medida que o período de funcionamento diminui, semelhante para todos os cenários estudados. A redução deve-se à contribuição contínua nas perdas por vazamento na operação contínua, enquanto o funcionamento intermitente pausa sua operação por um determinado período que, por consequência, proporcionam perdas em um período de funcionamento menor e nula no restante do tempo.

Figura 4 – Resultados: a) Cenário 1; b) Cenário 2; c) Cenário 3

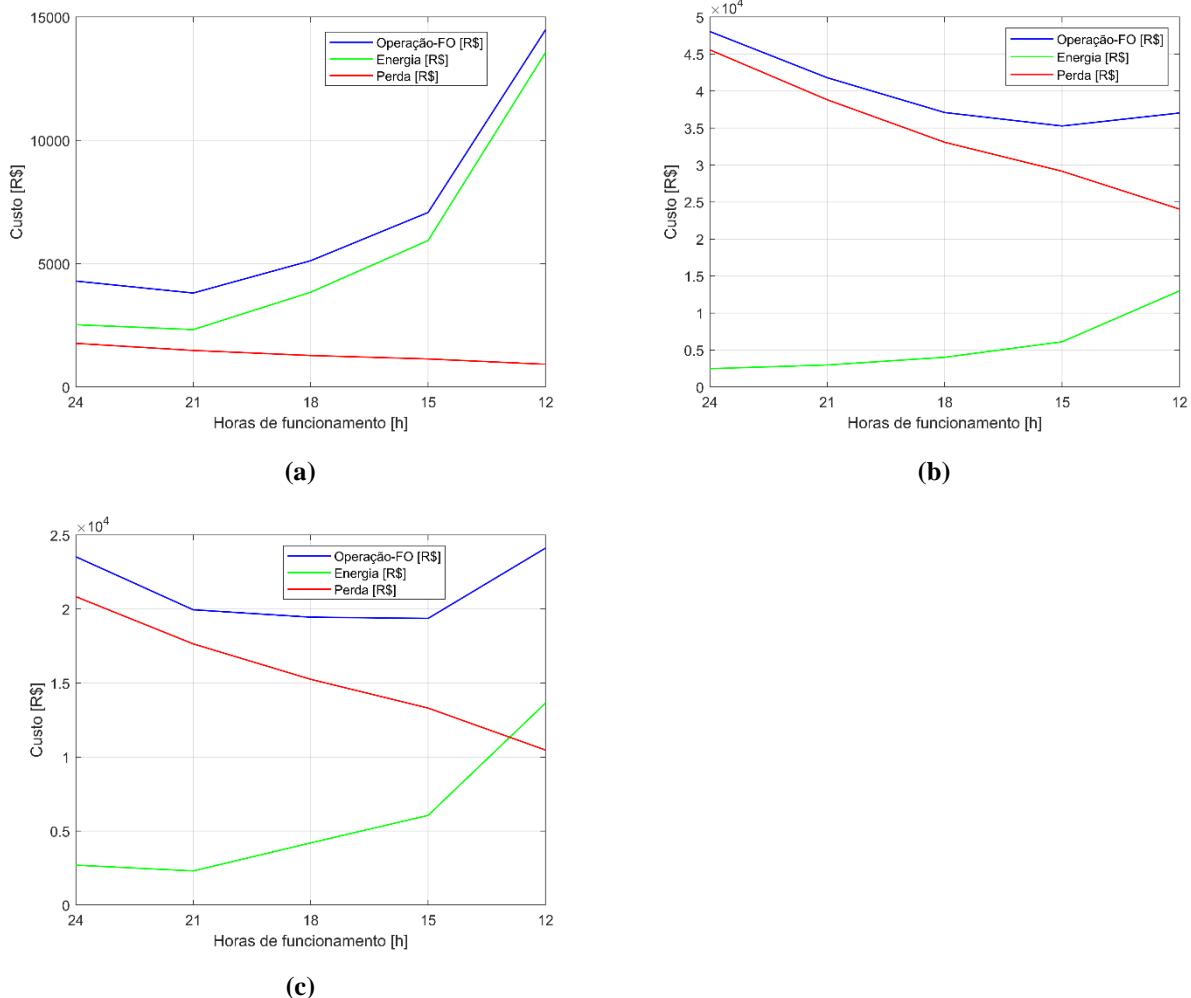
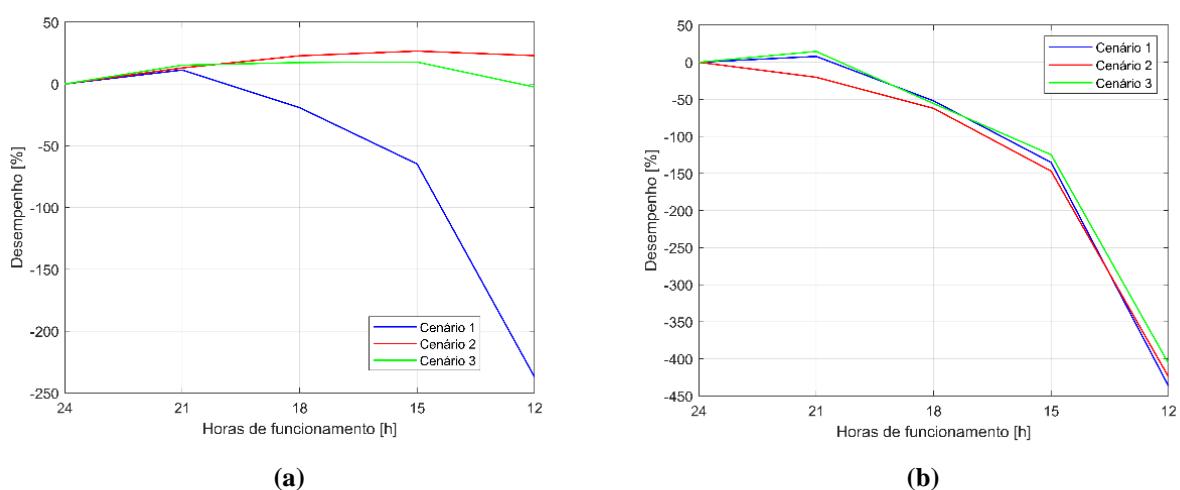
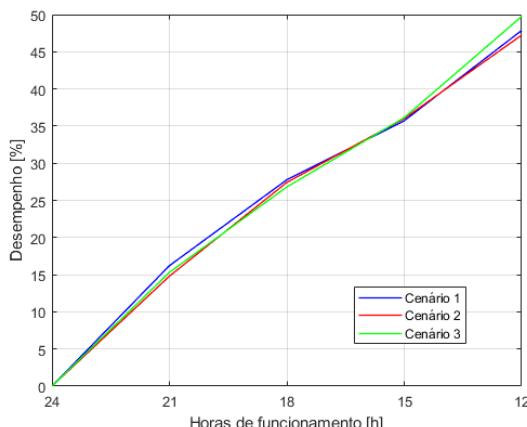


Figura 5 – Variação dos parâmetros operacionais em cada cenário estudado em relação à operação contínua: a) Custo operacional 1; b) Custo de energia; c) Perdas





(c)

## CONCLUSÕES

Os resultados demonstram, do ponto de vista hidroenergético, que a operação intermitente se faz viável economicamente. O procedimento da escolha adequada de bombas e, consequentemente, operação otimizada, é necessário para garantir fornecimento de água adequado para todos os usuários conectados ao sistema, principalmente aqueles em pontos de topografia desfavoráveis (alta elevação) ou regiões distantes dos centros de distribuição onde os valores mínimos de pressões podem não ser atendidos ou ainda, quando o volume diário de água é limitado.

Em termos gerais, a operação intermitente proporcionou melhorias tanto no consumo de energia quanto no índice de perdas, com redução do custo de operação do sistema em 11,3% com 21h de funcionamento para o cenário 1, 26,6% e 17,7% com 15h de funcionamento para os cenários 2 e 3, respectivamente, sendo mais viável economicamente em regiões com custo de produção de água elevado (cenário 2), à exemplos, em situações de escassez e/ou recurso hídrico limitado. Cabe ressaltar, que os resultados absolutos ainda podem melhorar, entretanto carece de estudo detalhado, visto que o excessivo aumento do consumo de energia, na ordem de 400% para 12h de funcionamento, pode ser contornado com substituições parciais/lokais de tubulações principais do sistema. Além disso, também não foi considerada a redução no consumo per capita devido à intermitência, conforme observado no estudo de Andey e Kelkar (2009).

Assim, a adoção do regime intermitente poderá ser uma estratégia de grande valia para sistemas que apresentem incapacidades, seja por recurso hídrico, elevadas perdas ou por problemas financeiros, para auxílio na racionalização de água, econômica, social e de ativos. Entretanto, apesar de resultados promissores, novos estudos devem ser realizados para responder questões sobre a segurança do sistema quanto a qualidade da água, devido à ausência de proteção natural à entrada de patógenos no sistema, garantida na operação contínua e, proteção à infraestrutura, devido às altas velocidades que podem proporcionar ruídos excessivos e perturbações (golpe de aríete) ao sistema. Ou seja, é necessária a estruturação de regras operacionais que visem proteger e/ou minimizar os riscos à segurança do sistema do ponto de vista físico (infraestrutura) e químico (qualidade).

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 12218. “Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público”*, Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

- Al-Washali, T., Sharma, S., Al-Nozaily, F., Haidera, M., & Kennedy, M. (2019). *“Modelling the leakage rate and reduction using minimum night flow analysis in an intermittent supply system”*. Water, 11(1), 48.
- Andey, S. P. & Kelkar, P. S. (2009). *“Influence of intermittent and continuous modes of water supply on domestic water consumption”*. Water Resources Management, 23(12), pp. 2555-2566.
- Brasil (2019). Ministério de Desenvolvimento Regional. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). *“Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2018”*. Brasília, 2019. 186 p.
- Brentan, B. M.; Meirelles, G.; Luvizotto JR, E.; Izquierdo, J. *“Joint Operation of Pressure-Reducing Valves and Pumps for Improving the Efficiency of Water Distribution Systems”*. J. Water Resour. Plann. Manage., v. 144, n. 9, 12 p., Sep. 2018.
- Chung, G., Lansey, K. & Bayraksan, G. (2009). *“Reliable water supply system design under uncertainty”*. Environmental Modelling & Software, 24(4), pp. 449-462.
- Dantas Junior, P. C. (2012). *“Impacto do abastecimento irregular de água nos altos índices de dengue”*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). *“Particle swarm optimization”* In Proceedings of the IEEE international conference on neural networks, Citeseer, Washington, DC, Nov. 200, 4, pp. 1942-1948.
- Eliades, D. G., Kyriakou, M., Vrachimis, S. & Polycarpou, M. M. (2016). *“EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB”* In Proc. 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI) (Vol. 8).
- Fuertes-miquel, V. S.; Coronado-Hernández, O. E.; Mora-Meliá, D.; Iglesias-Rey, P. L. *“Hydraulic modeling during filling and emptying processes in pressurized pipelines: a literature review”*. Urban Water Journal, v. 16, n. 4, p. 299-311, Sep. 2019.
- Gomes, H. P.; Bezerra, S. T. M. *“Ações de eficiência energética”*, in *Manual de Sistema de Bombeamento: Eficiência energética*. Org. Gomes, H. P.; Carvalho, P. S. O. de. Editora Universitária -UFP, João Pessoa – PB, 1<sup>a</sup> ed., pp. 129-140.
- International Finance Corporation (IFC). World Bank Group. *“Manual sobre Contratos de Performance e Eficiência para Empresas de Saneamento em Brasil”*. Elaborado por GO Associados, 2013, 68 p.
- Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N. & Savic, D. (2017). *“Lost in optimization of water distribution systems? A literature review of system operation”*. Environmental modelling & software, 93, pp. 209-254.
- Móller, D. S., Lima, G. M., Brentan, B. M. & Barros, D. B. (2020). *“Seleção otimizada de bombas para operação com rotação variável em redes de distribuição de água”*. RBRH, v. 25. 10 p.
- Rossman, L. A. (2000). *“EPANET 2. User’s manual”*. US Environmental Protection Agency (EPA), USA. 200 p.
- Sahu, R. C; Gupta, A. *“Genetic Algorithm based Pressure Management Technique for Leakage reduction in the water Distribution System”* in 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), Thoothukudi, India, 2020, pp. 1464-1470
- Totsuka, N., Trifunovic, N. & Vairavamoorthy, K. (2004). *“Intermittent urban water supply under water starving situations”* In: WEDC International Conference, 30th, Vientiane. Anais... Vientiane: WEDC Loughborough University, 2004. p. 505-512.
- Tsakiris, G. & Spiliotis, M. (2017). *“Uncertainty in the analysis of urban water supply and distribution systems”*. Journal of Hydroinformatics, 19(6), 823-837.