

ESTIMATIVA EXPEDITA DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM ENTRADA DE RESERVATÓRIO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Kamel Zahed Filho⁽¹⁾

Engenheiro da Divisão de Planejamento, Gestão e Desenvolvimento Operacional da Produção – MAGG – Unidade de Negócio de Produção de Água – MA - Sabesp – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Viviana Marli Nogueira de Aquino Borges⁽²⁾

Gerente da Divisão de Planejamento, Gestão e Desenvolvimento Operacional da Produção – MAGG – Unidade de Negócio de Produção de Água – MA - Sabesp – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Endereço ⁽¹⁾ Rua Costa Carvalho, 300, Pinheiros, São Paulo, São Paulo CEP 05409-010 Brasil. Tel. +55(11) 3388-8899 e-mail - kamelzf@sabesp.com.br

RESUMO

Os sistemas de abastecimento de água consomem muita energia nos processos envolvidos, desde a captação até a distribuição de água aos consumidores. A redução dos consumos e das despesas com energia elétrica tem um impacto direto sobre as tarifas de cobrança pelo serviço de abastecimento de água. Uma das maneiras de redução do consumo de energia, discutida no artigo, é a recuperação da energia na chegada da água tratada com elevadas pressões em reservatórios setoriais de distribuição de água. Pode ser obtida por Usinas de Recuperação de Energia (URE), compostas por turbinas ou Bombas Funcionando como Turbinas (BFT). É apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre as aplicações em sistemas de abastecimento de água. Com base nos resultados de um modelo de simulação de URE em reservatórios do Sistema Adutor (SAM) da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), foram desenvolvidas equações empíricas para as estimativas das potências e energias possíveis de serem geradas. Os resultados mostraram ser possível a aplicação do método proposto para uma estimativa expedita, em análise de viabilidade de implantação de URE em novos reservatórios.

PALAVRAS-CHAVE: recuperação de energia, energia distribuída, abastecimento de água.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água consomem muita energia nos processos envolvidos, desde a captação até a distribuição de água aos consumidores. Os gastos com energia elétrica representam a segunda maior despesa, após a mão de obra (Sabesp, 2020). “Em 2019, as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento participantes do SNIS atingem R\$ 7,12 bilhões, com consumo de 13,26 TWh, compostos por 11,84 TWh (2,45% do consumo do Brasil – EPE) com abastecimento de água e 1,42 TWh com esgotamento sanitário” (BRASIL, Ministério do Desenvolvimento Regional, 2019). Segundo dados da EPE (EPE,2020), isto corresponde a 2,45% do consumo de energia elétrica do Brasil. Segundo MIRANDA (2016), com dados de 2014, os serviços de abastecimento de água consumiam 2% da energia elétrica consumida no Brasil.

A redução dos consumos e das despesas com energia elétrica tem um impacto direto sobre as tarifas de cobrança pelo serviço de abastecimento de água, mas também indiretamente sobre outras cadeias de produção. Uma redução nos gastos de energia pode retardar ou reduzir os investimentos necessários em ampliações ou construções de novas usinas hidrelétricas.

Várias ações podem ser tomadas para a redução dos consumos de energia como: a renovação dos ativos ligados aos consumos de energia; troca de conjuntos motobombas; substituição de tubulações por outras que gerem menos perdas de carga; alteração de processos, como modificação do processamento de tratamento da água e de esgotos; e redução de perdas de água, que indiretamente provoca uma redução nos custos operacionais. Uma forma complementar, mas que não dispensa as anteriores citadas, é a recuperação da energia em locais específicos do sistema de abastecimento de água. Como exemplo, pode-se citar: a chegada da água bruta com elevadas pressões em Estações de Tratamento de Água (ETA); a chegada da água tratada com elevadas pressões em Reservatórios Setoriais de Distribuição de Água (RES); e em pontos da rede de distribuição onde se encontram as Válvulas Redutoras de Pressão (VRP).

A recuperação de energia pode ser obtida por Usinas de Recuperação de Energia (URE). Estas usinas, em geral de pequeno porte, podem conter turbinas ou Bombas Funcionando como Turbinas (BFT). As turbinas possuem um rendimento energético superior e permitem um melhor controle da vazão conduzida. Entretanto, podem ser mais caras e exigem uma manutenção mais específica, que encontra dificuldades em empresas de saneamento que não possuem equipes especializadas. As BFTs, basicamente, são bombas que operam em sentido oposto àquele para o qual foram dimensionadas. Em geral, possuem rendimento inferior às turbinas e não possuem um controle de vazão. Do ponto de vista da instalação, as turbinas vêm ganhando maior utilização, com a adoção de equipamentos que são inseridos na própria tubulação, evitando a necessidade de espaços maiores. A escolha entre uma solução e outra depende de uma análise de viabilidade e das condições técnicas disponíveis para sua manutenção.

A recuperação de energia com a instalação de UREs é feita em vários sistemas hídricos como sistemas de abastecimento de água, sistemas de irrigação, em estações de tratamento de águas residuárias e em sistemas de drenagem pluvial (SAMORA, 2016). O foco deste trabalho será a recuperação de energia nas chegadas aos reservatórios setoriais de distribuição de água tratada.

O tema de URE é largamente discutido na literatura. Encontram-se diversos estudos sobre as BFT, pela dificuldade de se transformar as curvas características e de performance das bombas quando elas operam de forma invertida. Pode-se citar autores que fizeram ensaios em laboratórios, modelagem matemática (CFD – Computational Fluid Dynamic Modelling), ensaios “*in situ*” e deduções teóricas. Para uma leitura complementar sugere-se: AGARWAL (2012), ALATORRE-FRENK (1994), ALVES (2010), BOGDANOVIC-JOVANOVIC et al. (2014), CHAPALLAZ et al. (1992), COUZINET et al. (2013), FROSINA et al. (2017), GARAD et al. (2018), KITTREDGE (1961), KRAMER et al. (2018), LIMA (2013) e VIANA e NOGUEIRA (2002). Outros autores apresentam estudos de otimização da operação das BFT ou estudos de viabilidade de implantação, tais como: ALATORRE-FRENK (1994), GATTULLI et al. (2018), MONTEIRO et al. (2016), PÉREZ-SÁNCHEZ et al. (2017) e TELCI e ARAL (2018).

A utilização de URE em sistemas de abastecimento de água, já é reportada em vários países como: Alemanha (McNABOLA et al., 2014), Austrália (GRAY, 2017), Áustria (KOUGIAS et al., 2014; KUCUKALI, 2011), Brasil (McNABOLA et al., 2014; LIMA, 2013; SILVA et al., 2016), Canadá (McNABOLA et al., 2014), China (CASINI, 2015), Escócia (McNABOLA et al., 2014), Estados Unidos (CASINI, 2015), Grécia (FRIJNS, 2014; KOUGIAS, 2014), Irlanda (CORCORAN et al., 2012; McNABOLA et al., 2014), Itália (KOUGIAS, 2014; KUCUKALI, 2011; McNABOLA et al., 2014), Portugal (McNABOLA et al., 2014; MONTEIRO et al., 2016)), Reino Unido (McNABOLA et al., 2014), Suíça (KOUGIAS, 2014; KUCUKALI, 2011) e Turquia (KARADIREK et al., 2016; KUCUKALI, 2011).

Embora a recuperação de energia em sistemas de abastecimento de água possa não representar um ganho expressivo nas despesas de uma empresa de saneamento, existe o compromisso de que uma empresa da área ambiental faça todos os esforços em direção à sustentabilidade.

Para se avaliar o potencial de recuperação no Sistema Adutor Metropolitano (SAM) da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), desenvolveu-se uma metodologia que, através de um modelo de simulação, permite estimar a energia que pode ser recuperada nas entradas dos reservatórios setoriais de distribuição de água tratada.

O SAM abrange uma área de 8.051km² e possui 155 centros de reservação setorial. Como a topografia da RMSP é bastante acidentada, ocorrem altas pressões nas entradas de vários reservatórios. Os reservatórios com potencial de recuperação de energia foram simulados e obteve-se para cada um deles, uma possível potência de projeto a ser definida para uma URE a ser instalada no local e a energia gerada anualmente.

A possibilidade de recuperar energia em reservatórios novos, que ainda não possuem dados para uma simulação como aquela que foi feita para os reservatórios do SAM, levou a uma investigação empírica que pudesse resultar em uma estimativa, ainda que expedita, do potencial de geração nesses locais. Desta forma, os novos projetos de reservatórios setoriais de distribuição de água tratada poderiam considerar este aspecto energético e prever um arranjo apropriado para a URE e para a válvula de controle complementar.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar equações empíricas para cálculo da potência de projeto e da energia produzida esperada de uma usina de recuperação de energia na entrada de reservatório setorial de distribuição de água.

DADOS UTILIZADOS

Foram utilizados os resultados do diagnóstico de potencial de recuperação de energia nas entradas dos reservatórios do SAM, obtidos através de simulação da operação das válvulas de controle associadas às UREs. Estas simulações foram efetuadas com base em informações cadastrais dos reservatórios, válvulas de controle e medidores de pressão, da base georreferenciada do SAM (Sistema SIGNOS – sistema de informações geográficas da Sabesp) e dos dados operacionais (vazões de adução, consumos setoriais, pressões, níveis de armazenamento nos reservatórios) obtidos da base histórica do SCOA, que é o sistema de controle da operação do SAM.

Nesse diagnóstico foram simuladas as operações de 86 válvulas de controle existentes nas entradas de reservatórios. Para a análise aqui apresentada, foram selecionados 71 reservatórios, cujos dados da base histórica eram mais completos e confiáveis.

METODOLOGIA UTILIZADA

O diagnóstico do potencial de recuperação de energia nas entradas dos reservatórios foi apoiado em um modelo de simulação da operação conjunta de uma URE e da válvula de controle existente na entrada do reservatório.

O modelo de simulação foi desenvolvido em VBA – Excel, com interface automática com a base de dados do SCOA (Modelo GERA). A regra básica da operação consiste em manter uma faixa de vazão na turbina entre 80% e 120% da vazão de projeto. Quando a vazão de entrada no reservatório é inferior a 80% da vazão de projeto da turbina, a vazão turbinada é zero. Quando a vazão de entrada é maior do que a vazão de projeto, a vazão turbinada é limitada a 120% da vazão de projeto; acima deste valor, a vazão de entrada é complementada por uma válvula de controle auxiliar. Foi utilizada uma curva de eficiência simplificada, em que no melhor ponto de eficiência (vazão de projeto), o rendimento é admitido como um. Para casos reais, pode-se utilizar uma curva de eficiência fornecida pelo fabricante.

Foram simulados os intervalos horários de um ano, com dez cenários de vazões de projeto, variando entre 15% do consumo médio e 150% do consumo médio, para se obter a vazão de projeto com melhor retorno de energia gerada anualmente.

Para cada local simulado, foi criado um gráfico com a potência média gerada e a energia produzida em um ano, em função da vazão de projeto da turbina. Para o ponto de máxima energia produzida, foi calculada a potência média gerada, a energia anual produzida, o número de horas de funcionamento por ano, um gráfico com o número médio de horas de funcionamento e a potência média gerada ao longo das 24 horas e curvas de duração (curva de frequências acumuladas) das potências médias geradas. e das vazões turbinadas.

A potência gerada em uma URE é dada pela equação 1.

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / 1000 \quad \text{equação (1)}$$

Onde: **P** = potência gerada (kW);

η = rendimento (adimensional, variável de 0 a 1);

ρ = massa específica da água (t.m^{-3});

g = aceleração da gravidade (m.s^{-2});

Q = vazão veiculada pela URE (L.s^{-1});

H = altura útil de queda (diferença de energia entre a entrada e a saída da URE) (m);

1000 = fator de conversão de W para kW.

A energia gerada no modelo de simulação foi obtida pela integração das potências calculadas a cada instante de cálculo pelo tempo da simulação.

No modelo de simulação, os valores de Q e H são variáveis ao longo do período simulado, de acordo com as regras de operação do reservatório. Para se criar uma equação simples, para uma estimativa expedita da potência e da energia, os valores instantâneos foram substituídos por valores médios. Assim, a potência estimada pode ser calculada pela equação 2, onde a vazão turbinada foi substituída pelo consumo médio do setor e a altura útil média foi calculada de forma simplificada, pela equação 3.

$$\mathbf{Pot_{est} = K \cdot \rho \cdot g \cdot Cons_{med} \cdot H\acute{U}til_{med}} \quad \text{equação (2)}$$

Onde: **Pot_{est}** = Potência estimada (kW);

K = coeficiente de ajuste, obtido por regressão (adimensional);

ρ = massa específica da água ($t \cdot m^{-3}$);

g = aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$);

Cons_{med} = consumo médio do setor, no período simulado ($L \cdot s^{-1}$);

H_{útil_{med}} = altura útil de queda média (m);

$$\mathbf{H\acute{U}til_{med} = P_{med} + CotaPres - NA_{med} - CotaFundo} \quad \text{equação (3)}$$

Onde: **H_{útil_{med}}** = Altura útil de queda média (m);

P_{med} = Pressão média a montante da máquina geradora, durante o período da simulação (m);

CotaPres = Elevação do secundário do medidor de pressão, a montante da máquina geradora (m);

NA_{med} = Nível de água médio no interior do reservatório, em relação à laje de fundo (m);

CotaFundo = Elevação da laje de fundo do reservatório (m).

O nível médio da água no interior do reservatório (**NA_{med}**) foi substituído pela média aritmética entre o limite máximo operacional e o nível mínimo operacional. O rendimento não foi considerado na análise, porque foi incorporado ao coeficiente de regressão. A energia gerada anualmente foi calculada de forma simplificada, multiplicando-se a potência média obtida da análise de regressão por um número médio de horas de funcionamento da máquina geradora ao longo do ano. Esse número médio foi ajustado por regressão, de forma a otimizar o ajuste entre as energias calculadas pelo GERA e pela equação empírica 4.

$$\mathbf{Energ_{est} = Pot_{est} * NF} \quad \text{equação (4)}$$

Onde: **Energ_{est}** = Energia anual gerada estimada (kWh/ano);

Pot_{est} = Potência estimada pela equação 2 (kW);

NF = Coeficiente de ajuste por regressão (h).

Uma outra análise foi efetuada, procurando-se simplificar ainda mais as equações de estimativas de potências e de energia gerada. Na sequência, substituiu-se a altura média de queda (**H_{útil_{med}}**) pela pressão média (**P_{med}**). A intenção desta simplificação foi facilitar a aplicação do método, quando ainda não se tem as cotas do medidor de pressão, o nível médio operacional e a cota do fundo do reservatório na fase de concepção do reservatório. As equações 2 e 4 foram preservadas, mas os coeficientes de ajustes K e NF foram modificados.

RESULTADOS OBTIDOS

A equação obtida para a estimativa da potência média gerada, baseada na altura útil de queda média está apresentada na equação 5.

$$\mathbf{Pot_{est} = 0,9115 * 9,8 * Cons_{med} * H\acute{U}til_{med} / 1000} \quad \text{equação (5)}$$

Onde: **Pot_{est}** = Potência média estimada (kW);

0,9115 = Coeficiente de melhor ajuste (adimensional);

9,8 = Aceleração da gravidade (m/s^2);

$Cons_{med}$ = Consumo médio anual do setor (l/s);
 $H_{Útil,med}$ = Altura útil de queda média (m);
 1000 = Fator de conversão de W para kW.

Para se verificar o ajuste obtido com os valores simulados no GERA, os valores calculados pela equação 5 e aqueles obtidos pelo modelo de simulação (GERA) estão comparados na Figura 1.

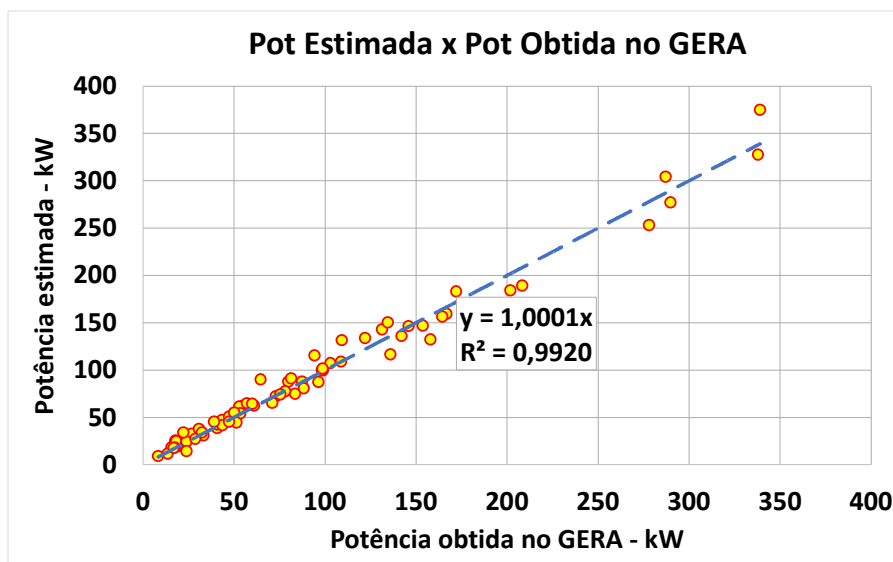


Figura 1: Relações entre as potências calculadas pela equação 5 e as obtidas pelo modelo GERA.

Observa-se que a correlação obtida foi bastante alta e que a equação obtida possui um coeficiente de regressão praticamente igual à unidade. Para se observar com maior nitidez as diferenças entre os valores estimados e obtidos no GERA, a Figura 2 apresenta as diferenças percentuais.

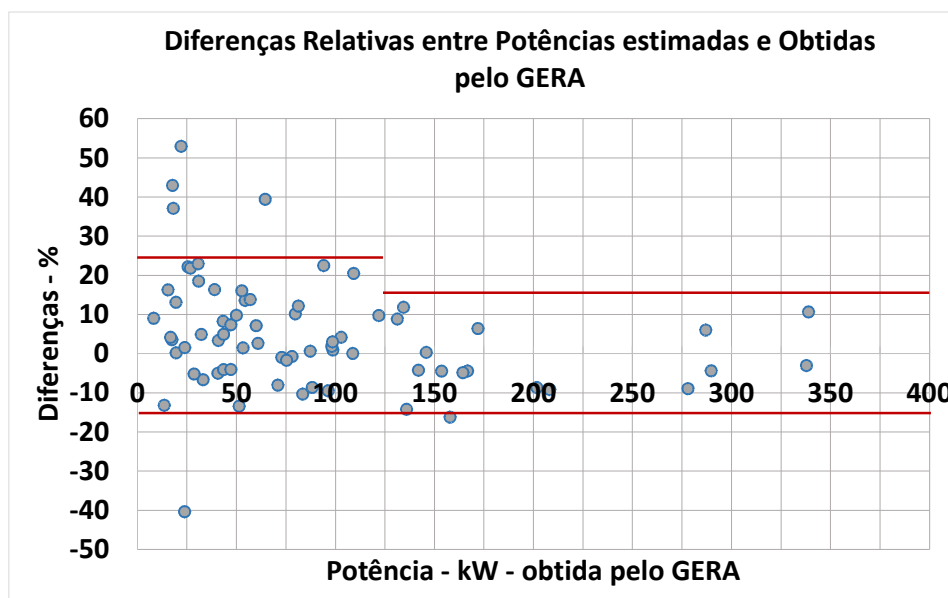


Figura 2: Diferenças percentuais entre as potências calculadas pela equação 5 e as obtidas pelo modelo GERA.

As diferenças relativas variam entre -15% e 25%, para potências inferiores a 125kW e entre -15% e 15%, para potências superiores a 125kW.

A estimativa da energia gerada por ano foi obtida pelo produto da potência estimada por um fator de ajuste que representaria o número de horas de funcionamento anual.

A energia estimada pode ser obtida pela equação 6. O valor do coeficiente de ajuste foi obtido de forma a obter o coeficiente de regressão da Figura 3, o mais próximo de 1. Observa-se também, que a correlação obtida foi muito alta.

$$\mathbf{Energ_{est} = 6142 * Pot_{est} / 1000} \quad \text{equação (6)}$$

Onde: **Energ_{est}** = energia anual de geração, estimada (MWh/ano);

Pot_{est} = Potência média estimada (kW);

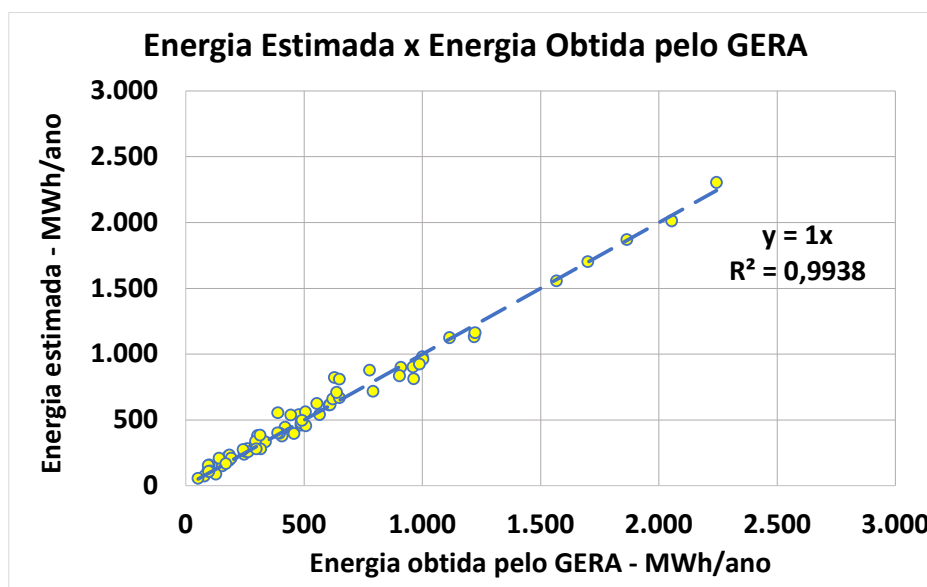


Figura 3: Relações entre as energias calculadas pela equação 6 e as obtidas pelo modelo GERA

As diferenças relativas entre as energias anuais estimadas e as obtidas pelo GERA são apresentadas no gráfico da Figura 4. Apresentam uma variação entre -15% e +30%, para energias anuais inferiores a 750MWh/ano e entre -10% e +20%, para as energias superiores a 750MWh/ano.

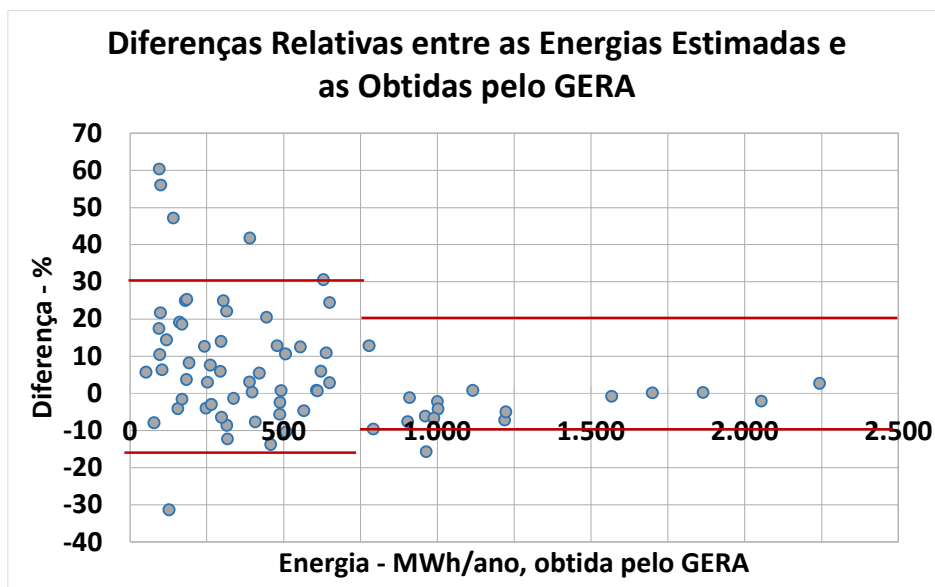


Figura 4: Diferenças percentuais entre as energias calculadas pela equação 6 e as obtidas pelo modelo GERA.

Para simplificar ainda mais a aplicação, substituiu-se a altura útil média, pela pressão média observada ao longo do período de simulação. Obteve-se as equações 7 e 8 para as estimativas da potência média gerada e da energia gerada por ano, respectivamente.

$$\mathbf{Pot_{est,p} = 1,058 * 9,8 * Cons_{med} * P_{med} / 1000} \quad \text{equação (7)}$$

Onde: $\mathbf{Pot_{est,p}}$ = Potência média estimada, a partir da pressão média (kW);

$\mathbf{1,058}$ = Coeficiente de melhor ajuste (adimensional);

$\mathbf{9,8}$ = Aceleração da gravidade (m/s²);

$\mathbf{Cons_{med}}$ = Consumo médio anual do setor (l/s);

$\mathbf{P_{med}}$ = Pressão média (m);

$\mathbf{1000}$ = Fator de conversão de W para kW.

$$\mathbf{Energ_{est,p} = 6141 * Pot_{est} / 1000} \quad \text{equação (8)}$$

Onde: $\mathbf{Energ_{est,p}}$ = energia anual de geração, estimada a partir da pressão média (MWh/ano);

$\mathbf{Pot_{est}}$ = Potência média estimada (kW);

Os gráficos das Figuras 5 e 6 mostram o bom ajuste entre as potências e energias calculadas pelas equações 7 e 8 e os resultados do modelo de simulação GERA.

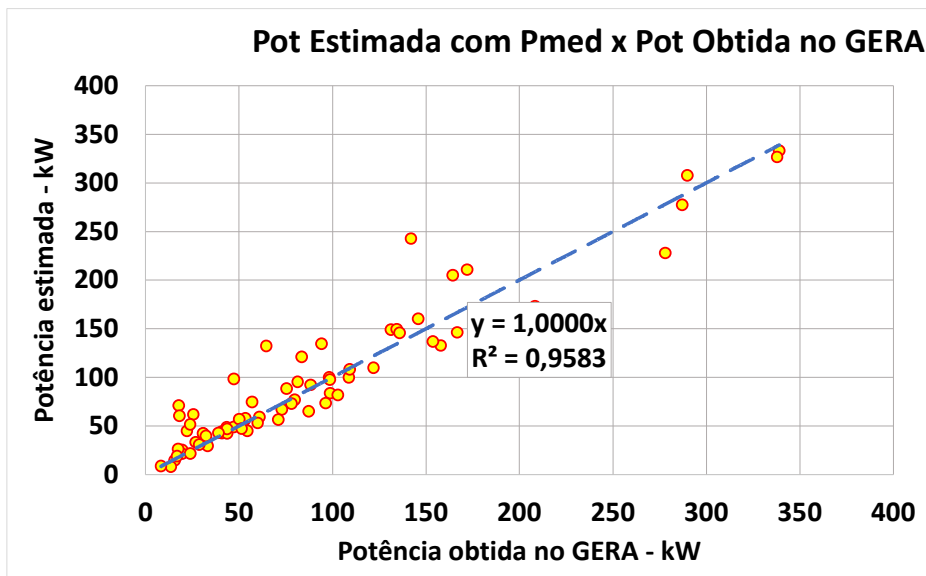


Figura 5: Relações entre as potências calculadas pela equação 7 e as obtidas pelo modelo GERA.

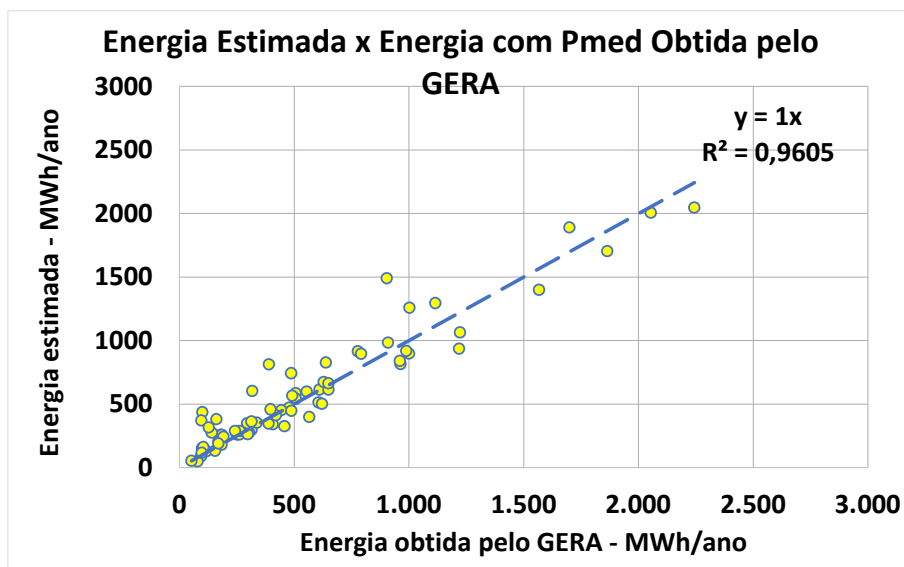


Figura 6: Relações entre as energias calculadas pela equação 8 e as obtidas pelo modelo GERA

De maneira análoga, ao que foi efetuado na primeira análise, as Figuras 7 e 8 mostram as diferenças percentuais entre as potências e as energias calculadas pelas equações 7 e 8 e os resultados obtidos pelo modelo de simulação GERA.

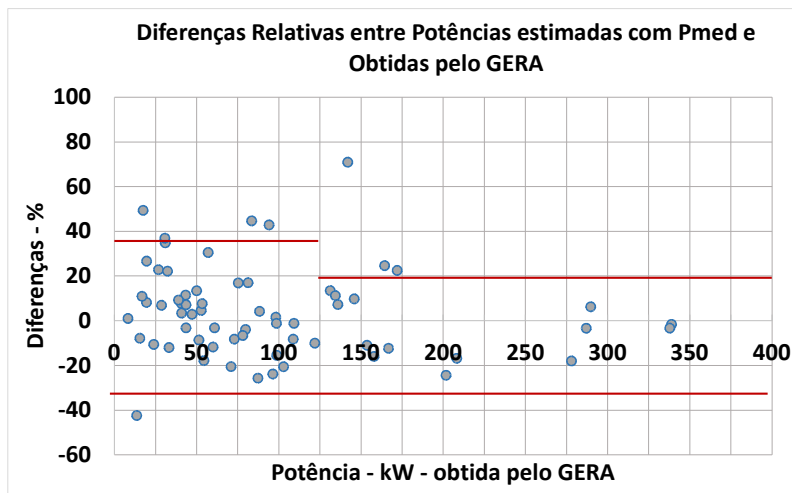


Figura 7: Diferenças percentuais entre as potências calculadas pela equação 7 e as obtidas pelo modelo GERA.

As diferenças das potências calculadas pela equação 7 em relação aos valores obtidos pelo modelo de simulação variam entre -25% e +40%, para potências inferiores a 125kW e entre -25% e +25% para potências superiores a 125kW, para 90% dos locais analisados.

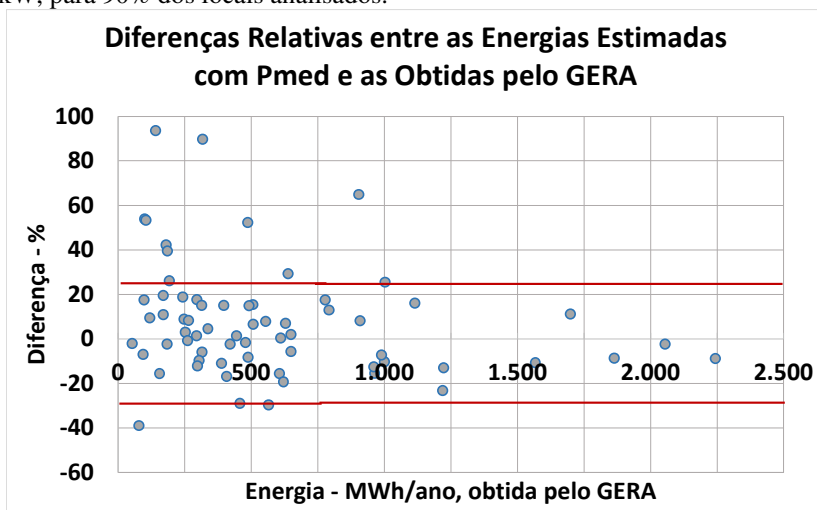


Figura 8: Diferenças percentuais entre as energias calculadas pela equação 8 e as obtidas pelo modelo GERA.

As diferenças entre as energias calculadas pela equação 8 e as obtidas no modelo de simulação variaram entre -30% e +25%, para 90% dos locais analisados.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A regressões efetuadas para se obter, de forma expedita, as potências médias e as energias anuais geradas por uma URE se mostraram bastante robustas.

As diferenças individuais entre os valores das potências calculadas em relação aos valores obtidos da simulação são menores para locais com potências superiores a 125kW. A variação das diferenças está dentro de um limite aceitável para uma estimativa expedita, que serviria para um projeto básico de um novo reservatório setorial. As diferenças são maiores, quando não se conhecem ainda as posições relativas do medidor de pressão em relação à cota de fundo do reservatório, mas as diferenças são aceitáveis, face a uma situação de concepção de projeto.

As energias calculadas pelas equações empíricas desenvolvidas podem servir para se avaliar, preliminarmente, os retornos esperados da implantação de URE na entrada de um reservatório setorial.

Vale lembrar que os resultados obtidos do modelo de simulação são valores potenciais, porque o rendimento máximo admitido na máquina de geração de energia foi igual a 1. Isto em nada retira a validade das equações apresentadas, mas será necessário corrigir os resultados das equações com o coeficiente de rendimento da turbina ou da BFT que se pretende implantar.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A preocupação na otimização energética em sistemas de abastecimento de água é muito justificada pela importância do custo de energia elétrica nas despesas operacionais e na necessidade de se ajustar os processos operacionais visando uma economia circular.

Dentre as várias ações possíveis, relatou-se uma ação específica de recuperação de energia na entrada de reservatórios setoriais. As equações empíricas obtidas apresentam uma boa oportunidade para se avaliar a viabilidade da implantação de uma URE, desde a fase de concepção de um novo reservatório. Na fase de projeto, a avaliação de uma URE permite que se faça um arranjo adequado na entrada do reservatório e que se dimensione uma válvula de controle já adaptada às condições operacionais do novo reservatório.

Como todas as equações empíricas, aquelas aqui apresentadas têm sua validade para as regras operacionais e perfis de consumo típicos dos reservatórios setoriais do SAM. Elas podem ser aplicadas em outros sistemas, mas com reservas, desde que as hipóteses deste método expedito sejam válidas.

Novas proposições de métodos simplificados para uma avaliação de oportunidade de recuperação de energia nas válvulas de controle dos reservatórios setoriais de distribuição de água serão sempre úteis para aperfeiçoamento do método e sua maior generalização de aplicação.

Em função dos resultados obtidos, conclui-se que a regressão obtida para o dimensionamento de volumes úteis de reservatórios setoriais de distribuição de água, com os consumos médios do setor é bastante robusta para ser utilizada como um método expedito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGARWAL, T. - Review of pump as turbine (PAT) for micro-hydropower. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. www.ijetae.com. ISSN 2250-2459, Volume 2, Issue 11, November 2012.
2. ALATORRE-FRENK, C. - Cost minimization in micro-hydro systems using pumps-as-turbines. Tese de doutorado. University of Warwick. 1994. 216p.
3. ALVES, D.D.S. - Contribuições para o estudo e a aplicação de bombas funcionando como turbinas na geração descentralizada. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, 2010, 120 p.
4. BOGDANOVIC-JOVANOVIC, J. B., et al. - Pumps used as turbines – Power Recovery, Thermal Science. 2014, Vol. 18, No. 3, pp. 1029-1040
5. BRASIL – Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2019. Brasília: SNS/MDR, 2020. 183 p.: il.
6. CASINI, M. - Harvesting energy from in-pipe hydro systems at urban and building scale. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, vol. 4, no. 4, October 2015.
7. CHAPALLAZ, J.M. et al – Manual on pumps as turbines. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien (GATE). 1992.
8. CORCORAN, L. et al. - Energy Recovery Potential of the Dublin Region. Water Supply Network. IWA. World Congress on Water, Climate and Energy. Dublin, Irlanda. 2012.
9. COUZINET, A. et al. - Characteristics of centrifugal pumps working in direct or reverse mode: focus on the unsteady radial thrust. Hindawi Publishing Corporation. International Journal of Rotating Machinery. Volume 2013, Article ID 279049, 11p.

10. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Anuário estatístico de energia elétrica 2020 Ano base 2019. Brasil – Ministério das Minas e Energia. 2020. 256p.
11. FRIJNS, J. - Intervention concepts for energy saving, recovery and generation from the urban water system. Transitions to the Urban Water Services of Tomorrow. D45.1. KWR Watercycle Research Institute. 2014.
12. FROSINA, E. et al. - A performance prediction method for pumps as turbines (PAT) using a computational fluid dynamics (CFD) modeling approach. *Energies* 2017, 10, 103; doi:10.3390/en10010103.
13. GARAD, D.S. et al. - The case study of pump as turbine. *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol.13, N. 5 (2018) pp. 15-19.
14. GATTULLI, L. V. et al. - Recuperação de energia hidráulica: uso de bombas que operem como turbinas. Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro. 2018. 112p.
15. GRAY, D - Inside Melbourne's secret suburban hydropower system. *The Sidney Morning Herald*. Publicado em 28.06.2017.
16. KARADIREK, I.E. et al. - Energy recovery potential from excess pressure. *Water Supply and Distribution Systems*. *Mugla Journal of Science and Technology*. 2016.2. 70-76.
17. KITTREDGE, C. P - Centrifugal pumps used as hydraulic turbines. *Transactions ASME*, 1961. p 74-78.
18. KRAMER, M. et al. - Pumps as turbines for efficient energy recovery in water supply networks. *Renewable Energy*. V 122 (2018) p.17-25. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.053>.
19. KOUGIAS, I. et al - Exploring the potential of energy recovery using micro hydropower systems in water supply systems. *Water Utility Journal* 7: 25-33, 2014.
20. KUCUKALI, S - Water supply lines as a source of small hydropower in Turkey: A Case study in Edremit. *World Renewable Energy Congress – Suécia*. 2011.
21. LIMA, G.M. - Microgeração em sistemas de abastecimento de água. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. 2013. 86p.
22. McNABOLA, A. et al - Energy recovery in the water industry using micro-hydropower: an opportunity to improve sustainability. *Water Policy* 16 (2014) 168–183.
23. MIRANDA, E.C. - Panorama de consumos energéticos no abastecimento de água no Brasil. Seminário Nacional de Eficiência Energética. Brasília. 2016.
24. MONTEIRO, L. et al. - Assessment of the potential for energy recovery in water trunk mains. Conference Paper. 14th Computing and Control for the Water Industry (CCWI). Amsterdam, Holanda. Nov. 2016. 8p.
25. PÉREZ-SÁNCHEZ, M. et al. - Energy recovery in existing water networks: towards greater sustainability. *Water*. 2017, 9, 97; doi:10.3390/w9020097.
26. SABESP – Companhia Estadual de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Plano de negócios - terceira revisão tarifária ordinária - informações regulatórias. 2020. 111p.
27. SAMORA, I.A. - Optimization of low-head hydropower recovery in water supply networks. Tese de Doutorado. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Suíça. 2016. 205p.
28. SILVA, L.A. et al. – Desenvolvimento e avaliação de um sistema piloto de microgeração hidroenergética na rede de abastecimento de água de Curitiba. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2016. 154p.
29. TELCI, I. e ARAL, M.M. - Optimal energy recovery from water distribution systems using smart operation scheduling. *Water*. 2018, 10, 1464; doi:10.3390/w10101464.
30. VIANA, A.N.C. e NOGUEIRA, F.J.H. - Bombas de fluxo operando como turbinas – procedimento de seleção. 4º Encontro de Energia no Meio Rural. Campinas. 2002.