

Otimização de funcionamento de bomba hidráulica e benefícios associados ao armazenamento de energia

DOI: 10.20396/labore.v17i00.8674358

Isabela Assis da Silva

<https://orcid.org/0000-0003-3318-1664>
Universidade Estadual de Campinas / Campinas [SP] Brasil

Vinicius de Carvalho Neiva Pinheiro

<https://orcid.org/0000-0002-4049-7256>
Universidade Estadual de Campinas / Campinas [SP] Brasil

Alberto Luiz Francato

<https://orcid.org/0000-0002-5815-8068>
Universidade Estadual de Campinas / Campinas [SP] Brasil

RESUMO

Metodologias que buscam a eficiência energética são cada vez mais necessárias e valorizadas considerando o cenário ambiental mundial, marcado pelo aquecimento global e agravamento das emissões de gases poluentes. Diante disso, surge a possibilidade de aplicação de estratégias ótimas para uso de recursos energéticos associados a recursos hídricos, através do armazenamento de energia na forma gravitacional. Esta estratégia consiste na otimização do funcionamento de bombas de recalque com planejamento para consumir eletricidade em horários de menor custo, que permite armazenamento de água em reservatório superior para que seja consumida em horários de custo mais caro de energia. Deste modo, este trabalho explora um estudo de caso com objetivo de minimizar a fatura de energia elétrica associada ao funcionamento da bomba, sob a análise da Tarifa Convencional, da Tarifa Branca e de uma tarifa horária fictícia denominada Tarifa Marrom. Os resultados apontam uma economia de apenas 1,0% na fatura de energia quando se compara a aplicação da Tarifa Branca em relação à Tarifa Convencional em um cenário de uso convencional do sistema de bombeamento. No entanto, é verificada uma redução de custo de até 16,6% com a otimização do uso da bomba em relação à operação tradicional quando aplicada a Tarifa Branca. Por fim, num cenário de precificação horária, é constatada economia de 9,3% ao aplicar a otimização do uso da bomba. Portanto, a metodologia deste trabalho aponta que existe potencial para exploração do armazenamento de energia associado à operação estratégica de uma bomba de água, além de apontar para a necessidade de novos modos de tarifação mais condizentes com a necessidade da rede elétrica e que melhor adaptem aplicação a outros equipamentos, buscando, assim, maior adesão à metodologia.

PALAVRAS-CHAVE

Armazenamento de energia. Eficiência energética. Otimização. Bombeamento d'água.

Optimization of hydraulic pump operation and associated benefits with energy storage

ABSTRACT

Methodologies that seek energy efficiency are increasingly necessary and valued considering the global environmental scenario, marked by global warming and the aggravation of polluting gas emissions. Therefore, there is the possibility of applying optimal strategies for the use of energy resources associated with water resources, through the storage of energy in gravitational form. This strategy consists of optimizing the operation of pumps with planning to consume electricity at lower cost times, which allows water to be stored in an upper reservoir so that it can be consumed at times of higher energy cost. Thus, this work explores a case study with the objective of minimizing electricity bills associated with the operation of the pump, under the analysis of the Conventional Tariff, the White Tariff and a fictitious hourly tariff called the Brown Tariff. Results point to a saving of only 1.0% in the energy bill when comparing the application of the White Tariff to the Conventional Tariff in a scenario of conventional use of the pumping system. However, a cost reduction of up to 16.6% is verified with the optimization of the use of the pump in relation to the traditional operation when the White Tariff is applied. Finally, in an hourly pricing scenario, savings of 9.3% are achieved when optimizing the use of the pump. Therefore, the methodology of this work points out that there is potential for exploring energy storage associated with the strategic operation of a water pump, in addition to pointing to the need for new tariffs that are more consistent with the needs of the electrical grid and that better adapt the application to other equipment, thus seeking greater adherence to the methodology.

KEYWORDS

Energy storage. Energy efficiency. Optimization. Water pumping.

1. Introdução

Há tempos o planeta vem sofrendo as consequências do acréscimo de emissões de gases poluentes: um exemplo é o aumento da temperatura da superfície terrestre, que se deseja limitar a 2°C, já ter alcançado 1,09° em relação ao período entre 1850 e 1900 (UNFCCC, 2015; IPCC, 2022). Analisando especificamente o contexto do Brasil, tal situação é agravada pelo aumento constatado do consumo per capita de energia elétrica, uma vez que cerca de 16,6% do CO₂ emitido em 2021 teve como origem o setor de geração de energia elétrica (MME, 2022; EPE, 2022; IBGE, 2023).

Na tentativa de mitigar impactos negativos de fontes de geração poluente, se tem investido em fontes limpas, por exemplo, a oferta interna de energia elétrica no Brasil pela fonte solar cresceu 92,2% entre 2018 e 2019, e pela fonte eólica, 15,5%, ao passo que as fontes não renováveis cresceram apenas 3,0% neste mesmo período (MME, 2020). Em consequência ao aumento de capacidade de geração de fontes intermitentes, é potencializada a necessidade de mecanismos para promoção do balanceamento entre oferta e demanda de energia.

Uma das alternativas são as modalidades tarifárias que visam incentivar a alteração do perfil de demanda de energia elétrica das unidades consumidoras ao atribuir maiores preços aos horários de maior demanda típica. No Brasil, além da Tarifa Convencional Monômnia cuja única tarifa não promove tal estímulo, há a Tarifa Horo-Sazonal para consumidores do Grupo A (unidades consumidoras de alta tensão ou atendidas por sistemas subterrâneos), que possui valores distintos para horários de ponta e fora de ponta, além da Tarifa Branca, disponível para consumidores do Grupo B (atendidos em baixa tensão), que apresenta três valores distintos de energia para dias úteis: para períodos de ponta, intermediários e fora de ponta (ANEEL, 2022). No Mercado Livre de Energia existe também o Preço da Liquidação das Diferenças (PLD) em que o preço é calculado diariamente para cada hora (CCEE, 2023).

Outro mecanismo é o armazenamento de energia que também promove eficiência energética uma vez que além de suportar a intermitência das fontes limpas, permite a diminuição de custos com geração de fontes tradicionais justamente pela operação mais eficiente e confiável, além do fato da geração por fontes tradicionais para atender exatamente à demanda ser muito custosa (Berrada & Loudiyi, 2019).

São diversas as formas utilizadas para armazenamento, mas este trabalho visa analisar os conceitos das formas que exploram a energia gravitacional. Ligado a essa forma há o hidro armazenamento bombeado, aplicado desde 1920, em que o excesso de energia é armazenado pela elevação de água a um reservatório de cota superior através do funcionamento de bombas, ao passo que para utilização da energia, a água escoar para o reservatório de cota inferior e, ao passar por turbinas acopladas a um gerador, gera eletricidade. Também conhecido como usina hidrelétrica reversível (UHR), é o sistema de hidro armazenamento mais utilizado no mundo, com capacidade instalada superior a 145 GW, devido a sua simplicidade e tecnologia já bem implementada. Este sistema, esquematizado na Figura 1 conforme Hossain et al. (2020), possui consumo de energia maior do que a geração, de forma que sua estratégia está em aproveitar sua usual grande capacidade de reserva para otimização dos horários de funcionamento de cada modo (consumo e geração) (Canales, Beluco & Mendes, 2015). Apesar das perdas inerentes ao processo, é considerado o sistema de armazenamento mais confiável no mundo, além disso sua vida útil é estimada em 60 anos, ao passo que seu custo de operação e manutenção é baixo (Berrada & Loudiyi, 2019). Contudo destaca-se que há limitação geográfica associada a este esquema, uma vez que usualmente utiliza-se do desnível natural do terreno para limitação e construção dos reservatórios inferior e superior.

Há também o armazenamento hidrelétrico bombeado subterrâneo, que apesar de não existir fisicamente ainda, é uma proposta de pesquisadores para utilizar cavernas como reservatórios inferiores. Outra variação é o de velocidade variável, onde ao invés de se utilizarem turbinas da bomba com velocidade fixa, se aplica velocidade variável para regular a frequência nos momentos de geração de energia e bombeamento. É importante recordar



Figura 1. Sistema de hidro armazenamento bombeado.

ainda o armazenamento hidrelétrico bombeado com água de mar, onde há reservatório acima do nível do mar e o reservatório inferior faz uso do mar aberto. E por fim, a variação submarina, ligada às necessidades de geração eólica *offshore*, onde a eletricidade é armazenada em tanques de pressão de concreto posicionados no fundo do mar por bombeamento. Apesar de suas variações, existe apenas um armazenamento hidrelétrico bombeado com aplicação residencial, localizado na França, onde a área comum de um edifício é alimentada por um sistema fotovoltaico e geração eólica combinados com armazenamento hidrelétrico bombeado e à bateria (Berrada & Loudiyi, 2019).

Com conceito similar às tecnologias apresentadas, existe o armazenamento de energia gravitacional. Isento de restrições geográficas, o sistema requer um compartimento preenchido de água e com pistão em seu interior, e funciona de forma que, para o armazenamento, uma bomba é acionada e conduz a água para aumentar a pressão existente dentro do compartimento, ocorrendo movimento ascendente que caracteriza a transformação em energia gravitacional. Já para a descarga de energia, o pistão força a passagem da água sob pressão pelo duto de retorno (movimento descendente), e em seguida passa pelo gerador que transforma a energia cinética em elétrica. A Figura 2, adaptada de Aneur, Berrada e Emrani (2022), exemplifica o sistema descrito.

O armazenamento de energia é benéficamente associado ao consumo estratégico de energia elétrica, de modo que nessa forma específica, o fluxo de reserva pelo bombeamento de fluido para o reservatório superior pode ser feito em horários de eletricidade mais barata, ao passo que quando a demanda de energia é maior, bem como seu preço, o fluido é liberado para geração de energia. A vantagem pode ser usufruída por detentores de tal sistema, por exemplo, Aneur, Berrada e Emrani (2022) estudam uma aplicação residencial onde há uma instalação fotovoltaica e, a partir dos inversores, o excedente da geração é consumido para induzir o fluxo de água e, assim, armazenar energia em tanque d'água por gravidade, portanto durante o dia o sistema de armazenamento de energia gravitacional é carregado, e durante a noite, tal energia armazenada na forma potencial é destinada ao abastecimento elétrico do edifício residencial. Deste modo, além do sistema atender à demanda dos moradores durante a noite com a própria geração, também provê estabilidade de segurança à rede elétrica.

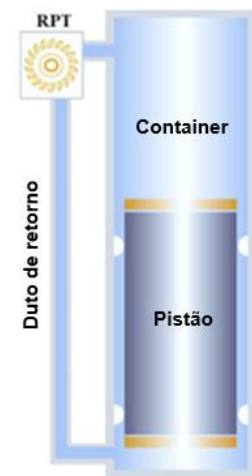


Figura 2. Esquematização de sistema de armazenamento de energia gravitacional.

Segundo Berrada e Loudiyi (2019), além dos benefícios passíveis de usufruto, os sistemas de armazenamento relacionados à energia gravitacional também podem prestar serviços ancilares à rede elétrica como corte de pico de demanda, regulação de frequência e *black start*. O corte do pico de demanda consiste na utilização de energia durante períodos de pico da fonte de armazenamento que foi abastecida durante períodos fora de pico, conforme exemplificado na Figura 3 adaptada de Berrada e Loudiyi (2019).

Já a regulação de frequência consiste em equilibrar a demanda e geração com objetivo de estabilizar a frequência da rede, conforme exemplifica a Figura 4, adaptada de Berrada e Loudiyi (2019). Logo, em momento de excesso de geração pode ocorrer uma regulação “para baixo” ao consumir energia para armazenamento, e caso contrário há a “regulação para cima” quando o sistema gera energia para injetar na rede.

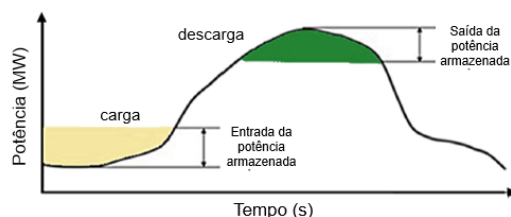


Figura 3. Corte do pico de demanda.

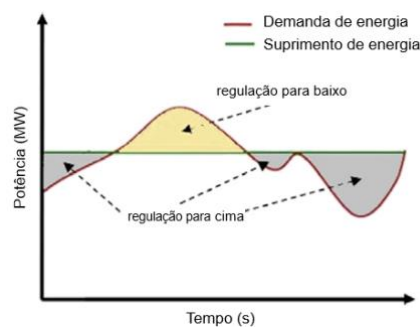


Figura 4. Regulação de frequência.

Por fim, o *black start* consiste na energização de certo conjunto de cargas após desabastecimento com fonte oriunda do próprio armazenamento. É importante ressaltar que os serviços ancilares, além de melhorar a

qualidade da rede, podem dar consequência a menor custo de energia ao usuário final devido à redução de custos dos operadores de geração, transmissão e distribuição de energia. Portanto as vantagens do armazenamento se aplicam a diversos agentes do Sistema Interligado Nacional (SIN) e se estendem aos âmbitos ambientais, sociais e financeiros.

Até o momento foram apresentados sistemas que, após o armazenamento, permitem a geração de energia elétrica. Entretanto, é possível derivar dos conceitos revisados a utilização da energia armazenada de outras formas. O objetivo deste trabalho é explorar, através de estudo de caso, o armazenamento de energia na forma gravitacional associada à otimização de uma bomba d'água de edifício residencial que consome energia em horários estratégicos para recalque da água de um reservatório inferior até o superior, para posterior consumo de água sem a necessidade de demandar energia elétrica em horários de ponta, buscando redução na fatura de energia.

A determinação da escala de funcionamento da bomba em busca de eficiência energética é uma metodologia proposta para outras aplicações que não envolvem apenas a água como fluido, à exemplo de estações elevatórias de esgoto (EEE). O estudo de Francato, Barbosa e Nour (2011) propõe o agendamento do funcionamento de cinco bombas existentes em uma EEE para reduzir os custos associados à eletricidade, e sua otimização aponta a possibilidade de acumular o esgoto no horário de ponta, acionando apenas três bombas em uso concomitante, o que ocorreria apenas em um intervalo de dez minutos, ao passo que nos momentos de baixa demanda seria possível a utilização de uma bomba somente. Já o estudo de Massulo (2011) também se relaciona com EEE, mais especificamente às unidades Joana D'arc B01 18 e Joana D'arc B01 19 de Uberlândia. Com metodologia baseada em programação não linear, inteira e mista, foi possível redução no custo de energia de 16% e 28%, respectivamente.

Por fim, cita-se estudo similar que avaliou a operação de uma EEE no município de Itai, com proposta de alterar a opção de modalidade tarifária de Convencional para Horo-sazonal e otimizar o funcionamento da bomba em busca de eficiência energética. Entretanto, os resultados apontaram que devido ao pequeno volume do reservatório existente, com a mudança tarifária, o custo se tornava maior.

Neste caso é importante refletir que metodologias de otimização financeira requerem estruturas tarifárias bem delimitadas que de fato influenciem a mudança dos hábitos de consumidores. Sobre esta premissa, este trabalho analisa a otimização do custo de energia atrelado ao bombeamento d'água e armazenamento de energia na forma potencial em reservatório superior, sob diferentes tarifas a fim de apontar se elas validam a hipótese de que há redução de custo pela mudança da escala de funcionamento da bomba.

2. Metodologia

Uma vez que a metodologia consiste em explorar as possibilidades de funcionamento de uma bomba de recalque de água, foi considerado no estudo um conjunto de 10 edifícios residenciais de 10 pavimentos tipo, quatro apartamentos por pavimento e três habitantes por apartamento localizado em Campinas – SP, além da concepção de sistema de abastecimento indireto com reservatório inferior e superior.

Inicialmente determinou-se a potência da bomba de cada edifício conforme metodologia resumida a seguir:

- Estimativa do consumo diário de água do edifício (Ilha & Gonçalves, 2009);
- Dimensionamento do sistema de abastecimento pela determinação da vazão e diâmetro do alimentador predial;
- Dimensionamento do sistema de recalque pela fórmula de Forchheimer, pelo cálculo do diâmetro da tubulação de recalque e a vazão de recalque;
- Escolha do conjunto motor-bomba, com auxílio de um manual de curvas características de bombas da KSB (2013), a partir da vazão de recalque calculada e da altura manométrica total da instalação, que por sua vez foi baseada nas medidas de projeto adotadas e perdas associadas;
- Plotou-se a curva da instalação sobre a curva da bomba com a curva característica do tamanho selecionado e, a partir da interseção das duas, seleção do diâmetro do rotor a ser aplicado;
- Determinação da nova altura manométrica e vazão recalçada, obtidas das curvas características da bomba lida no ábaco da bomba;
- Determinação do número de horas de bombeamento efetivo num dia padrão;

- Verificação da altura de sucção para evitar a ocorrência de cavitação;
- Cálculo da potência do motor e escolha de motor comercialmente disponível de potência imediatamente superior ao valor calculado a partir do catálogo da WEG (2020).

Conhecida a potência da bomba, foi fundamental determinar o perfil de consumo de água para então propor sua distribuição temporal de funcionamento. Para tanto, a partir do perfil apresentado por De Oreo, Lander e Mayer (1999), foi determinado um fator de demanda que, combinado com o consumo de água estimado para o estudo de caso, resultou no perfil residencial horário de consumo de água, conforme apresentado na Figura 5.

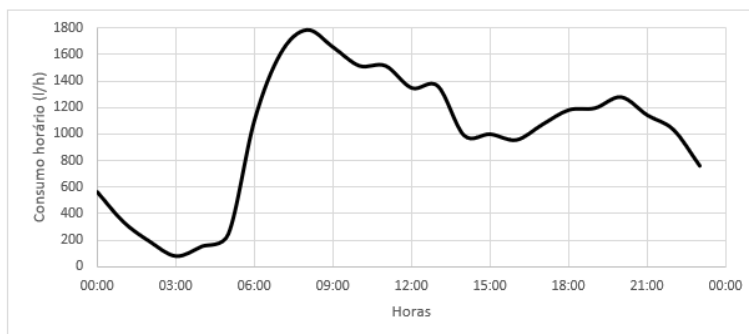


Figura 5. Perfil de água adotado para o edifício.

Para efetivação do estudo também foi necessário determinar as tarifas de energia na área de concessão do local, portanto apresenta-se os valores vigentes na última semana de janeiro de 2023 para a Tarifa Convencional na Tabela 1, conforme CPFL (2023b), e para a Tarifa Branca na Tabela 2, segundo CPFL (2023a). Nestas tabelas são considerados os valores totais, ou seja, a soma da tarifa de energia (TE) e de uso do sistema de distribuição (TUSD), desconsiderando os impostos. É importante destacar ainda que o horário de ponta corresponde ao período entre 18h e 21h, o intermediário, ao das 16h às 18h e das 21h às 22h, e o fora de ponta ao das 22h às 16h.

Tabela 1. Tarifa convencional (R\$/kWh)

bandeira	verde	amarela	vermelha
valor	0,662	0,692	0,727

Tabela 2. Tarifa Branca (R\$/kW/h)

horário	bandeiras		
	verde	amarela	vermelha
ponta	1,156	1,186	1,221
fora ponta	0,537	0,567	0,602
intermediária	0,757	0,787	0,822

Considerou-se ainda na análise uma tarifa fictícia horária em dois dos cenários simulados. Denominada Tarifa Marrom, esta tarifa foi proposta por Soriano (2023) como uma tarifa horária compatível com o padrão das curvas de carga no SIN. Portanto, a Tarifa Marrom objetiva proporcionalizar diretamente o custo da energia elétrica com sua demanda nacional. Para tanto sua determinação levou em consideração a carga horária aferida pela ONS em uma quarta-feira típica de verão de uma amostra de 21 anos, e a premissa de que a somatória da Tarifa Marrom ao longo do dia deveria ser igual à da Tarifa Branca da Enel SP. Contudo, para aplicação neste trabalho, a Tarifa Marrom foi adaptada de forma que o custo médio da energia, para cada bandeira tarifária, ficasse compatível com a Tarifa Branca adotada. Assim, os valores inicialmente propostos em Soriano (2023) foram recalculados alterando seu valor médio, mas mantendo o formato da curva de custo ao longo do dia, conforme apresentado na Tabela 3. A partir da Tabela 4 é possível comparar os custos médios de cada tarifa.

Tabela 3. Adaptação da Tarifa Marrom (R\$/kWh).

hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
bandeira verde	0.602	0.568	0.548	0.539	0.536	0.546	0.563	0.589	0.640	0.677	0.696	0.694
bandeira amarela	0.630	0.594	0.574	0.564	0.561	0.572	0.590	0.617	0.670	0.708	0.729	0.726
bandeira vermelha	0.663	0.625	0.604	0.593	0.591	0.601	0.620	0.649	0.705	0.745	0.767	0.764
hora	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
bandeira verde	0.679	0.699	0.716	0.720	0.713	0.683	0.643	0.640	0.685	0.691	0.687	0.650
bandeira amarela	0.711	0.732	0.749	0.753	0.747	0.715	0.673	0.670	0.717	0.723	0.720	0.680
bandeira vermelha	0.748	0.770	0.788	0.793	0.786	0.752	0.708	0.705	0.755	0.761	0.757	0.715

Tabela 4. Custos médios por tipo de tarifa (R\$/kWh).

bandeira	tarifa convencional	tarifa branca	tarifa marrom
verde	0,662	0,642	0,642
amarela	0,692	0,672	0,672
vermelha	0,727	0,707	0,707

Em seguida foram simulados e comparados cinco cenários diferentes, em que se varia a tarifa adotada e a operação do sistema com ou sem otimização, conforme resumido na Tabela 5. Nos casos sem otimização, adota-se a premissa de que o reservatório deve estar sempre cheio, mantendo volume constante de 17.600 litros (volume calculado para armazenar 40% do consumo diário e volume para combate a incêndio com hidrantes [V_{CH}]). Já para a otimização é considerado que o volume mínimo no reservatório é de 8.000 litros, correspondente ao V_{CH} , somados ao consumo das quatro horas seguintes (ABNT, 2000).

Tabela 5. Cenários simulados.

Cenário	Tarifa	Operação
1	Convencional	Tradicional (reservatório sempre cheio)
2	Branca	Tradicional (reservatório sempre cheio)
3	Branca	Bombeamento otimizado
4	Marrom	Tradicional (reservatório sempre cheio)
5	Marrom	Bombeamento otimizado

É importante destacar ainda que cada um dos cinco cenários foi simulado para as bandeiras tarifárias verde, amarela e vermelha. Além disso, o modelo de otimização desenvolvido é discretizado em 24 períodos de uma hora, representando as horas de um dia, e é baseado na notação adotada em Pinheiro (2020), com três elementos que o definem: variáveis de estado, variáveis de decisão e função objetivo. Ressalta-se que a modelagem matemática apresentada é válida para todos os cenários testados em que houve a otimização do bombeamento. Entre os cenários simulados são alterados somente os dados de entrada que compõem as variáveis de estado inicial, apresentadas adiante.

2.1 VARIÁVEIS DE ESTADO

As variáveis de estado contêm todas as informações necessárias para modelar o sistema desde um intervalo de tempo t em diante. No caso deste modelo, que é determinístico, as variáveis de estado são compostas pelo volume do reservatório e pelos parâmetros de entrada. Assim, as variáveis de estado dinâmicas são representadas por S_t e os parâmetros de entrada são representados por um vetor representa o estado inicial do modelo S_0 :

$$S_0 = (\{Q_{cons,t}, V_{min,t}, C_{tarifa,t}\}_{t=0}^{H-1}, P_{bomba}, Q_{bomba}, V_{max}, V_0) \quad (1)$$

$$S_t = (V_t) \quad (2)$$

Sendo H o horizonte de simulação (24 intervalos de uma hora), $Q_{cons,t}$ a vazão consumida em cada intervalo de tempo t , Q_{bomba} a vazão da bomba, $V_{min,t}$ o volume mínimo no reservatório em cada intervalo de tempo t , V_{max} a capacidade dos reservatórios, V_0 o volume inicial de água no reservatório e P_{bomba} a potência da bomba. $C_{tarifa,t}$ é a tarifa de energia elétrica em cada intervalo de tempo t que, dependendo da simulação, pode ser convencional, branca ou marrom, e pode ter bandeira tarifária verde, amarela ou vermelha.

2.2 VARIÁVEIS DE DECISÃO

As variáveis de decisão (x_t) são aquelas cujos valores são decididos pelo modelo de forma a otimizar a operação. Aqui, essas variáveis são constituídas pelos tempos de funcionamento da bomba, em horas, em cada intervalo de tempo.

As variáveis de decisão possuem restrições de forma a atender requisitos de operação. No caso, o reservatório possui volumes máximos e mínimos (Equação 3) e o tempo de bombeamento dentro do intervalo deve ficar entre 0 e 1 hora:

$$V_{min,t} \leq V_t \leq V_{max} \quad (3)$$

$$V_t = V_{t-1} - Q_{cons,t-1} + x_t * Q_{bomba} \quad (4)$$

$$0 \leq x_t \leq 1 \quad (5)$$

2.3 FUNÇÃO OBJETIVO

A função de custo do modelo é definida como o produto consumo de energia elétrica num intervalo de tempo t pela tarifa praticada neste intervalo:

$$C(S_t, x_t) = C_{tarifa,t} * P_{bomba} * x_t \quad (6)$$

A função objetivo do modelo é a minimização dos gastos com energia elétrica ao longo do horizonte de simulação:

$$Z = \underset{x_t}{\operatorname{argmin}} \sum_{t=0}^{H-1} C(S_t, x_t) \quad (7)$$

3. Resultados e Discussão

A partir do dimensionamento da bomba, encontrou-se a potência do motor da bomba como 1.792W, com 2,6 horas de funcionamento por dia e vazão de recalque de 9,2m³/h. Além disso, aplicada a metodologia de otimização para distribuição de funcionamento de escala da bomba, foram obtidos os custos anuais com eletricidade associados a este equipamento para os dez edifícios em cada cenário conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Faturas anuais conforme cenários e bandeiras (em R\$).

	bandeira verde	bandeira amarela	bandeira vermelha
Cenário 1 – Tarifa Convencional sem otimização	11.297,12	11.809,07	12.406,35
Cenário 2 – Tarifa Branca sem otimização	11.182,64	11.694,60	12.291,88
Cenário 3 – Tarifa Branca com otimização	9.424,91	9.755,88	10.351,19
Cenário 4 – Tarifa Marrom sem otimização	11.298,46	11.826,53	12.442,61
Cenário 5 – Tarifa Marrom com otimização	10.244,03	10.722,82	11.281,40

A determinação da escala de bombeamento, bem como volume no reservatório são apresentados na Figura 6 e Figura 7 com a aplicação da Bandeira Verde à caráter de exemplificação. Nelas é possível observar os cenários sem otimização, 1, 2 e 4, são coincidentes e neles o reservatório permanece com volume constante, ou seja, o volume bombeado corresponde ao consumo, portanto percebe-se picos de bombeamento por volta das 09h e 21h. Já no Cenário 3, a otimização resulta em bombeamento predominante nos horários de menor preço de energia e mínimo bombeamento possível nos horários de ponta e intermediário, de forma que o reservatório esteja cheio no início do horário intermediário, ou seja, na hora que antecede o início do aumento de preços de energia. No Cenário 5, percebe-se que a otimização também resulta em maior volume bombeado nos horários de menor preço, anulação do bombeamento durante as seis horas mais caras, de forma que em alguns preços de preços razoavelmente mais caros ainda é necessário um grande volume de bombeamento para respeitar as restrições definidas no método.

A partir da comparação entre cenários, é possível perceber que de fato existe redução de custo com energia elétrica a partir da metodologia proposta, conforme evidenciado na Tabela 7.

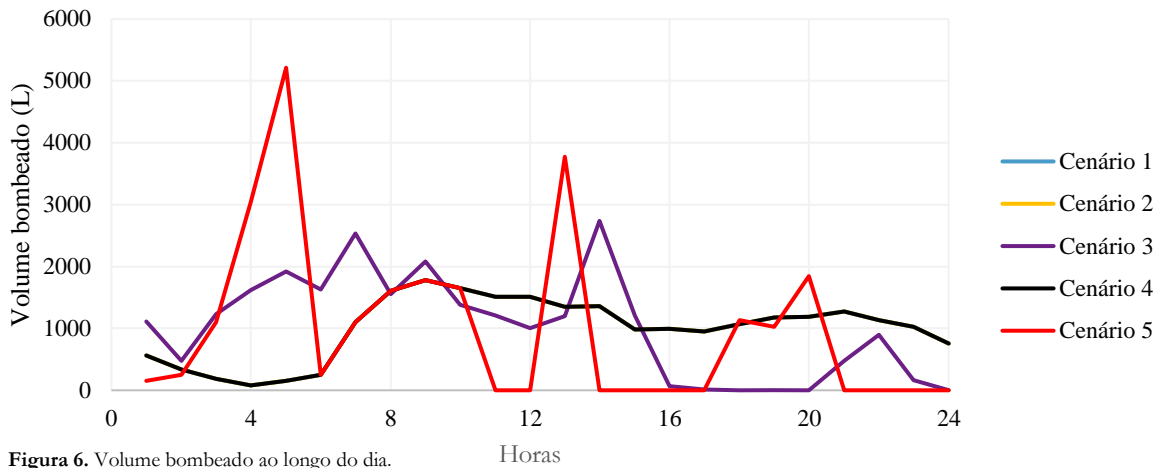


Figura 6. Volume bombeado ao longo do dia.

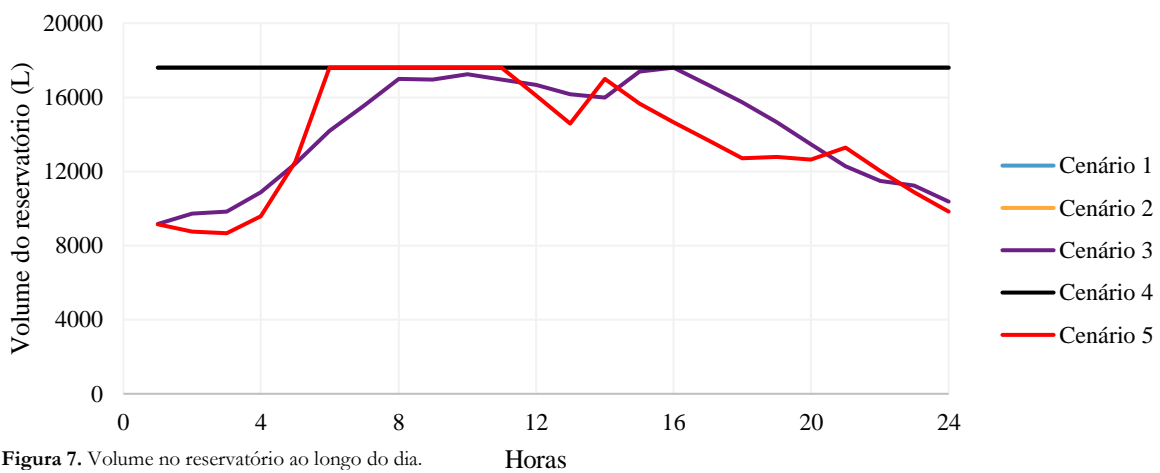


Figura 7. Volume no reservatório ao longo do dia.

Tabela 7. Economia oriunda da otimização.

Avaliação	Referência	bandeira verde	bandeira amarela	bandeira vermelha
Cenário 2	Cenário 1	1,0%	1,0%	0,9%
Cenário 3	Cenário 2	15,7%	16,6%	15,8%
Cenário 5	Cenário 4	9,3%	9,3%	9,3%

Ao analisar a Tabela 1 e Tabela 2, é perceptível que o valor fora de ponta, mesmo na bandeira vermelha, da Tarifa Branca é menor do que o valor total da Tarifa Convencional de qualquer bandeira. Deste modo, esperava-se que ao optar pela Tarifa Branca e com maior parte do consumo de energia no período fora de ponta, haveria diminuição no custo de energia. De fato, quando se compara os Cenários 1 e 2, isto é constatado já que há diminuição de até 1,0% da fatura. É notório que essa economia é baixa e pouco atrativa para o consumidor quando não há consumo estratégico de energia.

Já comparando cenários de mesma tarifa, na otimização sob a opção de Tarifa Branca também foi constatado que há redução da fatura, que varia entre 15,7% e 16,6% conforme a bandeira tarifária. A mesma observação se aplica para a opção da Tarifa Marrom, com economia de 9,3%, independentemente da bandeira tarifária. Ao comparar a eficiência de otimização entre o Cenário 3 e 5, percebe-se melhor desempenho quando a opção se dá pela Tarifa Branca. Tal resultado se justifica pelo fato de que apesar do mesmo preço médio entre as duas opções, conforme Tabela 4, a Tarifa Branca tem mais horários de preço baixo para bombear e, por isso, o gasto total com energia é mais baixo. No entanto, a Tarifa Marrom mostra uma perspectiva real de tarifação horária mais condizente com os preços de energia praticados no setor elétrico.

Os resultados mostram que, apesar da pouca atratividade das tarifas com diferenciação horária de preços para a operação convencional dos reservatórios, é possível obter economias consideráveis ao aplicar a política de operação proposta com técnicas de otimização.

4. Conclusões

O presente estudo promove avaliação quanto à possibilidade de se utilizar o armazenamento de energia gravitacional a partir da otimização da escala de funcionamento de uma bomba e, conseqüentemente, de energia elétrica para necessidade posterior de consumo de água que já se encontrará em cota elevada. Portanto, se trata de uma proposta de utilização de um recurso já disponível em edifícios residenciais, sem necessidade de investimento em infraestrutura, senão de equipamentos que permitam a programação da escala de funcionamento da bomba.

A partir da metodologia proposta se utiliza de um recurso distribuído para promover vantagens ao usuário, como até 16,6% de economia na fatura de energia na adoção de Tarifa Branca, e até 9,3% em caso de aplicação de uma tarifa horária, que apesar de fictícia aponta para uma possível tarifação condizente com as necessidades do mercado. Além disso, há benefícios para operadores de distribuição, transmissão e geração, uma vez que se diminui o custo de produção e condução marginal de eletricidade conforme sua demanda se torna mais uniforme.

Em outras palavras, conclui-se que nas condições de tarifação atual existe benefício financeiro proporcionado pelo armazenamento de energia na forma potencial gravitacional associado à programação estratégica de horários de funcionamento da bomba ao se optar pela Tarifa Branca. Ainda é importante ressaltar que a metodologia não implica em necessidade de adaptação do usuário final, uma vez que a estratégia energética associada ao recurso hídrico mantém o padrão de consumo dos residentes no edifício. Contudo, é necessário um olhar crítico sobre este tipo de tarifação, uma vez que ao expandir a metodologia para outros tipos de equipamento, seria necessário um grande esforço por parte dos consumidores para cumprir a otimização, ou seja, evitar os horários de tarifação mais cara.

Portanto, a metodologia aponta que existe potencial de exploração e promoção de maiores diferenças de valores entre horários ou mais intervalos, o que pode promover maior adesão à modalidade. Isso foi demonstrado pela aplicação de um cenário hipotético em que existiria tarifa com 24 valores distintos para cada hora, neste caso denominado como Tarifa Marrom. Esta opção de tarifação é considerada mais coerente com as necessidades do sistema elétrico e, apesar de inferior ao Cenário de Tarifa Branca, também permitiu economia com aplicação da metodologia de otimização.

4.1. AGRADECIMENTOS

Os Autores gostariam de agradecer a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas pelo apoio recebido.

5. Referências

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2022). Modalidades Tarifárias. *Site do Governo Federal Brasileiro*. <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/entenda-a-tarifa/modalidades-tarifarias>
- Ameur, A., Berrada, A., & Emrani, A. (2022). Dynamic forecasting model of a hybrid photovoltaic/gravity energy storage system for residential applications. *Energy & Buildings*, v. 271, pp. 1-15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778822004960>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2000). *NBR 13714: Sistemas de hidrantes e de mangotinhos para combate a incêndio* (25 p.). Rio de Janeiro: ABNT.
- Berrada, A., & Loudiyi, K. (2019). *Gravity Energy Storage*. Elsevier, 103p.
- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2023). Conceitos de preço. *Site da CCEE*. <https://www.ccee.org.br/precos/conceitos-precos>
- Canales, F. A., Beluco, A., & Mendes, C. A. B. (2015). Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 19(2), 1230-1249. Santa Maria, RS.
- Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL (2023a). FAQ Tarifa Branca. *Site da CPFL*. <https://www.cpfl.com.br/tarifa-branca>

Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL (2023b). Taxas e Tarifas – CPFL Paulista. *Site da CPFL*.
<https://www.cpfl.com.br/empresas/tarifas-cpfl-paulista>

Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2022). *Anuário estatístico de energia elétrica 2022 – Ano base 2021*. Rio de Janeiro: EPE. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>

Francato, A. L., Barbosa, P. S. F., & Nour, E. A. A. (2011). A Eficiência Energética na Operação Ótima de Estações Elevatórias de Esgoto. *Revista DAE*, 185, pp. 29-34. <http://revistadae.com.br/site/artigo/1428-A-eficiencia-energetica-na-operacao-otima-de-estacoes-elevatorias-de-esgoto>

Hossain, E., Faruque, H. M. R., Sunny, M. S. H., Mohammad, N., & Nawar, N. (2020). A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects. *Energies*, pp. 1-127. <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/14/3651>

Ilha, M. S. O., & Gonçalves, O. M. (2009). Sistemas prediais de água fria. *Apostila da disciplina EC-712 – Instalações Prediais Hidráulicas e Sanitárias. Faculdade de Engenharia Civil – Unicamp*.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2023). *Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação*. <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, the Working Group II: Summary for Policymakers. Sixth Assessment Report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

KSB (2013). *Manual de Curvas Características: N° 2740/42/44.1P/E/S/7 – Bombas Hidráulicas*, 75p.

Massulo, A. M. (2021). *Eficiência Energética em Estações Elevatórias De Esgotos: estudo de caso em Uberlândia-MG*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/827305>

Ministério de Minas e Energia – MME (2020). *Resenha Energética Brasileira* (Edição 2020, 32p.). <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/ResenhaEnergicaExercicio2020final.pdf>

Ministério de Minas e Energia – MME (2022). *Resenha Energética Brasileira* (Edição 2022, 32p.). <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/resenha-energetica-brasileira/resenhas/resenha-energetica-2022.pdf/view>

Soriano, L. (2023). *Contribuição ao estudo da eficiência energética na operação de reservatórios urbanos de abastecimento de água com o uso de otimização e inteligência artificial*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

United Nations Climate Change – UNFCCC (2015). Adoption of the Paris Agreement: Proposal by the President. *Paris Climate Change Conference, COP21*. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>

Pinheiro, V. C. N. (2020). *Despacho ótimo de sistemas elétricos com armazenamento energético para fontes intermitentes de geração no Brasil*. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1157935>