



TÉCNICAS DE EFICIENTIZAÇÃO ENERGÉTICA EM BOMBEAMENTO PARA RESERVATÓRIOS ASSOCIADA A PREVISÃO NEURAL

Thobias Tose

Eng. Eletricista, graduado pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES, 2005), mestrado em automação (UFES, 2012), pós-graduado em Sistemas Inteligentes Aplicados a Automação pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES, 2017) e pós-graduado em Eficiência Energética pelo mesmo instituto (2019). Atualmente é Engenheiro Eletricista pela Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN), desde 2006, onde realiza atividades referentes a automação dos sistemas operacionais da companhia.

Endereço: Av. Guarapari, 444, Jd. Limoeiro – Serra - ES - CEP: 29164-120 - Brasil - Tel: +55 (27) 2127-5517 - e-mail: thobias.tose@cesan.com.br

RESUMO

Sistemas de bombeamento são usualmente encontrados em qualquer sistema que envolva o transporte de líquidos, como em companhias de saneamento. Os projetos destas instalações são geralmente projetados para final de plano e muitas vezes não operam nesta condição de potência nominal. A operação com controle através de válvula ou com regimes diferenciados que não estejam atuando dentro do melhor ponto de rendimento dos conjuntos instalados sempre foi uma ação nociva aos equipamentos, além do desperdício de energia elétrica que esse tipo de operação provoca. O inversor de frequência se tornou um importante equipamento para racionalizar o uso da energia elétrica, sem afetar a operação do sistema. Neste trabalho será avaliado um setor de abastecimento, composto por estação elevatória, reservatório elevado e a malha de distribuição e serão comparados o uso com e sem inversor de frequência, associado a previsão de nível através de Redes Neurais Artificiais para otimizar o abastecimento. Com auxílio de simulações para esse cenário, busca-se extrair a máxima eficiência do inversor e a otimização do sistema como um todo, que podem servir como parâmetros quando a adoção desta técnica é válida para sistemas de bombeamento.

PALAVRAS-CHAVE: Energia elétrica, inversores, redes neurais artificiais.

INTRODUÇÃO

Em empresas ligadas a área de saneamento, a maior parte da força motriz instalada está nos conjuntos motores-bombas. Esses conjuntos realizam desde a captação de água bruta nos rios, distribuem a água tratada para a população e realizam a coleta das águas residuais (esgoto). Entretanto, para maior eficiência destes processos, o uso de tecnologias de automação auxilia no controle, porém muitas vezes ineficazes em termos de redução do consumo de energia, pois contrastam com outras diretivas (operacionais) adotadas que levam o sistema a operar fora do ponto de maior eficiência energética. Esses controles exigem uma solução de compromisso entre a eficiência energética e metas do processo produtivo, associado ainda a um dos maiores problemas dessas empresas: as perdas nos processos e na distribuição que representam hoje no Brasil uma média de 38%, demonstra Trata Brasil, (2021).

Isso tem provocado a busca por novas metodologias e estratégias de controle, incluindo sistemas baseados em inteligência artificial, cuja finalidade é incluir ações visando à eficiência energética no sistema de controle, conforme explicita Zhang (2007). Usualmente a arquitetura utilizada nas indústrias é do tipo de controladores lineares PI/PID associados a Controladores Lógicos Programáveis (CLP). Porém a utilização de sistemas de inteligência artificial tem avançado significativamente nas últimas décadas, tais como a rede neural artificial – RNA e a lógica *Fuzzy*, Fernandes Junior, (2007).

As redes neurais artificiais possuem como principal característica a capacidade de aprender e ter a resposta para as condições pré-estabelecidas. Dispondo dessas características, esse recurso pode ser utilizado para otimizar o consumo de água, sua distribuição e conseqüentemente o custo de energia elétrica. A utilização de controle inteligente, através das redes neurais artificiais (RNA), é um importante procedimento para definir a estratégia de controle que melhor se adapta ao processo. Tose (2017), descreve a previsão de consumo de água de uma determinada região, considerando os aspectos dos dias da semana e das condições de temperatura. É notório que o

consumo de água é variável com relação a esses parâmetros. Avaliar o nível de um reservatório através de curvas de tendência ou com previsão neural podem auxiliar na otimização de funcionamento das bombas para enchimento do reservatório, tendo assim um potencial de redução energético associado.

Este trabalho propõe inserir neste contexto as estações elevatórias que realizam o bombeamento de água de um reservatório apoiado, ou diretamente da rede de distribuição para um reservatório elevado, sendo que a utilização desses reservatórios possibilita o abastecimento por gravidade para vários clientes. O ponto chave a ser adotado é incluir mecanismos que possibilitem ter melhor controle e eficiência no potencial elétrico (consumo) e na demanda de água.

OBJETIVO

Comprovar que a adaptação no regime de funcionamento de um conjunto motor-bomba que realiza o enchimento de um reservatório, ajustando-o no melhor ponto de operação/rendimento, associado a previsão neural de nível (consumo) do reservatório traz benefícios quanto ao consumo de energia elétrica. Complementando, essas ações dependem da realização das atividades descritas abaixo:

- Levantamento de uma área de estudo;
- Estudar o regime operacional e os equipamentos utilizados na elevatória;
- Levantar dados históricos no que compete a área de estudo para previsibilidade;
- Levantar os dados de consumo de energia;
- Realizar simulações no que compete a um novo regime operacional da unidade de bombeamento;
- Avaliar os possíveis resultados da implantação das novas metodologias;

De posse dessas informações, pretende-se propor regras para otimizar a operação do sistema de elevação (estação elevatória) com vistas a diminuição do consumo de energia elétrica, assim como compor toda a infraestrutura necessária para garantir a segurança operacional no abastecimento aos clientes da prestadora de serviços.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho contém as seguintes fases: (a) Avaliação do sistema atualmente em operação, com levantamento dos equipamentos instalados, regimes operacionais e parâmetros elétricos; (b) Realizar amostragem de dados operacionais da unidade para treinamento das redes neurais horárias; (c) Instalação de inversor de frequência em uma das unidades de bombeamento, registrando os parâmetros elétricos, curva da bomba e o regime de funcionamento para diferentes rotações; e (d) realizar simulações operacionais, com base de dados históricos e com previsão neural para avaliar se há potencial de eficiência energética para a unidade.

A fase inicial consiste em delimitar uma área de abastecimento para estudo, incluindo o reservatório que é abastecido por uma estação elevatória. Serão registrados os parâmetros elétricos da unidade e obtenção dos dados de regime de funcionamento das bombas e instrumentos.

A próxima fase consiste em realizar treinos em uma rede neural artificial, incluindo dados ambientais (temperatura) para avaliar uma possível relação de previsão de nível do reservatório. Essa previsão servirá de base para futuras simulações de funcionamento da elevatória para avaliar a redução do consumo de energia sem afetar o abastecimento.

Na fase de instalação de inversor, será avaliada a curva da bomba, obtendo as vazões para diferentes rotações, assim como avaliar o comportamento do motor e seus parâmetros elétricos. De posse dessa instalação, será avaliada a economicidade que o inversor poderá trazer caso seja instalado de forma definitiva.

E, por último, realizar previsões de nível do reservatório associado a diferentes vazões, de forma a encontrar potencial de eficiência energética no regime operacional da unidade.

Dessa forma, o conhecimento da realidade operacional permite intervir no funcionamento das bombas, propondo cenários com alternativas técnicas que minimizam o consumo de energia. A realidade neste caso será comparar os resultados apresentados em determinados cenários simulados, podendo a companhia de abastecimento prever, p. ex, comportamentos de nível, que é associado ao consumo da região de estudo, associados diretamente com a

disponibilidade de água x tempo de funcionamento da bombas; Estes parâmetros podem ser ainda mais evidenciados por ocasião de aumento de temperatura ambiente, o que torna maior o consumo de água e consequentemente o tempo de bombeamento da unidade elevatória para o reservatório elevado.

O bairro escolhido possui uma área de 0,38km² e uma população de 1.111 habitantes. Possui 2 (duas) elevatórias e 2 (dois) reservatórios. Simplificadamente o modelo citado acima pode ser representado na Figura 1 abaixo:

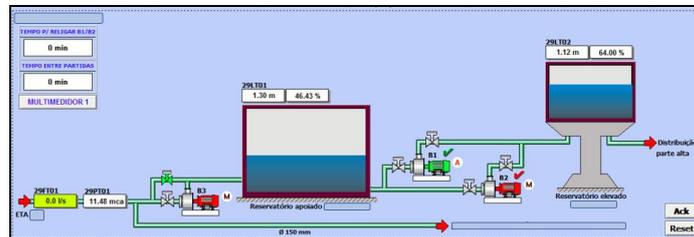


Figura 1 – Exemplo do sistema de abastecimento.

O reservatório elevado, elemento chave objeto deste estudo, possui capacidade de 110m³, cota inferior 63,3m, cota superior 66,47m e abastece toda parte alta do bairro.

O monitoramento do nível é efetuado através de um sensor ultrassônico instalado dentro do reservatório, sendo sua cota máxima inferior a seção do cilindro do reservatório. A leitura é realizada em metros e enviado o sinal 4-20mA até a unidade de transmissão remota (UTR) localizada na elevatória. O range de leitura é de 0 a 1,75m e a representação do reservatório é mostrado na Figura 2.

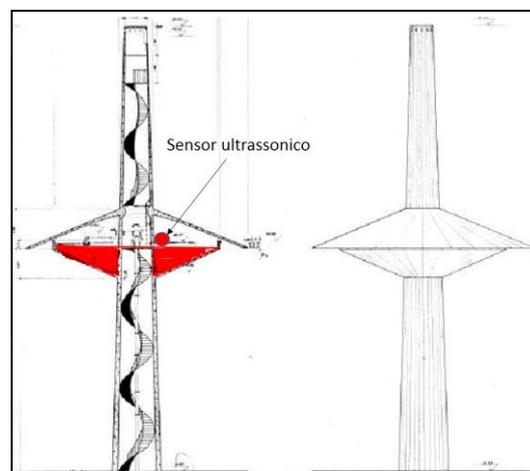


Figura 2 – Reservatório elevado.

Composto por um reservatório apoiado de 180m³, 2 conjuntos motores-bomba de 10cv, com dados de projeto em H=60mca e Q=20m³/h, sendo H - Altura Manométrica e Q - vazão, a estação elevatória realiza o bombeamento para o reservatório elevado.

Os parâmetros disponíveis por telemetria são: vazão e pressão de entrada do bairro, nível do reservatório apoiado e nível do reservatório elevado, assim como os dados elétricos provenientes do multimedidor de grandezas elétricas instalado no local.

Foram resgatados dados históricos horários desses parâmetros no período de 1 ano, entre agosto/2018 a agosto/2019. Adicionalmente foi instalado um registrador de grandezas elétricas para coletar todos os parâmetros elétricos de funcionamento da unidade.

Os dados consistem em: corrente e tensão elétrica das 3 fases, potências ativa, reativa e aparente e fator de potência em intervalos de 30s. Atualmente a unidade possui um conjunto motor-bomba KSB Megabloc 32-200 (já descontinuado pela KSB) acoplada a um motor elétrico trifásico WEG de 10cv/220V, (Figura 3) acionadas por *soft-starter*. O funcionamento é realizado de forma automática, através do nível do reservatório superior (45% – 80%) e

disponibilidade de água no reservatório inferior. Caso seja necessário o centro de controle operacional (CCO) da Companhia pode ajustar esses *setpoints* assim como realizar o acionamento manual remoto das bombas. A Figura 4 representa a curva típica da bomba instalada.



Figura 3 – Conjunto motor-bomba instalado.

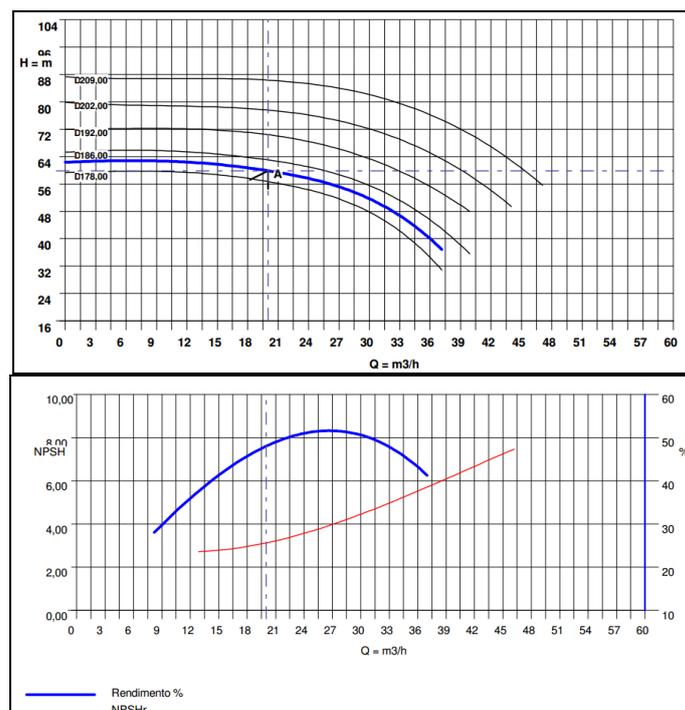


Figura 4 – Curvas típicas do conjunto motor-bomba KSB para rotor 183mm.

Já a curva de abastecimento do reservatório elevado, que é realizado de forma automática por um sistema de controle, pode ser visualizada na Figura 5.

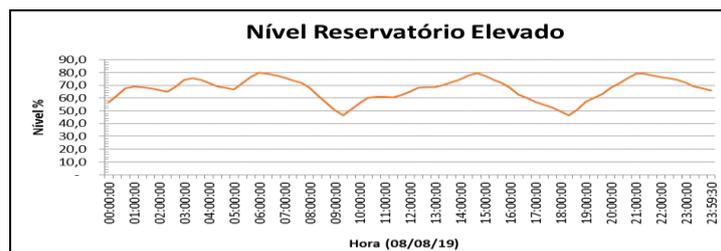


Figura 5 – Comportamento do Nível do Elevado.

Observa-se que em modo automático, as bombas iniciam sua operação quando o nível está em 45% do reservatório elevado e interrompem seu funcionamento em 80%.

Já o comportamento elétrico, obtido através do registrador, pode ser visualizado na Figura 6.

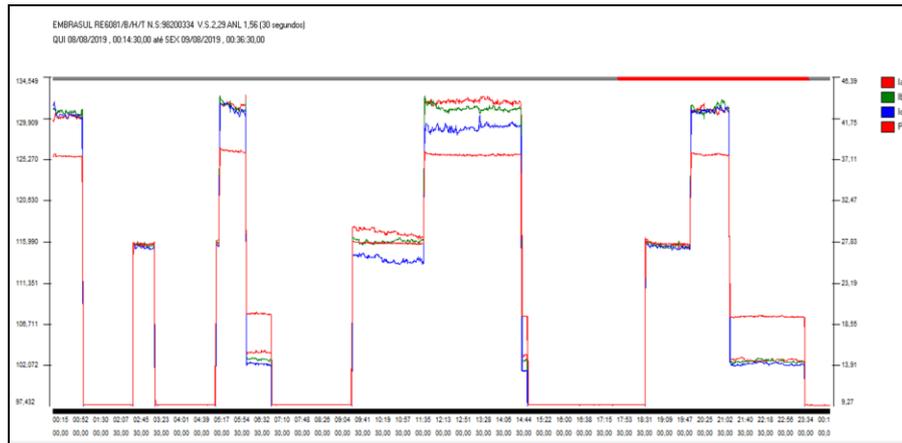


Figura 6 – Registro das correntes elétricas e potência total ativa.

Observa-se picos de corrente próximos a 42A, que representam a corrente total consumida pelas elevatórias do reservatório apoiado e elevado, considerando que o registrador foi instalado na entrada geral do QDG (Quadro Distribuição Geral). Para todos os efeitos será utilizada a corrente máxima próximo a 30A que corresponde ao funcionamento do conjunto motor-bomba de 10cv que realiza o enchimento do RAT (reservatório de água tratada) superior ou elevado.

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Considerando os dados levantados para o treinamento, avaliou-se que o modelo de RNA (redes neurais artificiais) que mais se assemelhasse para a previsão do estudo foi com base histórica sem que fosse realizada realimentação dos dados para previsão.

Diante disso, foi utilizado o software *Matlab*, através de ferramentas específicas para uso de rede neural, como o “*nstart*” e *Simulink*. A opção utilizada foi a “*Fitting Tool*”, com inserção dos dados de entrada/saída.

Os dados de entrada foram as pressões e nível do reservatório apoiado, que é a base para o enchimento do reservatório elevado, juntamente com os dados de temperatura ambiente (Tabela 1). Já na saída foram utilizados dados históricos do nível do reservatório elevado.

É notável que o consumo de água varia de acordo com a variação da temperatura. Embora inicialmente não fosse escopo para avaliação nas redes neurais, optou-se em utilizar esses dados para avaliar e quantificar a importância do mesmo. Os dados foram obtidos através do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia e houve melhora da performance das redes após a inclusão desses dados.

Os dados para treino, validação e testes foram deixados como padrão, nos valores de 70%, 15% e 15% respectivamente. O número de neurônios na camada oculta foi alterado sempre para encontrar e melhor performance da rede. A Figura 7 representa uma rede neural típica, com 15 neurônios na camada oculta para o modelo apresentado. Os dados para treino corresponderam a uma amostra de 3 meses, sendo obtidos, em média, 35 dessas amostras dentro do intervalo considerado.

Tabela 1 – Dados utilizados para treino das RNA.

DateTime	Entradas			Saídas
	Pressão Entrada I. Boi	Nível RAT Apoiado	Temperatura Ambiente	Nível RAT Elevado
01/06/2019 00:00	x	y	z	a
...
08/08/2019 23:00	x1	y1	z1	a1

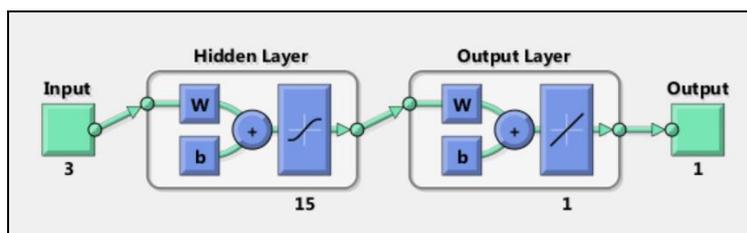


Figura 7 - Modelo de Rede Neural com 15 neurônios camada oculta.

Houve certa dificuldade para encontrar resultados satisfatórios no treino das redes neurais. A melhor performance apresentada consistiu em 35 amostras (em média), em período trimestral (jun-ago/2019) com variações constantes no número de neurônios, sendo avaliados alguns testes baseados em dados históricos x testes com RNA, conforme relacionado na Tabela 2:

Tabela 2 – Número de amostras/neurônios utilizado no treinamento.

Treinos utilizando RNA/Hora			
Hora	Número Amostras	Neurônios Camada Oculta	Desempenho Treino
0	40,00	7,00	71%
1	45,00	25,00	73%
2	45,00	15,00	83%
3	35,00	15,00	74%
4	35,00	15,00	86%
5	40,00	15,00	69%
6	40,00	15,00	74%
7	35,00	7,00	79%
8	35,00	10,00	72%
9	35,00	7,00	78%
10	35,00	7,00	75%
11	35,00	10,00	90%
12	57,00	7,00	83%
13	35,00	7,00	73%
14	56,00	5,00	75%
15	35,00	7,00	78%
16	35,00	7,00	78%
17	40,00	7,00	85%
18	40,00	15,00	72%
19	40,00	15,00	51%
20	35,00	5,00	82%
21	40,00	25,00	76%
22	40,00	30,00	75%
23	35,00	25,00	83%
Média	39,29	12,63	77%

Após realizados os treinos correspondentes a cada hora do dia, foram inseridos no *Simulink* os blocos neurais correspondentes a cada hora. Esses blocos representam de maneira intuitivas os cálculos matemáticos provenientes dos treinos realizados hora a hora. A cada saída do bloco, foram interligados “*displays*” para visualizações dos valores correspondentes. Como dados de entrada, são inseridos a pressão de sucção, pressão essa proveniente da rede de distribuição de entrada do bairro, o nível do reservatório inferior, abastecido diretamente por essa rede,

assim como a temperatura ambiente, que pode ser considerado um fator importante no consumo de água pela população. Ao executar a aplicação, são apresentadas as saídas horárias do nível do reservatório elevado para as variáveis de entrada. A Figura 8 representa a RNA obtida via *Simulink*.

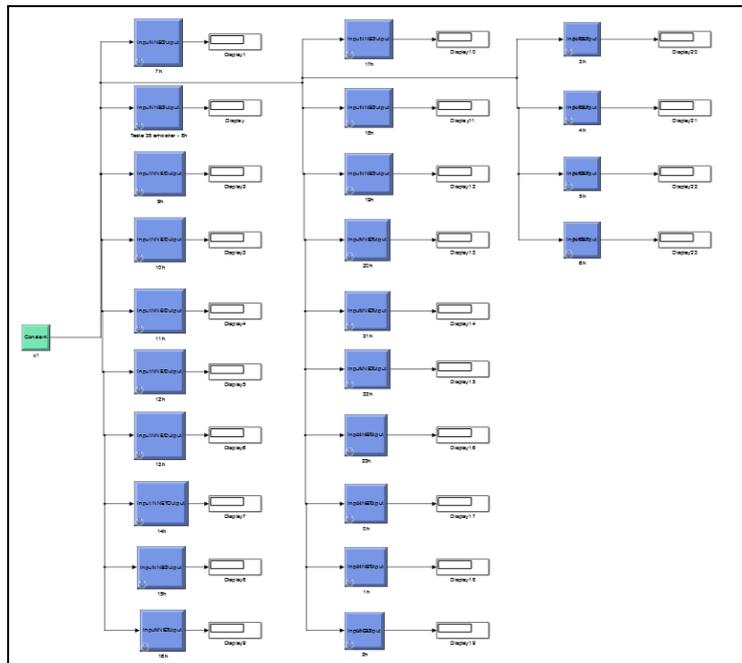


Figura 8 – Representação das saídas treinadas em RNA via Simulink.

Em resumo, a performance apresentada simulando as redes com dados históricos pode ser apresentada na Figura 9.

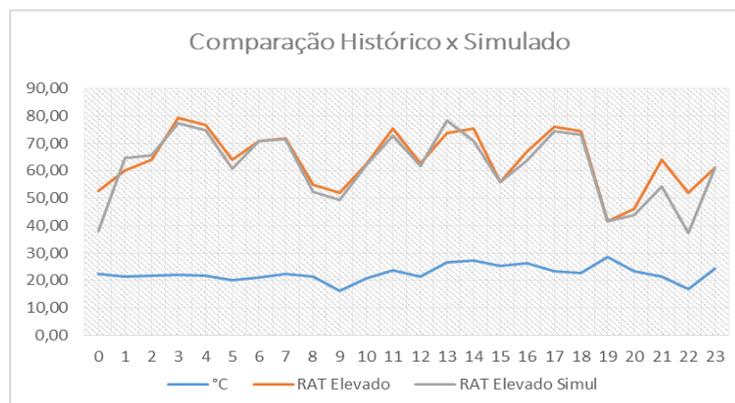


Figura 9 - Performance das RNA comparando com valores reais.

Com as redes treinadas é possível prever o nível do reservatório com diferentes pressões e níveis a montante da elevatória, associado ainda a temperatura ambiente. O próximo passo será conhecer o comportamento do bombeamento através de um inversor de frequência e consequentemente a vazão bombeada que será descrito a seguir.

INVERSOR DE FREQUENCIA

Realizados os levantamentos das condições de funcionamento atual da unidade elevatória (através de *soft-starter*), optou-se por instalar de forma provisória um inversor de frequência para avaliar a performance da unidade, assim como observar as diferentes vazões para determinadas rotações. Assim como na fase inicial, foram registrados os parâmetros elétricos da unidade no espaço de tempo em que o dispositivo ficou instalado.

Os testes foram realizados no dia 19/11/2019 de 15h as 15h45. Ao mesmo tempo estava sendo coletado os dados de pressão de sucção e recalque das bombas, assim como a vazão bombeada. O registrador de grandezas elétricas foi posicionado junto ao inversor durante todos os testes, com intervalos de amostragem de 1s.

A Figura 10 representa as instalações e os equipamentos instalados para levantamento dos dados.



Figura 10 – Registrador de pressão, vazão e grandezas elétricas.

Os dados coletados podem ser observados de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Dados obtidos com variação de rotação do conjunto motor-bomba.

Hz	Pressão de Recalque Pr (mca)	Pressão de Sucção Ps (mca)	Q (l/s)	Pot. Elétrica (kW)	fp	Corrente (A)	Tensão (V)
60	42,4	1,63	6,10	9,84	0,94	28,80	209,00
59	42,2	1,56	5,70	8,77	0,94	25,50	209,00
58	41,96	1,62	5,40	7,64	0,93	22,10	212,00
57	41,78	1,58	5,20	6,61	0,93	19,10	214,00
56	41,52	1,61	5,00	5,54	0,92	16,20	214,00
54	41,1	1,61	4,30	4,28	0,9	12,80	214,00
52	40,62	1,61	3,30	3,04	0,85	9,50	216,00
50	40,1	1,61	1,70	3,00	0,85	9,40	216,00
49	-	-	0,00	3,00	0,85	9,40	216,00

Complementando os registros realizados, o gráfico abaixo representa os parâmetros elétricos obtidos através das diferentes rotações aplicadas no conjunto motor-bomba (Figura 11).

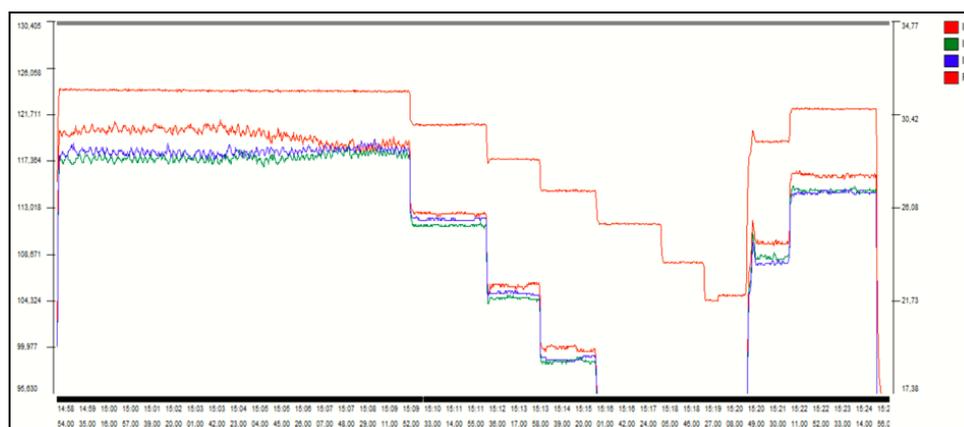


Figura 11 – Parâmetros elétricos registrados quando utilizado inversor.

Como os testes foram realizados em um curto período de tempo (15h10 as 15h45), observou-se o comportamento do reservatório elevado, visto que estavam ocorrendo diferentes vazões dentro do período, representado na Figura 12.

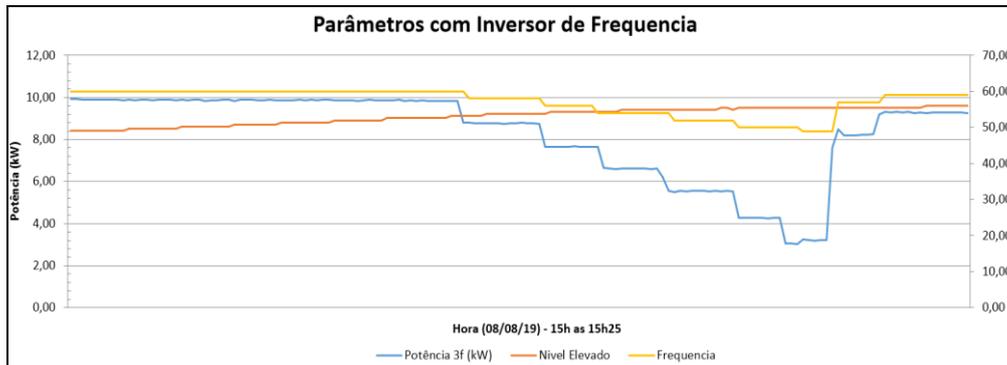


Figura 12 – Potência total e nível do reservatório elevado com variação da frequência.

Conhecendo os resultados apresentados para as condições anteriores a instalação do inversor, assim como possíveis previsões de níveis com a utilização de redes neurais artificiais, serão apresentados a seguir simulações com essas técnicas para quantificar a eficiência que essa solução aplicada pode trazer ao sistema.

RESULTADOS

De posse de todos os dados obtidos anteriormente, foi possível avaliar as condições atuais de funcionamento da unidade – automático por nível (45-80%), assim como com a instalação de um inversor de frequência – avaliando as respectivas vazões x rotações e potências associadas para cada condição estabelecida.

Diante das circunstâncias apresentadas, será realizado um comparativo quando a unidade está equipada com inversor de frequência e com previsão neural do nível do reservatório, obedecendo a disponibilidade de montante da unidade de bombeamento (pressão e nível do reservatório apoiado) juntamente com a temperatura ambiente.

Desta forma, será avaliado como será o comportamento do reservatório elevado para um período de 24h (considerado no mês de agosto). A partir das respostas horárias de nível provenientes das equações das redes treinadas, será simulado o funcionamento das bombas para atendimento das vazões requeridas. Dessa forma será possível quantificar o tempo de bombeamento e conseqüentemente o consumo de energia comparado ao regime atual de funcionamento.

CONSUMO DIÁRIO PARA O REGIME ATUAL (SOFT-STARTER)

A data base de estudos e proposta deste trabalho corresponde a data 08/08/2019 de 0h a 23h59m. Neste dia foi possível extrair todos os dados obtidos do registrador de grandezas elétricas em intervalos de 30s, assim como comparar com os dados historiados no Centro de Controle Operacional da Companhia.

Um fato importante a ser considerado corresponde a leitura realizada pelo registrador. Com picos de corrente na ordem de 42A verificou-se que a elevatória inferior, que realiza o aumento de pressão da rede de distribuição, também estava sendo alimentada pelo painel. Coube então avaliar e desconsiderar a potência elétrica consumida por esse dispositivo para, em seguida, calcular o tempo de funcionamento das bombas e conseqüentemente seu consumo.

É sabido que os dados do registrador são mais precisos quando comparados ao multimedidor de grandezas elétricas e, por este motivo, será avaliado o consumo e o tempo de funcionamento por esses dados.

A temperatura média ambiente no dia foi de 22,15 °C, a mínima de 19,60 °C e a máxima 26,30 °C.

Na Figura 13 é apresentado o gráfico de funcionamento da unidade 1.

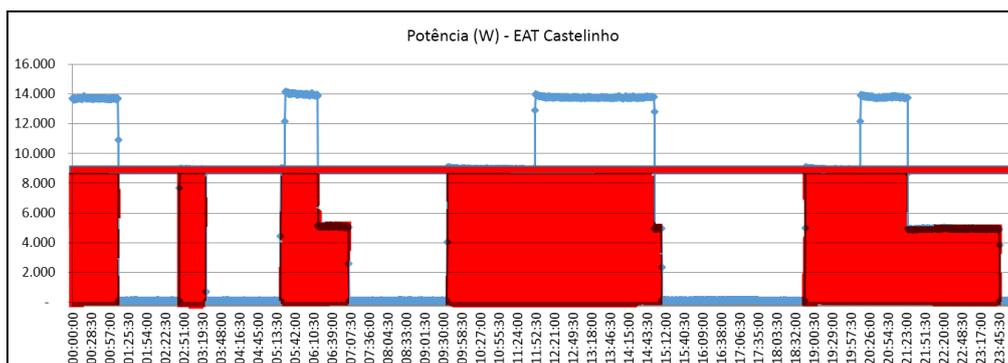


Figura 13 – Funcionamento do conjunto motor-bomba 1 da EAT (em vermelho).

Observa-se picos de potência em torno de 14kW considerado a este fato que outro conjunto de bombeamento estava ligado ao mesmo tempo. Para efeitos relativos ao objeto deste estudo, a unidade 1 possui potência de 7,5kW, com potência elétrica requerida em média de 9kW. Calculando a integral da área apresentada acima, obtém-se que o tempo total de funcionamento no dia foi de 10,75h, consumo diário de 96,75kWh, com um volume total bombeado de 236,07m³, para uma vazão de recalque de 21,96 m³/h.

O comportamento do nível do reservatório para este mesmo dia já foi mostrado na Figura 9. Esse modo de funcionamento corresponde ao automático por nível, que mantém sempre o reservatório entre 45% - 80%.

CONSUMO DIÁRIO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Inicialmente será necessário conhecer o perfil de consumo ao longo do tempo para determinar a vazão e consequentemente a rotação/potência mais adequada para o inversor. Embora esse estudo seja qualitativo, a maioria dos inversores já possui métodos de controle (PI, PID, etc) integrados o qual podem ajustar de forma automática a rotação adequada em detrimento da leitura realizada do nível, pressão ou vazão por exemplo.

Nesse tópico será avaliado qual a necessidade de vazão ao longo do dia, quando comparado ao acionamento por soft-starter, para determinar o quanto de economia pode ser alcançado com um controle simples, sem que ocorra desabastecimento.

De acordo com a Tabela 4, a vazões de consumo (ou de demanda) serão consideradas em intervalos fixos de 1 (uma) hora, referenciado ao modelo anteriormente proposto quando acionados por soft-starter.

Tabela 4 – Consumo (demanda) da área abastecida pelo RAT Elevado.

Intervalo	Vazão Bombeada (m ³ /h)	Varição do Volume (m ³)	Demanda (m ³ /h)
0h-1h	21,96	7,11	14,85
1h-2h	3,29	0,00	3,29
2h-3h	6,22	1,12	5,10
3h-4h	8,78	2,99	5,79
4h-5h	0	-4,12	4,12
5h-6h	15	5,62	9,38
6h-7h	5,85	0,75	5,10
7h-8h	0	-3,74	3,74
8h-9h	0	-10,48	10,48
9h-10h	9,15	-2,99	12,14
10h-11h	21,96	6,36	15,60
11h-12h	21,96	0,75	21,21
12h-13h	21,96	4,12	17,84
13h-14h	21,96	2,62	19,34
14h-15h	19,76	4,49	15,27
15h-16h	0	-5,24	5,24



16h-17h	0	-7,11	7,11
17h-18h	0	-4,87	4,87
18h-19h	5,12	-0,75	5,87
19h-20h	21,96	7,86	14,10
20h-21h	21,96	7,49	14,47
21h-22h	8,78	1,50	7,28
22h-23h	0	-2,25	2,25
23h-0h	0	-4,49	4,49
Média	9,82		9,54

Nesta situação atual, o perfil gráfico de consumo da região atendida pelo reservatório elevado é mostrado na Figura 14:

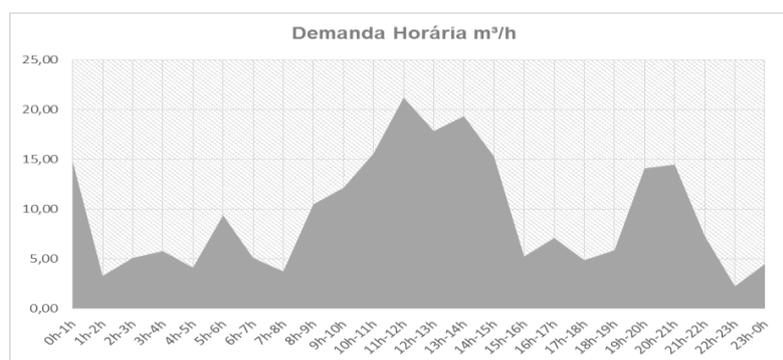


Figura 14 – Perfil de consumo.

Desta forma, com apoio de um inversor de frequência, é possível ajustar a rotação do conjunto motor-bomba para que o mesmo atenda a demanda requerida nos intervalos horários. Como não há nesse sistema controle para horário de ponta x fora de ponta, foi ajustado o perfil de vazões de bombeamento para que o mesmo atenda a demanda e mantenha o reservatório cheio no início do horário de tarifas intermediárias e de ponta. Essa análise poderá servir de base para calcular a economia prevista caso esse modelo seja adotado.

A Figura 15 ilustra uma simulação, para diferentes rotações, do perfil de nível (ou capacidade) do reservatório.

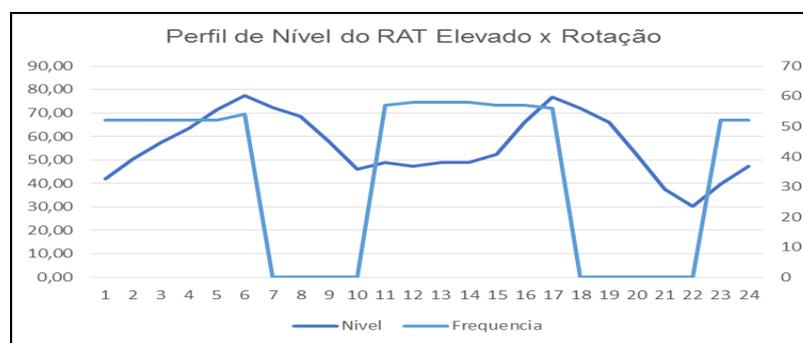


Figura 15 – Perfil de Nível do RAT Elevado x Rotação.

Para esse modelo proposto é possível observar variação diária na rotação do conjunto (entre 52 a 58Hz), incluindo intervalos de desligamento (6h-10h e 17-22h). Foi possível executar procedimentos de enchimento/esvaziamento do RAT para garantir o cloro residual para atendimento das portarias existentes de potabilidade de água. As simulações estabelecidas foram baseadas na demanda e, também, de forma a manter o reservatório abastecido o suficiente para atendimento do horário de ponta. Nesta situação o tempo total de funcionamento no dia foi de 15h, consumo diário de 73,85kWh, com um volume total bombeado de 231,12m³.

Comparado ao acionamento por soft-starter, o tempo de funcionamento foi 39% maior, o consumo 22,9% menor e o volume bombeado 2% menor.

CONSUMO DIÁRIO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA E UTILIZAÇÃO DE RNA

De forma a prever o nível do reservatório elevado de acordo com as pressões e níveis do reservatório apoiado, foram levantadas as médias horárias das pressões e do nível do RAT apoiado (ou inferior), juntamente com a temperatura ambiente entre 01/06/2019 a 08/08/2019. Desses mesmos dados, foram extraídas amostras para treino das redes neurais para prever o nível do RAT elevado. Foram consideradas as temperaturas do dia 08/08 para obter as respostas da rede, sendo esses dados demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados utilizados para estimular a RNA – Nível do RAT elevado (saída).

Intervalo	Média (01/06/2019 - 08/08/2019)		Temp. Dia 08/08	RNA	01/06 a 08/08	Performance
	Pressão	Nível Apoiado	Temperatura Prevista	Nível %	N. Elevado Real	Desvio (Real x RNA)
0h-1h	16,66	40,88	20,7	29,49	56,31	48%
1h-2h	18,18	41,28	20,6	56,28	58,11	3%
2h-3h	19,12	43,05	20,4	54,99	60,06	8%
3h-4h	20,17	45,54	20,3	63,05	63,07	0%
4h-5h	21,23	48,36	20,2	74,93	65,63	14%
5h-6h	22,08	51,87	20,2	69,49	66,7	4%
6h-7h	21,49	55,28	20,1	73,4	66,25	11%
7h-8h	18,41	57,19	20	69,28	63,7	9%
8h-9h	14,81	56,83	20	58,22	59,9	3%
9h-10h	12,52	54,06	20,3	51,48	58,55	12%
10h-11h	11,06	48,67	21,85	63,2	61,15	3%
11h-12h	10,47	44,4	23,7	69,52	63,82	9%
12h-13h	10,24	43,04	24,4	73,21	63,63	15%
13h-14h	9,73	43,34	24,8	65,58	62,15	6%
14h-15h	9,92	43,73	24,95	52,88	61,26	14%
15h-16h	10,65	43,08	25,45	50,31	61,51	18%
16h-17h	11,41	41,2	26,2	66,66	62,53	7%
17h-18h	13,33	39,3	25,85	53,21	62,39	15%
18h-19h	15,08	38,39	24,85	49,25	60,96	19%
19h-20h	15,5	37,63	23,8	67,96	59,6	14%
20h-21h	15,06	37,01	22,45	86,77	59,11	47%
21h-22h	14,15	36,97	20,6	38,72	59,72	35%
22h-23h	14,17	37,39	19,75	40,9	58,45	30%

Em representação gráfica é mostrado na Figura 16.

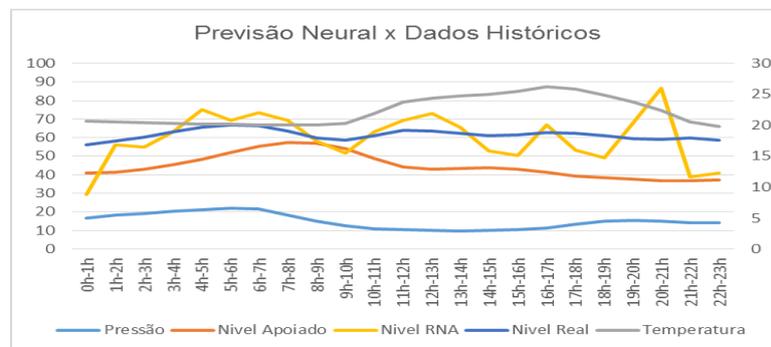


Figura 16 – Dados históricos e previsão utilizando RNA.

É notável a diferença entre os extremos e principalmente na resposta entre 20-21h. O primeiro se refere que não está sendo considerado o nível do RAT apoiado no instante 0h, o que de certa forma faz perder a referência. Já o segundo se mostrou devido a um desvio acentuado apresentado pelo treino da rede que impactou na resposta.

Mesmo tendo esses dois eventos particulares, observa-se que a previsão neural (linha amarela) se mostra mais convergente nos horários de maior demanda (manhã, meio dia e início da noite), demonstrando assim entendimento



do sistema. Logo, com os resultados apontados na saída da RNA, optou-se por adotar esses valores de nível associados a demanda real, obtidos no regime atual de funcionamento (por *soft-starter*).

As respostas para essas condições consideram sempre a demanda real x previsão do nível, calculando dessa forma a vazão a ser bombeada e ajustando a rotação do conjunto motor-bomba. De forma a simplificar, foram considerados também balanços em intervalos de 4h, de forma a entender melhor o bombeamento, sem, contudo, perder o nível do reservatório – Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados para ajustar a rotação do conjunto motor-bomba.

RNA	01/06 a 08/08		Performance		RNA		8/8		RNA		Aplicação simples com inversor de forma a atender a demanda (equivalente ao regime atual de funcionamento)					
	Nível %	N. Elevado Real	Desvio (Real x RNA)	Nível (m)	Capacidade Prevista (m³)	Demanda Real	Varição da Capacidade m³ prevista	A bombear (m³/h)	Após 4h (m³)	Frequência (Hz)	Vazão bombeada (m³/h)	Balanco (m³)	Balanco 4h/4h	Potencia (kW)		
29,49	56,31	48%	0,52	20,82	10,73			21,24		54	15,48	-5,76		4,28		
56,28	58,11	3%	0,98	38,77	3,29	17,95		4,25	48,19	52	11,88	7,63	2,93	3,04		
54,99	60,06	8%	0,96	37,92	5,10	-0,84		11,02		52	11,88	0,86		3,04		
63,05	63,07	0%	1,10	43,16	5,79	5,23		11,68		52	11,88	0,20		3,04		
74,93	65,63	14%	1,31	50,72	4,12	7,56		5,94		0	0	-5,94		0		
69,49	66,7	4%	1,22	47,28	9,38	-3,44		7,58	18,02	0	0	-7,58	-0,02	0		
73,4	66,25	11%	1,28	49,76	5,10	2,48		1,13		56	18	16,87		5,54		
69,28	63,7	9%	1,21	47,15	3,74	-2,61		3,37		0	0	-3,37		0		
58,22	59,9	3%	1,02	40,03	10,48	-7,12		7,73		56	18	10,27		5,54		
51,48	58,55	12%	0,90	35,62	12,14	-4,41		23,23	76,40	56	18	-5,23	-1,52	5,54		
63,2	61,15	3%	1,11	43,25	15,60	7,64		25,26		58	19,44	-5,82		7,64		
69,52	63,82	9%	1,22	47,30	21,21	4,05		20,18		58	19,44	-0,74		7,64		
73,21	63,63	15%	1,28	49,64	17,84	2,34		14,49		54	15,48	0,99		4,28		
65,58	62,15	6%	1,15	44,78	19,34	-4,85		7,02		52	11,88	4,86		3,04		
52,88	61,26	14%	0,93	36,54	15,27	-8,24		3,55	38,95	52	11,88	8,33	0,29	3,04		
50,31	61,51	18%	0,88	34,85	5,24	-1,69		17,74		0	0	-17,74		0		
66,66	62,53	7%	1,17	45,47	7,11	10,63		0,00		0	0	3,85		0		
53,21	62,39	15%	0,93	36,76	4,87	-8,72		3,26		0	0	-3,26		0		
49,25	60,96	19%	0,86	34,14	5,87	-2,61		26,26		57	18,72	-7,54		6,61		
67,96	59,6	14%	1,19	46,31	14,10	12,16		26,25	35,79	57	18,72	-7,53	1,65	6,61		
86,77	59,11	47%	1,52	58,08	14,47	11,78		0,00		0	0	23,69		0		
38,72	59,72	35%	0,68	27,10	7,28	-30,98		3,72		0	0	-3,72		0		
40,9	58,45	30%	0,72	28,57	2,25	1,47										
	Média	15%								Total (m³)	220,68		3,33			

A previsão se mostra importante para o controle operacional tratar diretamente a demanda de água em diferentes dias da semana e temperatura ambiente. Por outro lado, quando realizado com sucesso a questão energética é também afetada. Com diferentes previsões de temperatura diária, p.ex, é possível o controle ajustar a demanda de água para abastecimento, atendendo com qualidade os clientes da companhia. Tal fato, novamente, impacta no consumo de energia, visto que com menos abastecimento ou abastecimento eficiente, as perdas também acabam sendo reduzidas e consequentemente o tempo de bombeamento tende a ser menor ou no melhor ponto de eficiência, economizando assim energia. Trata-se de um controle inteligente, baseado em previsões em que se pode atuar diretamente no sistema de abastecimento, sendo ele em uma micro ou macro região.

Comparando as opções anteriores, nesta situação o tempo total de funcionamento no dia foi de 14h, consumo diário de 68,88kWh, com um volume total bombeado de 220,68m³.

Comparado ao acionamento por *soft-starter*, o tempo de funcionamento foi 30% maior, o consumo 29% menor e o volume bombeado 6,6% menor.

Já referente ao acionamento por inversor, o tempo de funcionamento foi de 6% menor, o consumo 6,7% menor e o volume bombeado 4,6% menor.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O propósito inicial do trabalho de realizar simulações com utilização de inversores de frequência em sistemas de bombeamento e ainda associando a previsão neural apresentaram resultados significativos com relação a economia de energia. Utilizar um sistema abastecido por uma estação elevatória cuja operação é realizada apenas por simples controle de nível representam características comuns aplicadas em qualquer sistema de abastecimento de água.

Com a escolha deste piloto foi possível também avaliar as condições atuais de funcionamento e inferir resultados que poderiam ser incrementados caso fossem adotados outros conceitos com ênfase em eficiência energética. Alguns desses pontos são recomendados abaixo.

Inicialmente percebe-se que o conjunto motor-bomba instalado é antigo e está operando fora do ponto operacional previsto em projeto (20m³/h x 60mca). A Figura 4 demonstrou a curva do conjunto para um rotor de 183mm e que não corresponde as medições realizadas, ou seja, está com rendimento significativamente inferior ao especificado. Isso pode estar associado ao desgaste do rotor e as condições da voluta e rugosidade da tubulação.

Outro fato refere-se a curva de funcionamento quando acionada por inversores de frequência. Observa-se que abaixo de 50Hz não há bombeamento e que na faixa de 52Hz o fator de potência é inferior a 0,92, caracterizando um ponto de funcionamento inadequado. Para fins de simulação, mesmo com essas situações, foi possível demonstrar economia, porém deve-se avaliar outras condições de dimensionamento do conjunto motor-bomba para alturas manométricas elevadas, como é o caso. Isso pode permitir variações mais precisas nas vazões de bombeamento e melhor controle e eficiência energética de todo o processo.

A utilização de motores de alto rendimento, acopladas a bombas mais eficientes e adequadas as condições de trabalho adicionam fatores nas observações discriminadas acima.

Outro ponto de destaque refere-se as condições tarifárias vigentes. Com o advento da tarifa branca, pode-se aproveitar melhor o volume do reservatório para desligar as bombas nos horários intermediários e de ponta. Conforme demonstrado, a redução no consumo e consequentemente nas contas de energia tornam-se mais vantajosas, justificando a substituição dos equipamentos e o tempo de retorno na implantação do projeto.

Quanto ao controle automático, o inversor poderia ser controlado através de um PID simples de acordo com o nível ou vazão de saída do reservatório, sempre ajustando o melhor ponto de operação do conjunto para atendimento requerido. A maioria dos inversores já possui essas ferramentas incorporadas o que facilita a aplicação. Já com relação ao controle inteligente, através das RNA, é recomendável que sempre se realizem simulações para dias e temperaturas determinados, visto que o consumo é alterado de acordo com esses parâmetros. Esse método facilita não somente bombear o necessário, mas também intervir caso algum evento extraordinário ocorra, p.ex, quanto há desabastecimento de uma grande parte da região e assim estimar o tempo e vazão de retorno quando normalizado.

Outro modelo que poderia ser utilizado, mas sem considerar alteração tarifária, seria abastecer a região atendida pelo reservatório diretamente pela unidade de bombeamento, mantendo as pressões mínimas admitidas. Essa opção poderia ser interessante para comparar a vantajosidade frente a utilização de reservatórios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FERNANDES JUNIOR, F. G; LOPES, J. S; OLIVEIRA, L. A. G., et al. Implementação de controladores PID utilizando lógica Fuzzy e instrumentação industrial. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, SBAI, 2005.
2. TOSE, THOBIAS. Utilização de redes neurais artificiais para previsão de pressão de distribuição de água e estudo comparativo com modelo Epanet. Trabalho de conclusão de curso. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Espírito Santo, 2017.
3. TRATA BRASIL. Perdas de água 2021. Desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência no saneamento básico. Disponível em <https://www.tratabrasil.org.br/pt/estudos/perdas-de-agua/itb/perdas-de-agua-potavel-2021-ano-base-2019-desafios-para-a-disponibilidade-hidrica-e-ao-avanco-da-eficiencia-do-saneamento-basico>, 2021.
4. ZHANG, J.W. C; JING, Y; D. An. *Study of neural network PID control in variable frequency airconditioning system. IEEE international conference on control and automation*, p. 317-322, 2007.