

XI-010 – UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NO CONTROLE DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Laís Régis Salvino⁽¹⁾

Física pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Doutoranda em Engenharia Mecânica na área de Controle de Sistemas de Abastecimento de Água no PPGEM/UFPB.

Kamilla Henrique Mendonça⁽²⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestranda em Engenharia Mecânica na área de Controle de Sistemas de Abastecimento de Água no PPGEM/UFPB.

Anne Caroline Linhares Monteiro⁽³⁾

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Heber Pimentel Gomes⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Politécnica de Madri (UPM). Professor associado a UFPB.

Endereço⁽¹⁾: UFPB – Campos I – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica – João Pessoa - PB - CEP: 58059-900 - Brasil - Tel: (83) 3216-7037 - e-mail: lais_regis@hotmail.com

RESUMO

Com o intenso crescimento demográfico verificado nas últimas décadas, constatou-se um consequente aumento na demanda dos serviços prestados pelas companhias de abastecimento de água e esgoto, principalmente na região urbana, onde se concentra a maior parte da população. Com o intuito de atender as crescentes necessidades dos usuários, além de reduzir os gastos e desperdícios no processo de abastecimento, muitas companhias investem em equipamentos e técnicas mais eficientes. Desta forma, a automação de sistemas de abastecimento de água surge como uma ferramenta capaz de modernizar e melhorar a eficiência dos processos que envolvem a operação dos referidos sistemas. No entanto, apenas a automação não é suficiente para a redução dos gastos e desperdícios, pois é necessário que os sistemas de abastecimento operem de forma inteligente, aliando assim, a automação aos controles que priorizem o suprimento da demanda necessária, requerendo o mínimo gasto hidro energético. Este trabalho apresentou um controle aplicado a uma bancada experimental totalmente instrumentalizada que simula o funcionamento de um sistema de bombeamento, fornecendo água pressurizada para duas zonas de consumo com cotas topográficas diferenciadas. Os resultados apresentados mostraram que a economia proporcionada pela ação de controle nos casos estudados foi, em média, de 60%. Em alguns pontos operacionais a economia chegou a ser de 68%.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de Abastecimento de Água, Automação, Controle, Redes Neurais e Artificiais.

INTRODUÇÃO

A cada dia, novas tecnologias são desenvolvidas em diversas áreas, com o intuito de tornar as atividades mais eficientes e precisas. Quão mais essenciais essas atividades, mais importantes se tornam essas descobertas. O setor de abastecimento de água é de fundamental importância para o desenvolvimento de qualquer região, seja ela de pequeno ou grande porte. Os Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) trabalham com dois insumos básicos, água e energia, logo, sua utilização deve ser operacionalizada de maneira eficiente e econômica, reduzindo ao máximo os desperdícios.

Um importante indicador de eficiência em um SAA é o índice de perdas, no Brasil este índice varia em torno de 38%, no entanto, em alguns estados alcançam 75%. É possível afirmar que um dos grandes desafios enfrentados pelas operadoras de SAA no Brasil é conseguir efetuar uma redução em seu índice de perdas em cada uma das etapas do seu processo de fornecimento (SNIS, 2013). Como forma de reduzir as perdas reais, é

necessário controlar as pressões de serviço para que o volume perdido seja minimizado. Ainda deve ser considerada a energia desperdiçada por bombear esse volume.

No entanto, um SAA não opera de maneira linear, ou mesmo previsível. A demanda de uma determinada região não é uniforme ao longo de todo um ano, ou mesmo ao longo de todo o dia. Há horários ou períodos em que uma maior vazão é solicitada, em meses ou dias mais quente, por exemplo. Neste sentido, a utilização de sistemas automatizados que monitorem de forma segura a pressão na rede pode ser visto como uma excelente ferramenta para a manutenção e operação das redes de abastecimento.

Segundo Tsutiya (2006), a automação no abastecimento pode ser aplicada nas operações de captação e distribuição, por exemplo, enquanto que a tecnologia da informação possibilita realizar a supervisão e os controles necessários para manter o sistema operando de forma mais eficiente.

As redes automatizadas permitem a utilização de ferramentas mais sofisticadas, que irão intervir de maneira direta na operação da rede. Como exemplo, podem-se citar os controles inteligentes. Algoritmos robustos implantados no sistema que realizarão manobra, conforme a necessidade de demanda. A utilização desses controles irá garantir não apenas a permanência dos serviços de abastecimento nos horários de maior consumo, como também irá permitir uma redução nas perdas, oriundas de excesso de pressão ao longo de toda a rede.

Em sistemas de abastecimento, onde as perdas ao longo da rede se mostram significativas, a aplicação de controle que regule parâmetros tais como vazão e pressão, favorece a economia através da redução da pressão nos momentos de menor consumo. Tendo em vista a redução da vazão nos horários de menor demanda, ou mesmo os vazamentos ao longo da rede.

A escolha do controlador varia conforme as necessidades de manobra ou mesmo as características do sistema. Neste trabalho, optou-se com um controlador baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA). As RNA são modelos computacionais fundamentados no funcionamento do sistema nervoso dos seres vivos, constituídos por neurônios artificiais do tipo não lineares, que geram saídas contínuas e tem como função coletar os sinais de entrada, processá-los e fornecer uma resposta, de acordo com a função de ativação inerente (Silva et al, 2010). Na evolução dos sistemas de controle destacam-se, a criação de um controlador com base na Lógica Fuzzy, lógica essa, capaz de definir um conjunto de regras sem a necessidade de receber valores exatos. A divulgação completa deste trabalho ocorreu no ano de 1965 com a publicação de Zadeh. O sistema de controle adaptativo criado em 1973 por Aström e Wittenmark, conhecido por algoritmo de Variância Mínima (VM). Outro sistema de controle desenvolvido e que foi amplamente utilizado no âmbito industrial foi o PID (Proporcional, Integral e Derivativo), que segundo ASTRÖM e WITTENMARK (1995) este controlador possui facilidade operacional e um custo reduzido.

BEZERRA, S. T. M. et al (2015), realizaram um estudo sobre a relação entre o uso de inversores de frequência na redução do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento de água. No intuito de controlar a altura manométrica de uma bancada experimental que simula um sistema de abastecimento, foi utilizado um controlador a partir da lógica fuzzy para alterar a velocidade de rotação dos conjuntos motor bomba do sistema. Os testes foram realizados em duas etapas, a primeira foi acionada o sistema com o intuito de atender a variação da demanda solicitada sem a utilização do controlador PID. Posteriormente, repetiu-se a mesma simulação com o controlador atuando no sistema. Os resultados obtidos constataram uma redução de 35% do consumo energético do sistema com a utilização do controlador fuzzy.

SILVA, M. J. G. et al (2015) promoveram o controle da pressão de uma bancada experimental que simula um sistema de distribuição de água, a partir da utilização de um controlador adaptativo do tipo Variância Mínima Generalizado (VMG). Como primeira etapa deste trabalho, foi realizada a identificação do sistema através do método dos Mínimos Quadrados Recursivos (MQR). A atuação do controlador ocorreu na alteração da velocidade de rotação do conjunto motor bomba e do ângulo de abertura da válvula proporcional. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência da utilização deste tipo de controlador, obtendo uma redução de 19,2% no consumo de energia elétrica com o sistema atuando nas condições mais desfavoráveis e o erro máximo de 2,12% que equivale a 0,42 mca no controle de pressão.

Além dos sistemas de controle citados, existem os algoritmos evolutivos mais conhecidos como Algoritmos Genéticos, que podem ser utilizados como um otimizador de processos e as Redes Neurais Artificiais, que são algoritmos que tomam como base o funcionamento dos neurônios biológicos. Dependendo da configuração do tipo de algoritmo, as redes neurais podem ser utilizadas para previsão, otimização e controle de processos.

MENEZES FILHO, J. B. et al (2007) projetaram um controlador adaptativo neural com o intuito de realizar o controle de posição de uma mesa de coordenadas de dois graus de liberdade, formada por duas bases que são acionadas por dois motores de corrente contínua, cujos deslocamentos ocorrem num plano horizontal. Na primeira etapa do trabalho se deu o treinamento off-line da rede neural com múltiplas camadas, onde foi utilizado o método dos Mínimos Quadrados Recursivos para estivar os parâmetros da função de transferência de cada base. Na segunda etapa, o controlador neural atua em tempo real, e seu treinamento que ocorre em função da movimentação das bases é realizado a cada instante de tempo. Os resultados obtidos quando o sistema foi excitado por sinais senoidais e por degraus foram satisfatórios, havendo a presença de sobressinais nos primeiros instantes de tempo ou quando a referência a ser seguida era altera.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para validar a metodologia de efficientização da operação de sistemas pressurizados, através do controlador elaborado via redes neurais artificiais, foi desenvolvida e instrumentalizada uma bancada experimental com proporções significativas para simular o abastecimento de água em zonas com topografia distinta. Esse Sistema Automatizado de Distribuição de Água (SADA) possui duas descargas com uma diferença de cotas de 6,0 m, um reservatório apoiado com duas câmaras de 230 L, um conjunto motor-bomba de 3 cv, um *booster* de 1,5 cv, cinco transdutores de pressão, dois medidores de vazão, três válvulas proporcionais e dois inversores que comandam a rotação dos sistemas de impulsão da bancada, conforme pode ser observado na Figura 2.



Figura 2- Foto da rede experimental SADA

O sistema de impulsão principal desse sistema é composto pelo conjunto motor bomba (CMB) que tem a função de pressurizar toda a rede. Além do CMB, o sistema também apresenta um *booster*, instalado na derivação da zona alta, e seu funcionamento varia conforme as variações das demandas. Ao longo da rede estão dispostos cinco transdutores de pressão (PT-1, PT-2, PT-3, PT-4 e PT-5) e dois transdutores de vazão (FT-1 e FT-2) que tem por objetivo monitorar, respectivamente, a pressão e a vazão de serviço,

respectivamente. Neste trabalho, será utilizada apenas a zona de baixa, cujo valor de monitoramento da pressão é dado pelo transdutor PT-3, e o de vazão pelo FT-1.

Para atuar sobre a rede, provocando as interferências necessárias nos parâmetros hidráulicos, será utilizada a válvula proporcional CV-2, localizada nas proximidades do ramal de descarga, que tem por objetivo emular a variação da vazão demandada através da mudança do seu grau de fechamento. Com este propósito foram idealizadas seis faixas de consumo intercaladas e com intervalos de 5° (cinco graus) entre o intervalo de 30° (máximo consumo) e 60° (mínimo consumo).

A leitura dos parâmetros hidráulicos fornecidos pelos sensores e atuadores e a execução de ações de comando sobre as válvulas proporcionais e o conversor de frequência são realizados a partir da comunicação estabelecida entre a placa de aquisição de dados da *National Instruments* e o software supervisor em LabVIEW®.

Para realizar o controle de rotação do rotor do sistema de impulsão principal foi desenvolvida uma programação em LabVIEW® que inclui o algoritmo das redes neurais artificiais. Pretende-se controlar a pressão na entrada da zona abastecida visando a minimização do consumo energético.

As Redes Neurais Artificiais se dividem basicamente em três camadas, a primeira chamada de camada de entrada onde são recebidos e normalizados os sinais de entrada de acordo com a função de ativação utilizada. A segunda camada é conhecida por intermediária, nela ocorre todo o processamento que envolve o neurônio artificial e por último a camada de saída que é responsável pelo resultado final da rede de acordo com os processos que foram realizados nas camadas anteriores. Os tipos de redes diferem em relação a sua arquitetura, ou seja, a forma como os neurônios estão interligados entre si, a organização e formação das camadas, sendo classificadas como redes feedforward de simples e múltiplas camadas, redes recorrentes e redes articuladas (KRIESEL, 2005).

A rede do tipo Perceptron de múltiplas camadas e as redes de base radial são exemplos de redes *feedforward* de camadas múltiplas, esse tipo de arquitetura pode ser utilizada para identificação de sistemas, classificação de padrões, otimização e controle de processos. As redes Perceptron de múltiplas camadas com realimentação (*backpropagation*) e a rede de Hopfield são exemplos de redes com arquitetura recorrente, sendo comumente utilizadas em sistemas dinâmicos para otimização, identificação e controle de processos (SILVA et al, 2010).

Para o presente trabalho, o tipo de rede escolhida foi a Perceptron Múltiplas Camadas (PMC) com arquitetura recorrente, já que pela literatura esse tipo de rede se destaca por representar sistemas que variam no tempo e é amplamente utilizada no controle de processos, ver Figura 2. As entradas da rede neural foram as posições das válvulas, a vazão, a pressão de serviço e a frequência que dirige a rotação do sistema de impulsão. Essas informações são introduzidas na rede neural a fim de treinar e ajustar os pesos de forma que a saída “y” tenha o valor necessário para controlar a pressão.

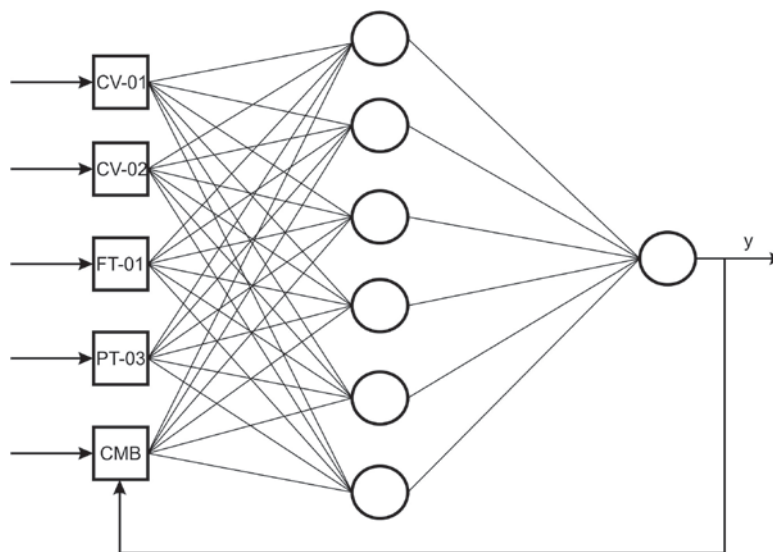


Figura 2 – RNA do tipo *Perceptron* com arquitetura recorrente

Para validar a metodologia proposta o sistema supervisor foi programado para abrir a válvula proporcional (CV-02) em 30°, iniciando em 30° e finalizando aos 60° com intervalos de 5°. Pretende-se acionar e operar o sistema de impulsão com e sem a atuação do controle, comparando os resultados, tanto do ponto de vista hidráulico e elétrico, como do ponto de vista de controle.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi utilizada a bancada experimental (SADA) para validar a metodologia proposta. Primeiramente foi avaliada a eficiência energética do processo diante da comparação entre a ação ou não do controlador desenvolvido. A Figura 3 mostra a operação do sistema de impulsão sem a ação do controlador. Neste experimento a bomba foi operada com frequência constante de 60 Hz. Durante todo o experimento a válvula que simula a variação da demanda fechou e abriu por duas vezes como pode ser observado. As variáveis de estado, pressão e vazão, foram monitoradas e estão dispostas na parte inferior do gráfico. A pressão permaneceu sempre com valores superiores a 20 mca e atingiu a pressão de 25 mca no menor consumo. Em consequência a vazão sofreu alterações significativas durante a operação do sistema. A Tabela 1 dispõe os dados operacionais monitorados, referente à energia consumida em cada ponto de operação conforme demanda solicitada. Nos casos em que o consumo foi mínimo o CE apresentou os maiores valores.

Para o caso da operação com a ação do controlador o gráfico resultante está ilustrado na Figura 4. Neste caso, a variação da demanda foi a mesma, mas a frequência atribuída aos inversores para o controle da bomba foi variável, sendo esta determinada pelo controlador RNA. A pressão foi controlada nos 10 mca durante todo o processo, mesmo quando a válvula mudava de posição o sistema ajustava a frequência fornecida à bomba para que a pressão de serviço permanecesse próximo do valor de referência. A Tabela 2 apresenta os dados operacionais monitorados durante o experimento, semelhante ao caso sem a ação do controle.

Tabela 1: Variáveis resultantes da operação da bancada experimental sem a ação de controle

SEM AÇÃO DE CONTROLE				
CV-02 (Graus)	Potência (kW)	Vazão (m³/h)	Frequência (Hz)	CE (kW/m³)
30	2,3	3,827	60	0,6010
35	2,3	3,831	60	0,6004
40	2,3	3,518	60	0,6538
45	2,1	2,878	60	0,7297
50	2,0	2,249	60	0,8893
55	1,9	1,821	60	1,0434
60	1,8	1,485	60	1,2121
55	1,8	1,487	60	1,2105
50	1,8	1,579	60	1,1400
45	1,9	1,891	60	1,0048
40	2,0	2,402	60	0,8326
35	2,2	3,163	60	0,6955
30	2,3	3,823	60	0,6016
35	2,3	3,817	60	0,6026
40	2,3	3,499	60	0,6573
45	2,1	2,871	60	0,7315
50	2,0	2,232	60	0,8961
55	1,9	1,812	60	1,0486
60	1,8	1,479	60	1,2170
55	1,8	1,477	60	1,2187
50	1,8	1,571	60	1,1458
45	1,9	1,886	60	1,0074
40	2,0	2,401	60	0,8330
35	2,2	3,158	60	0,6966
30	2,3	3,811	60	0,6035

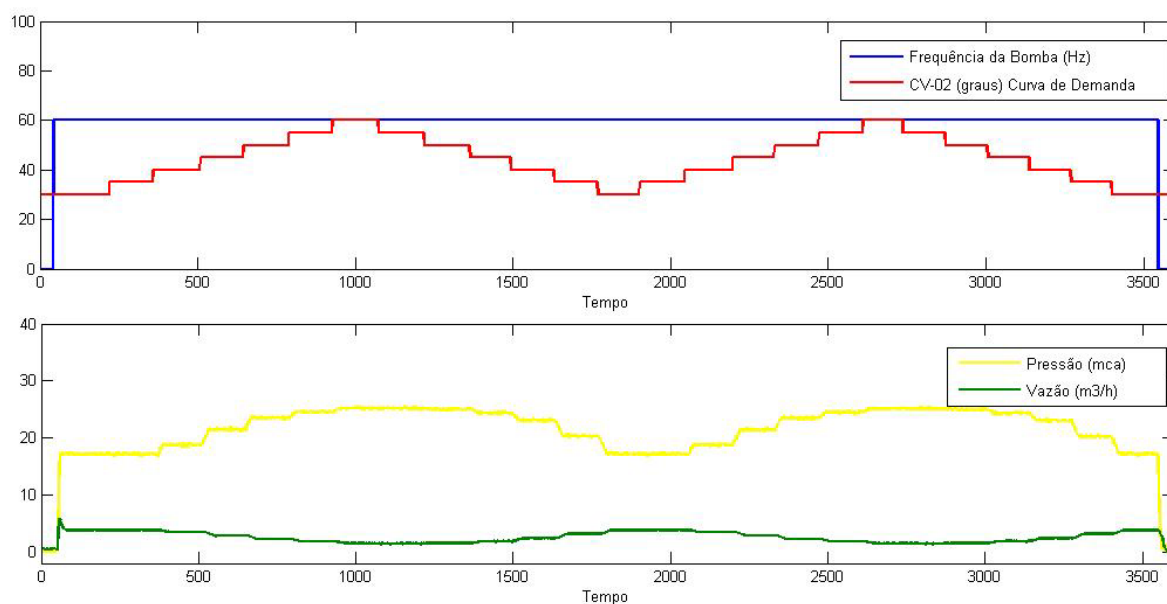


Figura 3 – Operação do sistema de impulsão sem a ação do controlador

Tabela 2: Variáveis resultantes da operação da bancada experimental com controle via RNA.

CONTROLE VIA RNA				
CV-02 (Graus)	Potência (kW)	Vazão (m³/h)	Frequência (Hz)	CE (kW/m³)
30	1,7	4,001	52,22	0,4249
35	1,3	3,292	47,13	0,3949
40	1,0	2,591	42,98	0,3860
45	0,8	2,028	40,35	0,3945
50	0,7	1,574	38,69	0,4447
55	0,6	1,296	37,98	0,4630
60	0,6	1,069	37,47	0,5613
55	0,6	1,077	37,51	0,5571
50	0,6	1,152	37,6	0,5208
45	0,6	1,351	38,11	0,4441
40	0,7	1,703	39,06	0,4110
35	0,8	2,261	41,35	0,3538
30	1,1	2,941	44,97	0,3740
35	1,1	2,947	44,12	0,3733
40	1,0	2,577	42,93	0,3880
45	0,8	2,015	40,33	0,3970
50	0,7	1,578	38,74	0,4436
55	0,6	1,291	37,95	0,4648
60	0,6	1,073	37,49	0,5592
55	0,6	1,078	37,49	0,5566
50	0,6	1,149	37,63	0,5222
45	0,6	1,348	38,07	0,4451
40	0,7	1,703	39,15	0,4110
35	0,8	2,271	41,42	0,3523
30	1,1	2,928	44,81	0,3757

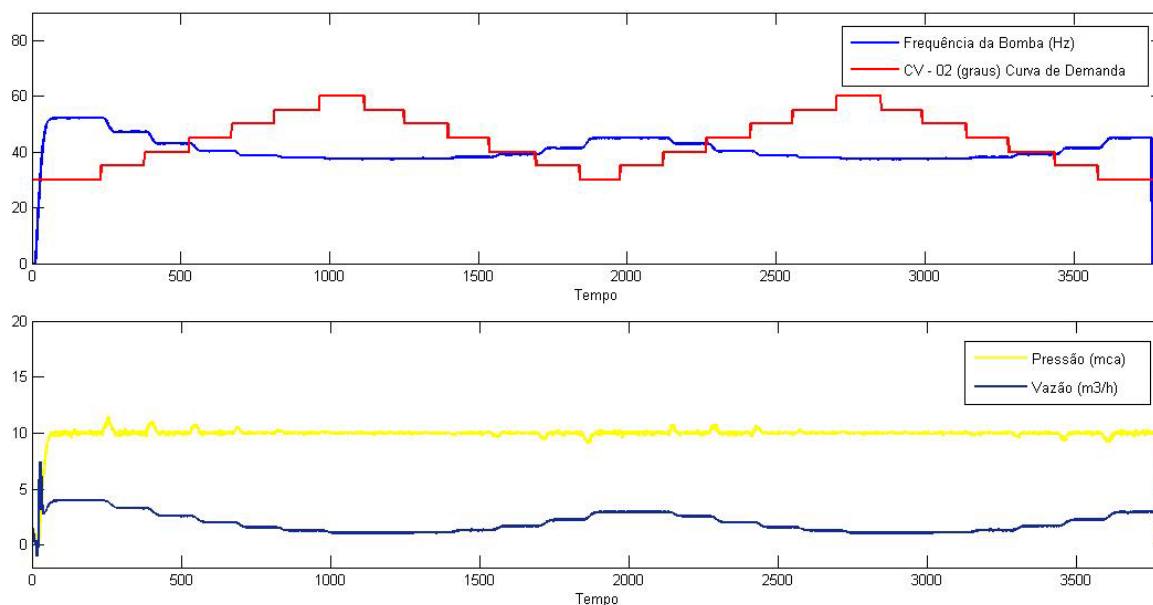


Figura 4 – Operação do sistema de impulsão sem a ação do controlador

Ao compararmos os resultados, com base no indicador do consumo específico de energia, em todos os pontos operacionais houve uma redução significativa, o que demonstra que, além do controle das pressões o sistema de controle atua, também, na otimização energética da operação da bancada experimental. A Figura 5 mostra a diferença do CE, dos casos estudados, em cada ponto de operação. Todos os pontos do experimento com

controle apresentaram valores do CE inferiores aos registrados para o caso sem controle, principalmente quando o sistema operava na vazão mínima. A economia proporcionada pela ação de controle nos casos estudados foi, em média, de 60%. Em alguns pontos operacionais a economia chegou a ser de 68%.

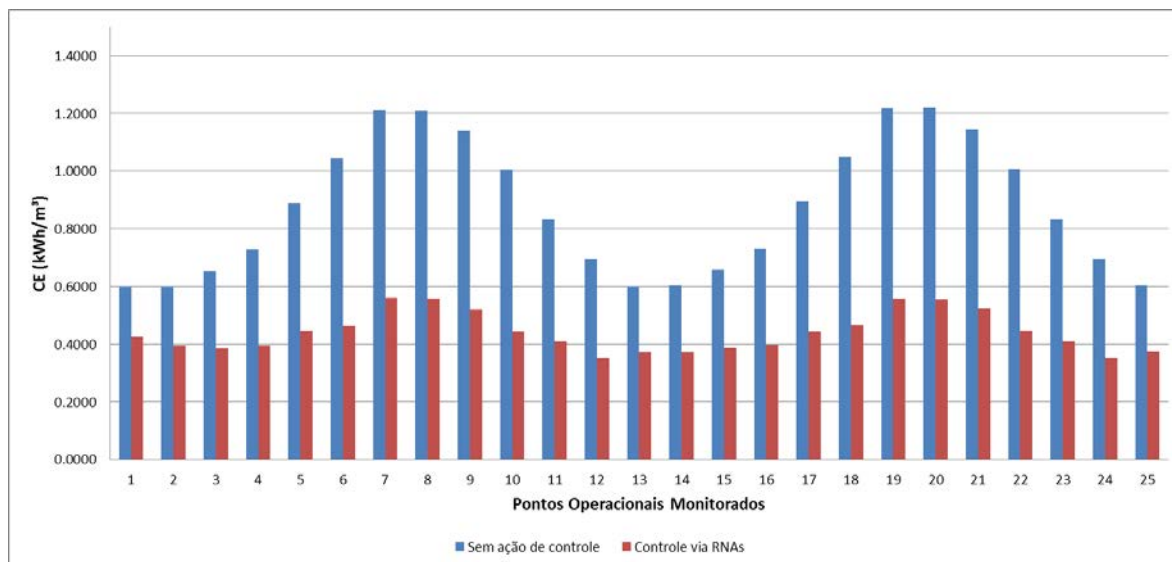


Figura 5 – comparação da ação de controle em análise do consumo específico de energia elétrica

CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, pode-se concluir que o sistema de controle, via redes neurais artificiais, conseguiu realizar o controle das pressões ao longo de todo o experimento, mesmo diante das perturbações geradas com a mudança do ângulo da válvula (CV-02) que simula a demanda abastecida.

Todos os pontos do experimento com controle apresentaram valores do CE inferiores aos registrados para o caso sem controle, principalmente quando o sistema operava na vazão mínima. A economia proporcionada pela ação de controle nos casos estudados foi, em média, de 60%. Em alguns pontos operacionais a economia chegou a ser de 68%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), do Brasil, pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- _____. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos serviços de água e esgotos de 2013. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 5 de Abril de 2016.
- TSUTIYA, M. T. Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. São Paulo: ABES – Seção São Paulo, 2006.
- SILVA, I. N., SPATTI, D. H., FLAUZINO, R. A. Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas. ISBN: 978-85-88098-53-4, Editora Artliber, São Paulo, Brasil, 2010.
- ASTRÖM, K. J. & WITTENMARK, B., On self-tuning regulators. Automatica, Vol. 9, 1973.
- ASTRÖM, K. J. & WITTENMARK, B. Adaptive Control. Ed. Addison Wesley Publishing, 2ª edição, 1995.
- BEZERRA, S. T. M., SILVA, S. A., GOMES, H. P., SALVINO, M. M., Energy savings in pumping systems: application of a fuzzy system. Ciência & Engenharia, v. 24, n. 1, p. 71 – 78, 2015.



7. SILVA, M. J. G., ARAÚJO, C. S., BEZERRA, S. T. M., SILVA, S. A., SOUTO, C. R., GOMES, H. P. Sistema de controle adaptativo aplicado a um sistema de distribuição de água com ênfase na eficiência energética. Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 20, pp. 405 – 413., 2015.
8. MENEZES FILHO, J. B., SILVA, S. A., OLIVEIRA, B. S., RIUL, J. A., Controlador adaptativo neural para mesa de coordenadas X-Y. Revista Ciências Exatas, Taubaté, Vol 13, n. 1, pp. 97 – 103, 2007.
9. KRIESEL, D., A Brief Introduction to Neural Networks. Bonn, Germany, 2005.