

XI-014 - APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Emmanuel Guerra de Barros Filho⁽¹⁾

Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica e Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Doutorando do Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica da UFPB. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB).

Saulo de Tarso Marques Bezerra

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Professor da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Simplicio Arnaud da Silva

Engenheiro Eletricista, Mestre em Engenharia Elétrica e Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Professor Associado da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Arthur Brito Nunes Diniz

Graduando em Engenharia Civil na Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Amanda Nepomuceno Targino de Arruda

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Endereço⁽¹⁾: Av. Oceano Índico, 400, apto 501, Intermares, Cabedelo, PB. E-mail: manoguerra@gmail.com.

RESUMO

As empresas de abastecimento de água operam seus sistemas com bombeamento direto, geralmente, por meio do estrangulamento de válvulas. Frequentemente, a experiência dos operadores determina o acionamento/desligamento das bombas e/ou estrangulamento dos registros em função da oscilação da demanda imposta, o que resulta com frequência em uma baixa eficiência hidráulica e energética. Nas últimas décadas, o uso de inversores de frequência em bombas centrífugas acionadas por motores de indução vem se disseminando, pois estes equipamentos permitem o controle da vazão e da pressão por meio da variação da rotação da bomba. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle inteligente, baseado em Redes Neurais Artificiais – RNA, para a operação de sistemas de bombeamento que operam com inversores de frequência. O sistema desenvolvido é do tipo direto, uma vez que o controlador foi neural, mas os seus pesos sinápticos foram ajustados diretamente com base nos parâmetros da planta. Os experimentos emularam um sistema de distribuição de água alimentado por dois conjuntos motor-bomba associados em paralelo. Os resultados apontaram que o desempenho do sistema de controle desenvolvido foi satisfatório, indicando que este pode ser implementado em outros sistemas de bombeamento similares.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética, Redes Neurais Artificiais, sistema de abastecimento de água.

INTRODUÇÃO

A necessidade do controle otimizado dos processos está cada vez mais presente nos dias atuais. No atual cenário do setor de saneamento, é imprescindível que o fornecimento de água potável seja efetuado com confiabilidade e qualidade, tal que satisfaça os anseios dos consumidores e atenda satisfatoriamente a legislação imposta. A operação e manutenção dos sistemas de abastecimento de água têm sido alvo frequente de pesquisas destinadas ao desenvolvimento de novas tecnologias e metodologias de automação para melhorar a eficiência. A automação permite aos técnicos responsáveis pelo abastecimento de água o melhor monitoramento, controle e interferência dos parâmetros dos dispositivos do sistema.

Certos sistemas de abastecimento de água requerem algum tipo de controle de vazão e pressão na cabeceira da rede de distribuição. Este controle é, geralmente, necessário quando os sistemas de bombeamento fornecem água diretamente à rede hidráulica, isto é, quando não há reservatórios de armazenamento. As alternativas mais comuns para controlar a vazão/pressão na saída dos sistemas de bombeamento são: a) estrangulamento de válvula na entrada da rede hidráulica, b) controle *on/off*, c) *by-pass* e d) alteração da velocidade de rotação da(s) bomba(s). No Brasil, a maioria dos sistemas de bombeamento adota o controle de fluxo por meio do fechamento parcial de válvulas com base na demanda. Na prática, o controle é alcançado através da adição de perda de carga localizada, deslocando o ponto de operação das bombas (BEZERRA *et al.*, 2015). Wood e Reddy (1994) afirmam que esta opção é o mesmo que “dirigir um carro com o freio de mão acionado”.

Para os sistemas de bombeamento que requerem regulação de vazão e pressão, a melhor solução técnica e econômica é o controle de velocidade da bomba (BEZERRA *et al.*, 2015). Verifica-se que, no caso citado, a adoção de inversores de frequência é o mais importante mecanismo para o controle operacional de bombas. Estes têm por finalidade regular a velocidade de rotação das bombas por meio da variação da frequência e tensão elétrica de alimentação dos motores elétricos. Gomes (2009) apresenta que o emprego adequado desse equipamento evita o bombeamento com pressões excessivas, que provocam avarias nas tubulações e desperdício de água, e dispensam o uso de reservatórios elevados, responsáveis por elevados custos de implantação e manutenção. O excesso de pressão tem influência direta no rompimento de tubulações e no volume de água perdido devido aos vazamentos (perdas reais). Segundo Bezerra e Cheung (2013), a diminuição de 10% na pressão implica na redução de aproximadamente 12% no volume perdido.

Diante da perspectiva apresentada, as estações elevatórias com dois ou mais conjuntos motor-bomba possuem diversas opções de operação para atender à demanda do sistema. A utilização de inversores de frequência nesse contexto é um fator a mais que tem grande influência na operação e pode reduzir o consumo de água e energia. Regis *et al.* (2014) desenvolveu um controlador do tipo PID (Proporcional Integral Derivativo) convencional para controlar a pressão de uma bancada experimental, que emula o abastecimento de duas zonas com topografias diferentes. O controlador atuou nos inversores de frequência do conjunto motor bomba e do *booster*, além de determinar o ângulo de abertura de uma válvula redutora de pressão. Os resultados obtidos apontaram que, com a utilização do controlador, houve uma economia de energia de 29% na máxima demanda e de 49,33% na mínima demanda, se comparado com a mesma situação sem controle.

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de um sistema de controle inteligente, baseado em Redes Neurais Artificiais – RNA, para a operação de sistemas de bombeamento que operam com inversores de frequência. O sistema desenvolvido é do tipo direto, uma vez que o controlador foi neural, mas os seus pesos sinápticos foram ajustados diretamente com base nos parâmetros da planta. Justifica-se a realização desta pesquisa pelo fato de a utilização de inversores de frequência nos conjuntos motor-bomba de sistemas de abastecimento de água ainda ser, relativamente, uma tecnologia pouco empregada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar a eficiência do sistema de controle desenvolvido, foi projetada e implantada uma bancada experimental totalmente instrumentalizada (Figura 1), capaz de emular o bombeamento em diversas configurações/cenários. Dessa forma, é possível o monitoramento dos parâmetros hidráulicos, característicos de uma rede de distribuição de água (pressão e vazão), e dos parâmetros elétricos dos motores (tensão, potência e corrente elétrica).

Como se trata de um modelo experimental, o sistema funciona em circuito fechado, onde seu ponto de descarga coincide com o reservatório de abastecimento, caracterizando-se, portanto, de nível fixo. A bancada é composta por: reservatório apoiado, dois conjuntos motor-bomba (CMB), dois inversores de frequência, cinco transdutores de pressão (PT), dois transdutores de vazão (FT), uma válvula de controle (CV), uma fonte de alimentação, uma interface de aquisição de dados e um computador portátil. Para simulação da variação da demanda ao longo do dia, foi utilizada uma válvula proporcional (CV).



Figura 1: Bancada Experimental.

A pressão de operação é a variável de controle do sistema. O controle de pressão é realizado por meio da variação da velocidade de rotação dos conjuntos motor bomba, buscando a minimização do consumo específico de energia (CE), obtido pela razão entre a potência elétrica (kWh), fornecida pelo conversor de frequência, e a vazão (m^3/h). O sistema de controle poderá ainda utilizar apenas uma bomba, caso o algoritmo de decisão indique que esta é a alternativa mais econômica para a demanda solicitada. Isso poderá promover uma economia energética significativa ao sistema.

Os benefícios diretos e indiretos são enormes no controle da pressão de sistemas de distribuição, pois, além de reduzir o consumo de energia elétrica e o volume perdido por vazamentos, também diminui as rupturas ou manutenções da rede. Operar o sistema com o CE mínimo implica na eficientização dos sistemas elevatórios, redução dos custos com energia e melhora no tempo de vida dos elementos hidromecânicos.

Devido à complexidade do funcionamento de um sistema de abastecimento de água e a ampla pesquisa na área de Sistemas de Controle utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA), esse foi o tipo de controlador adotado para automatizar a bancada experimental em estudo. O sistema de controle foi desenvolvido em Labview®, que permitiu a automação do sistema (Figura 2), a alteração das condições de operação da bancada e o ajuste dos parâmetros neurais dos controladores.

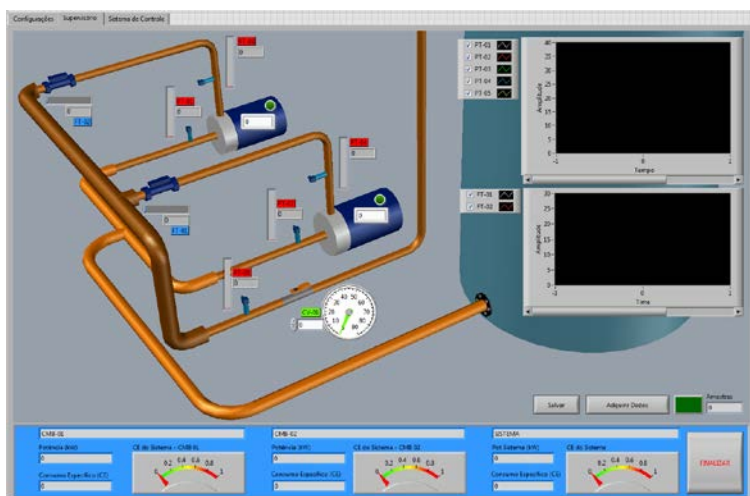


Figura 2: Supervisório da Bancada Experimental.

Segundo Silva *et al.* (2010), as RNA são definidas como modelos computacionais inspirados no funcionamento do sistema nervoso dos seres vivos. As unidades processadoras que constituem essas redes são denominadas de neurônios artificiais. Essas unidades são não lineares, e funcionam da seguinte forma: recebem os sinais de entrada advindos do sistema, em seguida processam esses sinais e de acordo com a função de ativação, presente nesse processamento, tem como resultado um sinal de resposta. Esses sinais de resposta, também conhecidos por sinais de saída se apresentam de forma contínua. A Figura 3 apresenta a arquitetura da rede neural utilizada neste trabalho. Esta rede é composta por quatro neurônios na camada de entrada, uma única camada intermediária contendo dez neurônios e um neurônio na camada de saída.

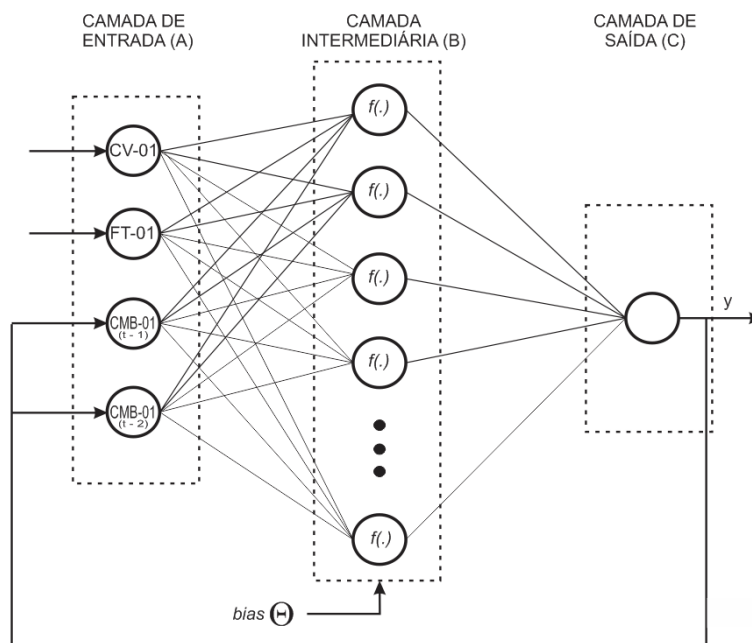


Figura 3: Arquitetura da rede neural.

Os sinais de entrada utilizados foram os valores do ângulo da válvula proporcional (CV-01), que controla a demanda, os valores da vazão enviados pelo transdutor de vazão (FT-01), e o último e penúltimo valor fornecido da frequência do conjunto motor bomba (CMB-01), a cada instante de tempo. O valor atribuído para o bias foi de 1 (um) e a função de ativação escolhida foi a tangente hiperbólica para os neurônios da camada intermediária e função linear para os neurônios das camadas de entrada e de saída.

A rede apresentada na Figura 2 é denominada de Rede Perceptron Multicamadas (PMC) com saídas recorrentes às entradas. Neste caso, alguns sinais de entrada serão compostos por valores passados dos sinais de resposta, a partir da realimentação dos sinais produzidos em instantes anteriores. Assim, a rede tem a capacidade de “relembrar” os valores dos sinais de saída passados, para produzir uma resposta atual ou futura.

Quando a rede neural apresenta este tipo de arquitetura, onde apenas os sinais de saída da rede são realimentados às suas entradas é conhecida por rede de Elman ou rede recorrente simples (ELMAN, 1990). Este tipo de rede neural pode ser utilizado como estimador de comportamento futuro de sistemas dinâmicos e possui uma grande aplicabilidade na área de sistemas de controle (SILVA, 2010).

RESULTADOS ESPERADOS

Inicialmente, realizaram-se experimentos somente com a imposição da variação da demanda na bancada. O sistema de controle optou pela escolha de utilizar uma ou duas bombas e, ainda, definiu a frequência de alimentação dos motores. O processo de tomada de decisão do algoritmo se baseou na eficiência energética do sistema.

A variação da demanda foi realizada por meio da válvula proporcional CV-01, instalada após o barrilete de recalque. Para o experimento apresentado neste trabalho, inicialmente a válvula CV-01 estava fechada (60°), representando a demanda mínima, e a cada 60 segundos, foi imposta uma diminuição no ângulo de abertura de 10° , até atingir a demanda máxima (10°). Em seguida, o ângulo de abertura da válvula retorna para a posição de demanda mínima seguindo a mesma metodologia.

As Figuras 3 a 5 apresentam os resultados obtidos em um dos experimentos. O acionamento do sistema foi realizado na mínima demanda e ajustou, satisfatoriamente, a pressão de serviço em 10 mca (valor de referência). Esse ajuste levou 8 segundos e não apresentou ultrapassagem do sinal de referência (*overshoot*). O controle também repercutiu na minimização dos transientes hidráulicos e na redução da corrente de partida dos conjuntos motor-bomba. Nos demais experimentos realizados, as variáveis apresentadas nas figuras apresentaram o mesmo padrão de comportamento.

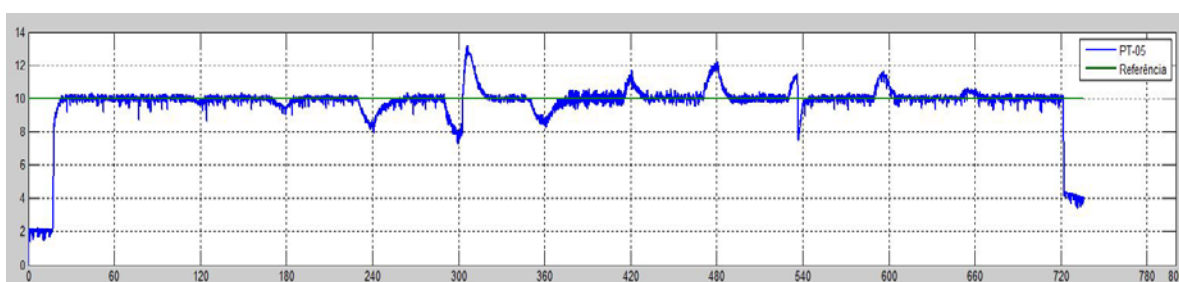


Figura 3: Comportamento da pressão para o sistema operando sob a ação do controlador.

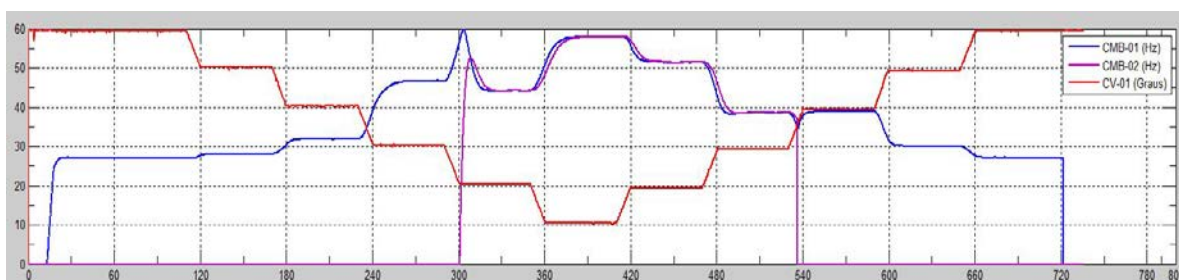


Figura 4: Comportamento dos atuadores para o sistema operando sob a ação do controlador.

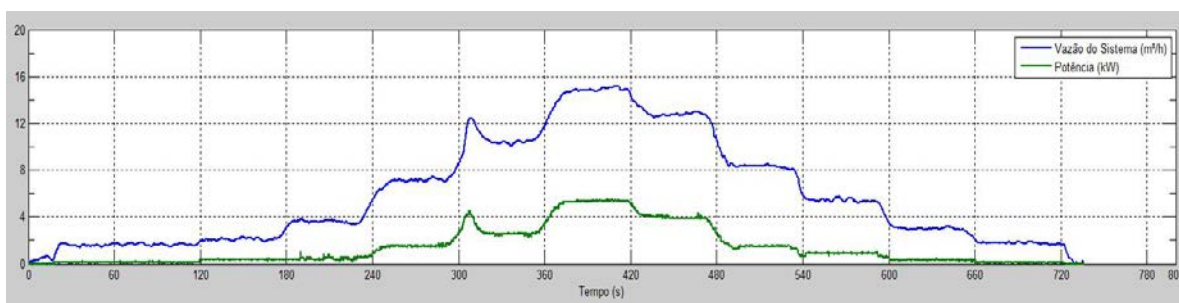


Figura 5: Comportamento da vazão e da potência para o sistema operando sob a ação do controlador.

Durante a alteração da demanda, o sistema foi perturbado, alterando a pressão de serviço em virtude do aumento ou redução da vazão demandada. Nesse processo, o controlador atuou, eficientemente, para ajustar a pressão de serviço à sua referência. Vale ressaltar a perturbação proporcionada pelo acionamento do segundo conjunto motor-bomba (300 seg.); neste ponto, o controlador decidiu que os dois conjuntos motor-bomba deveriam atuar em paralelo. A frequência atribuída aos conjuntos sofreram alterações e o sistema de controle

encontrou o ponto mais eficiente quando suas rotações estavam semelhantes. Isso corrobora com a informação da literatura em que bombas em paralelo devem ser operadas com as mesmas características operacionais. As maiores perturbações ocorreram na máxima demanda, onde a pressão de serviço atingiu o valor de 13,2 mca e em todos os casos o sistema de controle mostrou eficiência na atuação do controle da pressão. Aos 540 segundos, com a redução da vazão demandada, o sistema de controle decidiu por desligar um dos conjuntos motor-bomba deixando a partir de então o sistema operar apenas com uma bomba.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

O sistema de controle proporcionou uma partida suave e, ao mesmo tempo, precisa, ajustando a pressão de serviço em 10 mca conforme definição prévia experimental. Esse ajuste levou 8 segundos e não apresentou ultrapassagem do sinal de referência.

Diante da experiência realizada e da atuação do controlador, pode-se concluir que o sistema de controle atuou de forma eficiente em todas as etapas do experimento. O que permitiu o fornecimento da vazão demandada com uma pressão de serviço controlada em 10 mca. Esse controle quando atuante em um sistema real pode melhorar a operação dos sistemas de impulsão, desde seu acionamento na minimização dos transientes hidráulicos como na escolha do ponto de operação energeticamente econômico.

Recomenda-se, em trabalhos futuros, comparar essa técnica de controle com outros sistemas, de maneira a avaliar o ganho energético e operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. Perdas de água: tecnologias de controle. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013. 220p.
2. BEZERRA, S. T. M.; SILVA, S. A. da; GOMES, H. P.; SALVINO, M. M. Energy savings in pumping systems: application of a Fuzzy System. *Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)*, v. 24, n. 1, p. 71-78, 2015.
3. ELMAN, J. L. Finding structure in time. *Cognitive Science*, v. 14, p. 179-211. 1990.
4. GOMES, H. P. (Org.) *Sistemas de Bombeamento - Eficiência Energética*. 1ª ed. João Pessoa: Editora Universitária - UFPB. 2009. 460p.
5. REGIS, L. P.; MENDONÇA, K. H.; BARROS FILHO, E. G.; BEZERRA, S. T. M.; SILVA, S. A.; GOMES, H. P. Aplicação de um controle PID na operação de sistemas de distribuição de água. In: XIII Simpósio Iberoamericano de redes de Água, Esgoto e Drenagem. Fortaleza, Brasil. 2014.
6. SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINHO, R. A. *Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas*. São Paulo: Editora Artliber. 1ª Edição. 2010.
7. WOOD, D. J.; REDDY, L. S. Control de bombas de velocidade variable y modelos en tiempo real para minimizar fugas y costes energéticos. *Curso: Mejora del Rendimiento y de la Fiabilidad en Sistemas de Distribución de Agua*, Valencia, Spain, p. 173-207, 1994.