

APLICAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Anne Caroline Linhares Monteiro(*), Arthur Brito Nunes Diniz, Laís Régis Salvino, Kamilla Henrique Mendonça, Heber Pimentel Gomes.

*Universidade Federal da Paraíba. anneclmonteiro@hotmail.com

RESUMO

Nas últimas décadas, o adensamento populacional ocorrido nos centros urbanos provocou alterações no padrão de consumo e no perfil energético dos sistemas de distribuição de água. Essas modificações exigem, por parte das companhias de abastecimento, novos esforços no âmbito técnico, financeiro e operacional voltados à proposição de estratégias de gestão que priorizem a eficiência hidroenergética do sistema. Entre as técnicas empregadas para esta finalidade, a setorização das redes de abastecimento em subsetores piezometricamente semelhantes e o gerenciamento dos parâmetros hidráulicos, por meio de controladores automáticos compreendem mecanismos robustos para aferir esses resultados. O objetivo deste estudo foi desenvolver um controlador PID, aplicável a redes setorizadas e automatizadas de distribuição de água, capaz de controlar a pressão de serviço em níveis fixos pré-estabelecidos, independentemente da vazão requerida. O controle da pressão, nesse contexto, além de conferir maior confiabilidade ao processo, minimiza os gastos energéticos de bombeamento e, conseqüentemente, os custos de operação. A rede experimental utilizada na implementação do sistema de controle PID é constituída por um conjunto motobomba e um *booster*, acionados por conversores de frequência, além de transdutores de pressão e vazão, que monitoram as variáveis hidráulicas. Para avaliação das vantagens proporcionadas pela automação do sistema foram realizados testes, nos quais a rede foi submetida a dois cenários de operação na condição de atender às variações de demanda do sistema. Nos testes realizados com o sistema de controle PID as pressões de serviço foram controladas sob os valores pré-fixados (10 e 15 mca, para a zona baixa e zona alta, respectivamente), enquanto no sistema sem utilização do controlador, as pressões oscilaram continuamente com a variação da demanda, chegando a atingir 26,1 mca, na zona baixa, e 34,0 mca, na zona alta, durante o período de consumo mínimo. A partir dos resultados obtidos constatou-se que a utilização do controlador PID promoveu uma redução 67,95% no consumo de energia elétrica. Com base nos parâmetros hidráulicos e elétricos observados comprovou-se a eficiência do sistema de controle e sua significativa contribuição na promoção de eficiência energética em sistemas de abastecimento de água.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência Energética, Sistemas de Abastecimento de Água, Controlador PID, Automação.

INTRODUÇÃO

O processo de modernização que originou a atual sociedade urbano-industrial produziu amplas mudanças no perfil energético e no padrão de consumo da sociedade. A industrialização e a urbanização criaram novas necessidades e alertaram para uma postura racional quanto ao uso dos recursos naturais e das matrizes energéticas, cujas demandas têm crescido acentuadamente nas últimas décadas. A escassez dos recursos hídricos e o aumento do consumo de energia elétrica são reflexos deste cenário.

Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos – WWDR4 (2012) estima-se que o número de habitantes de cidades sem abastecimento de água de qualidade nem saneamento tenha crescido cerca de 20% desde 2000. Outro dado que chama atenção diz respeito à expressiva parcela que os gastos com energia elétrica assumem no orçamento das companhias de abastecimento de água; estudos realizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – (SNIS, 2014) revelam que esta é a segunda maior fonte de despesas das companhias.

Em contrapartida, Ramos et al. (2012) afirmaram que o consumo de energia elétrica, na maioria dos sistemas de abastecimento de água em todo o mundo, poderia ser reduzido em pelo menos 25%, por meio de melhorias de eficiência energética, o que evidencia a importância do desenvolvimento de modelos que definam novas estratégias operacionais, sobretudo nas estações de bombeamento.

A falta de planejamento na implementação e expansão dos sistemas de abastecimento é um dos fatores responsáveis pela precariedade da distribuição de água e das constantes falhas na operação do sistema que, por vezes, apresenta-se com pressões e vazões deficientes (FONSECA, 2011). A demanda de água acima do previsto gera alterações no comportamento hidráulico da rede, e uma das conseqüências é a diminuição das pressões manométricas nos pontos de consumo mais distantes e/ou com topografia desfavorável, o que torna o fornecimento de água deficitário nesses pontos.

A utilização de estações de bombeamento com capacidade elevada, como alternativa para contornar a pressão insuficiente, em pontos específicos da rede, é possível, mas não compreende uma saída viável e nem eficaz. A solução mostra-se onerosa, visto que promove o aumento da demanda de energia elétrica, decorrente do funcionamento de grande número de motores, e ineficaz, uma vez que gera excesso de pressão em alguns pontos da rede.

Na operação de sistemas de abastecimento de água, o principal objetivo a ser alcançado é o atendimento das demandas, com mínimo custo e máximo benefício, garantindo confiabilidade ao sistema. Assim, para que esses problemas sejam minimizados é de fundamental importância o conhecimento acurado das operações de abastecimento, a partir do qual é possível tomar decisões para o aprimoramento na gestão dos processos. Segundo Bezerra (2009), para que ocorra efetivamente o controle operacional se faz necessário, entre outros, a setorização do sistema de distribuição de água e a utilização de bombas com velocidade de rotação variável.

O fracionamento da rede de abastecimento em zonas com comportamento análogo do plano de pressão, ou seja, a sua setorização assegura o equilíbrio hidráulico do sistema, de modo que as pressões ajustem-se à máxima pressão estática (50 mca) e à mínima pressão dinâmica (10 mca) admitidas pela norma técnica NBR 12218 (1994) e evita desperdícios energéticos. Associado à setorização da rede, atuadores, como válvulas redutoras de pressão (VRP's) e *boosters*, podem ser integrados ao sistema, de forma isolada ou em conjunto, para auxiliar no controle piezométrico dos setores.

A utilização de conversores de frequência em estações elevatórias permite variar a velocidade de rotação do conjunto motobomba, de acordo com a demanda de água exigida para a rede de abastecimento. Desta forma, visando minimizar o custo energético de bombeamento deve-se regular o sistema de forma a reduzir ao máximo a velocidade de rotação dos conjuntos de impulsão, garantindo, concomitantemente, o controle das pressões nas diferentes zonas de consumo (CARVALHO, 2012).

Para gerir as novas estratégias de gestão, monitorar os setores piezométricos e garantir a correta utilização de conversores de frequência e *boosters*, a alternativa que garante maior segurança e eficiência é a automação dos serviços de abastecimento, através da implementação de controladores automáticos nas unidades que compõem a rede de distribuição. De fato, sistemas de abastecimento automatizados são hábeis a monitorar e controlar, em tempo real, os diversos parâmetros característicos de uma rede, o que possibilita o aumento da qualidade dos processos, maior confiabilidade das informações e a redução dos custos de produção.

Um sistema de controle automático é composto por sensores (transdutores de pressão e vazão), controladores e atuadores (válvulas, conjunto motobomba, *booster*) relacionados de maneira a gerir e regular a si mesmo ou a outros processos. Nos sistemas de malha fechada o sinal de saída possui efeito direto na ação do controle, uma vez que seu valor é medido e comparado ao valor de referência desejado. A diferença entre eles, conhecida como erro, é continuamente alimentada em um controlador, o qual, por meio da execução algorítmica de um programa, efetua o cálculo para ajuste e correção destes parâmetros até que esta defasagem tenda a zero. A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.

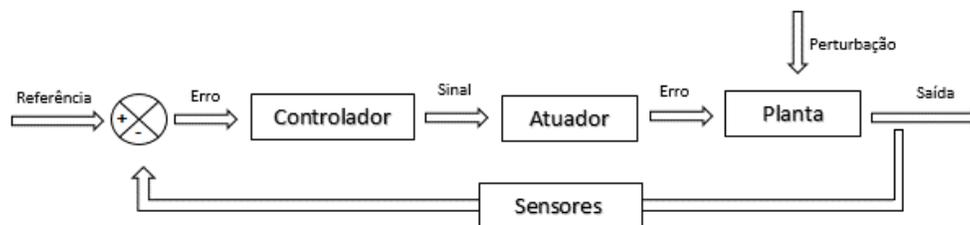


Figura 1: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada. Fonte: Autora do Trabalho.

Nos sistemas de controle, mais de 95% dos laços envolvidos utilizam a lógica PID - *Proporcional Integral Derivativo*. Este algoritmo destaca-se pela sua simplicidade e eficiência, em particular, no controle de processos em que as dinâmicas dominantes são até de segunda ordem e a performance requerida dispensa ações complexas (ASTROM e HAGGLUND, 1995).

Segundo Campestrini (2006), o controlador PID é o mais utilizado em sistemas de controle realimentados. Isto se justifica pela sua fácil implementação, além do baixo custo, robustez e versatilidade, com capacidade de fornecer comportamentos transitórios e de regime permanente satisfatórios para uma grande variedade de processos encontrados na indústria, o que conseqüentemente promove a diversidade de aplicações em sistemas de controle.

A interface entre o operador e a planta sob a qual atua um controlador automático é feita através de um Sistema de Supervisão e Controle cuja função é monitorar os sensores, controlar os atuadores, registrar os dados e identificar eventuais defeitos que porventura venham a ocorrer. Um dos *softwares* que merece destaque na composição de programas supervisórios é o LabVIEW®, desenvolvido pela *National Instruments*, um programa computacional que faz uso de uma linguagem de programação gráfica, conhecida como linguagem G.

Dado o exposto, observa-se que são variadas as ferramentas disponíveis que se propõem a melhorar as condições de abastecimento de água e eliminar os gastos desnecessários por parte das companhias de distribuição. Assim, cabe às empresas realizar investimentos no âmbito técnico e financeiro para buscar novas estratégias operacionais compatíveis às deficiências do sistema e investir nas tecnologias necessárias para implantação dos novos projetos.

Visando alcançar melhores índices de eficiência energética e hidráulica em sistemas de abastecimento de água automatizados e setorizados, este trabalho tem por finalidade estudar a utilização de um algoritmo de controle associado às estações elevatórias de água. Com este fim, um mesmo sistema experimental será operado com e sem o controlador PID, para que a partir dos resultados obtidos seja quantificado o consumo de energia elétrica em cada um deles. Além dos parâmetros elétricos, variáveis hidráulicas como pressão e vazão também serão avaliadas, uma vez que essas têm influência significativa na qualidade e no volume de água fornecidos ao longo das redes de distribuição.

METODOLOGIA

Caracterização da rede piloto SADA

O Sistema Automatizado de Distribuição de Água (SADA) é uma rede experimental construída no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS na Universidade Federal da Paraíba, conforme apresentado na Figura 2.

O escopo central da bancada é simular um sistema de abastecimento, cuja estação elevatória deve, simultaneamente, bombear água para duas regiões com topografias sobremaneira distintas, de forma que o abastecimento do sistema ocorra de maneira eficiente hidráulica e energeticamente.



Figura 2: Foto da rede experimental SADA. Fonte: Autora do Trabalho.

A rede SADA possui dois pontos de consumo representados pelos ramais de descarga RD-1 (zona baixa) e RD-2 (zona alta). A estação elevatória do sistema é composta por um conjunto motobomba principal (CMB) com motor de 3 cv e um conjunto motobomba auxiliar *booster* (BST) com motor de 1,5 cv, posicionado à montante de RD-2, para impulsão de água apenas à zona alta da rede. A adoção do uso conjunto do CMB e BST tem por objetivo evitar as limitações geradas pelo uso de um único sistema de bombeamento, tais como: pressão excessiva na zona baixa da rede e alto consumo de energia elétrica, decorrente do uso de um único conjunto motobomba de maior porte.

Para o acionamento do conjunto motobomba e *booster* são utilizados conversores de frequência. Ao contrário dos sistemas de impulsão com velocidade de rotação fixa, que são dimensionados para atender a situação mais desfavorável de demanda diária, o emprego de conversores de frequência possibilita adequar o funcionamento da estação elevatória às diferentes demandas exigidas ao longo do dia, mantendo as pressões sob controle nas zonas de consumo e evitando os desperdícios energéticos.

Ao longo da rede de distribuição existem sensores e atuadores, dentre os quais: cinco transdutores de pressão (PT-1, PT-2, PT-3, PT-4, PT-5), dois transdutores de vazão (FT-1 e FT-2) e três válvulas proporcionais (CV-1, CV-2 e CV-3). A válvula CV-1 atua como uma VRP, enquanto CV-2 e CV-3 tem por objetivo emular as diferentes demandas horárias, por meio da regulação do seu grau de fechamento.

Os sensores e atuadores se comunicam através de uma placa de aquisição de dados da *National Instruments* com o *software* Supervisório LabVIEW®, garantindo a leitura e o monitoramento de parâmetros elétricos e hidráulicos. A Figura 3 ilustra a rede com seus principais componentes.

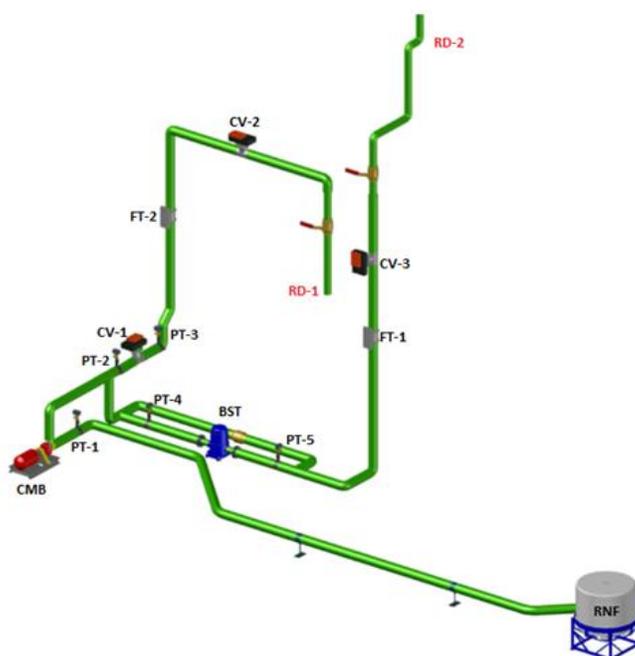


Figura 3: Modelo em 3D da rede SADA. Fonte: Autora do Trabalho.

Desenvolvimento de um sistema de controle PID

Entende-se por controle de processos a execução de ações que garantam a manutenção das variáveis envolvidas dentro de limites pré-estabelecidos. Frente à sua simplicidade e robustez, o controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) tem sido amplamente utilizado.

A lógica PID consiste no cálculo de um valor de atuação sobre o processo, a partir das informações do valor desejado e do valor de saída da variável controlada. Este cálculo baseia-se na composição de três ações distintas: correção proporcional ao erro (P), correção proporcional ao produto erro versus tempo (I) e a correção proporcional à taxa de variação do erro (D). A Figura 4 esquematiza a metodologia empregada pelo controlador PID, através do seu diagrama de blocos.

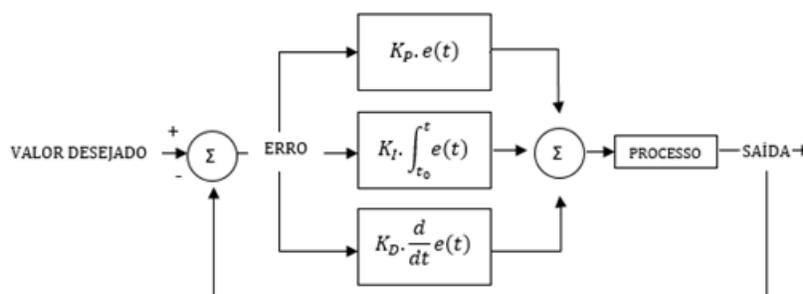


Figura 4: Diagrama de blocos de um controle PID. Fonte: Adaptado de Ogata (2011).

A junção das três parcelas acima é o que ASTROM e HAGGLUND (1995) intitulam como a versão acadêmica do controlador PID, cuja expressão matemática, no domínio do tempo, é explicitada pela Equação 1.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) \quad \text{equação (1)}$$

Onde, $u(t)$ é um valor de atuação sobre o processo, $e(t)$ é o erro entre o valor desejado e o valor de saída da variável do processo, K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integrativo e K_d é o ganho derivativo.

Cada parcela da Equação 1 atua de maneira específica sobre o erro $e(t)$. O controlador proporcional ($K_p \cdot e(t)$) tem como característica alterar o valor da saída linearmente com o sinal de erro. Esta ação é intuitiva e simples, assemelhando-se ao comportamento humano: sempre que se está longe do objetivo faz-se um ajuste maior, e quando se chega perto do alvo, um passo menor é dado (YU, 2006).

Processos simples podem ser satisfatoriamente controlados apenas pela ação do controlador proporcional, porém, em geral, a ação isolada deste controlador é incapaz de fazer com que a variável do processo retorne ao valor desejado, gerando um erro em regime permanente. Desta forma, para corrigir e otimizar o controlador proporcional podem ser utilizadas as ações integral e derivativa.

A principal característica da ação integral ($K_i \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt$) é a eliminação do desvio característico do controle puramente proporcional, ou seja, elimina o erro em regime permanente. Já a ação derivativa ($K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t)$) proporciona a diminuição do tempo de estabilização, minimiza a variação do erro de regime estacionário e restringe elevações maiores do sobressinal (DUARTE FILHO, 2014).

Em se tratando de sistemas de abastecimento, o controle das pressões de serviço, além de conferir maior confiabilidade ao processo, minimiza as perdas físicas de água, gastos energéticos de bombeamento e consequentemente os custos de operação.

A fim de manter as pressões, à montante das zonas de consumo (RD-1 e RD-2), em valores constantes, independentemente da vazão requerida, foi implementado na rede experimental um sistema de controle PID.

A atuação do controlador na rede SADA empregou a seguinte metodologia: a partir da leitura dos valores medidos pelos transdutores de pressão, o controlador PID envia sinais corretivos que atuam sobre os conversores de frequência do conjunto motobomba e *booster*, bem como sobre a VRP, regulando a pressão a 10 mca, no ponto de medição do transdutor PT-3 e 15 mca, em PT-5. Esse processo é continuamente refeito para que, independente das perturbações sofridas pela planta, o valor de saída mantenha-se sobre a referência desejada.

A escolha dos valores de referência respeita as características físicas do sistema experimental e o valor mínimo de pressão dinâmica recomendado pela norma técnica NBR 12218.

Para permitir a aquisição de dados e a integração entre o sistema de controle e a bancada experimental foi utilizado o sistema supervisorio desenvolvido através do software LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*) (Figura 5).

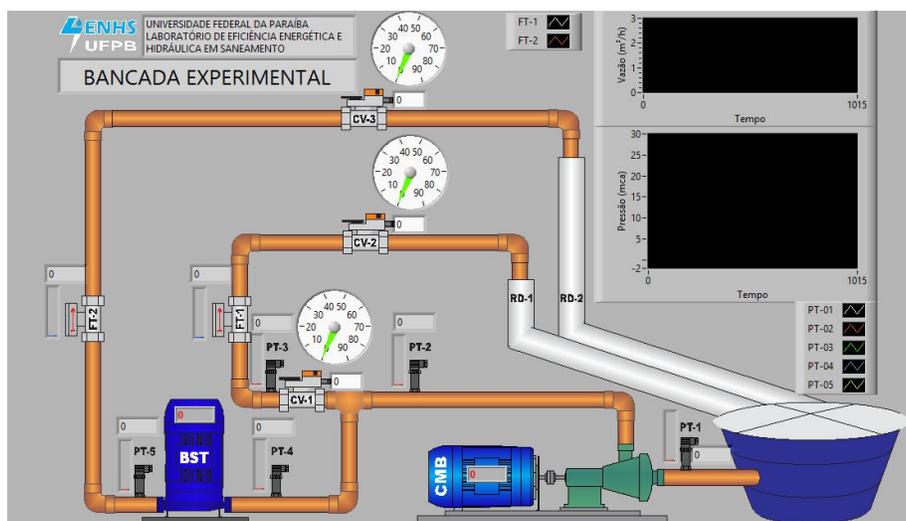


Figura 5: Tela principal do supervisório SADA desenvolvido no LabVIEW®. Fonte: Autora do Trabalho.

O algoritmo PID foi inserido nesta plataforma de programação, sob sua forma digital (Equação 2), obtida através da discretização dos componentes integrais e derivativos da Equação 1 (BÖHM et al. 2005).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot T_0 \sum_{i=1}^t \frac{e(i) + e(i-1)}{2} + K_d \cdot \frac{e(t) - e(t-1)}{r_n} \quad \text{equação (2)}$$

Nessa expressão, T_0 corresponde ao tempo de amostragem, $e(t)$ e $e(t-1)$ representam a diferença entre o valor desejado e o valor de saída da variável do processo no instante t e $t-1$, respectivamente e K_p , K_i e K_d são os ganhos. Para a escolha dos ganhos K_p , K_i e K_d adotou-se como referência os critérios apresentados no Quadro 1.

Tabela 1. Efeitos dos ganhos de controle PID. Fonte: HAFFNER (2013).

Incremento no Ganho	Tempo de Subida	Sobressinal (Overshoot)	Tempo de Estabilização	Erro em Regime Permanente
Proporcional (K_p)	Diminui	Aumenta	Pequena variação	Diminui
Integrativo (K_i)	Diminui	Aumenta	Aumenta	Eliminado
Derivativo (K_d)	Pequena variação	Diminui	Diminui	Pequena variação

Como são utilizados dois objetos de controle (conjunto motobomba e *booster*), neste estudo os valores de K serão definidos por meio de tentativas, até que se obtenha sincronismo entre todos os ganhos.

Determinação de técnica para simulação de consumo variável

A quantidade de água consumida em uma rede pública de abastecimento varia continuamente ao longo do dia e ao longo do ano, sob a influência dos hábitos da população e clima (GOMES, 2009). A Figura 6 mostra a variação da vazão requerida em um sistema de abastecimento ao longo do dia.

Sistemas de abastecimento que fornecem água para setores com topografias sobremaneira distintas, caso não utilizem técnicas específicas de reparo, podem apresentar pressões exageradas, nas zonas baixas da rede, e pressões insuficientes, nas zonas altas. Esse cenário tornar-se ainda mais acentuado em horários de máximo e mínimo consumo, uma vez que, quanto maior a vazão requerida menores serão as pressões disponíveis e vice-versa.

Deste modo, considerando a influência da variação de demanda sobre as pressões de serviço foram utilizadas na rede experimental as válvulas de controle proporcionais, CV-2 e CV-3, com objetivo de simular mudanças no consumo. Estas válvulas estão localizadas próximas aos ramais de descarga das zonas baixa e alta, respectivamente.

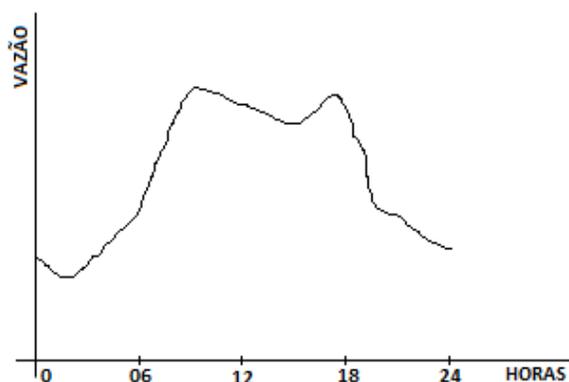


Figura 6: Curva de consumo médio diário. Fonte: Gomes (2009).

A metodologia utilizada na realização dos testes consiste na idealização de cinco faixas de consumo representadas cada qual por um ângulo específico de fechamento da válvula proporcional. As faixas estão intercaladas de 10° em 10° entre o intervalo de 30° e 70°. A posição de 30° representa o horário de consumo máximo, ou seja, a situação na qual as pressões serão as mínimas possíveis, enquanto a posição de 70° está relacionada ao instante de menor consumo, na qual as pressões serão máximas.

A faixa de variação de fechamento das válvulas adotada (30°-70°) considera um fator multiplicativo 3 entre a demanda máxima e a mínima fazendo referência a razão entre os coeficientes da hora de maior consumo (1,5) e de vazão mínima noturna (0,5), habitualmente utilizados.

Para a realização dos testes foi definido um intervalo de 30 segundos para intercalação das faixas de consumo (mudança do grau de fechamento das válvulas CV-2 e CV-3). O intervalo de dados analisado considera a seguinte sequência de variação do grau de fechamento das válvulas: 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 60°, 50°, 40°, 30°.

Descrição dos experimentos propostos

Com a finalidade de analisar as vantagens hidráulicas e energéticas proporcionadas pelo uso do controlador PID foram realizados dois experimentos que emulam situações reais de um sistema de abastecimento submetido a variações de demanda. O consumo dos ramais de descarga da rede é simulado a partir da mudança do grau de fechamento das válvulas proporcionais ali posicionadas. Foram simulados os seguintes sistemas:

- Sistema 1 – Sistema convencional: utilização do conjunto motobomba e *booster*, ambos com frequência fixa de 60 Hz. Este sistema simula o modo de operação da maior parte das companhias de abastecimento.
- Sistema 2 – Sistema automatizado e setorizado: utilização do conjunto motobomba e *booster*, ambos com velocidade de rotação variada, atuando sob a ação do controlador PID.

O critério utilizado para análise desses cenários foi o valor do índice de Consumo de Energia Elétrica (CE) gerado pelo sistema de bombeamento e a eficiência no atendimento das pressões de serviço.

Avaliação do consumo de energia elétrica

Um dos indicadores mais comuns no setor de saneamento para indicar a eficiência em sistemas de bombeamento de água é o “consumo específico de energia elétrica”. Conhecido por CE, esse parâmetro representa a quantidade média de energia requerida para elevar um metro cúbico de água por meio de instalações de bombeamento (OTERO; GOMES; COURA, 2012). Através da Equação 3 é possível obter o valor desse indicador.

$$CE = \frac{P_{cons} \cdot t}{V_{bomb}} \quad \text{equação (3)}$$

Onde, CE é o consumo específico de energia, em kWh/m³; V_{bomb} é volume bombeado, em m³; P_{cons} é a potência elétrica consumida, em kW; e t é o tempo de bombeamento, em h.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o controlador PID produzir uma resposta satisfatória no controle das pressões da rede foram ajustados os ganhos proporcional (K_p), integral (K_i) e derivativo (K_d). Para selecionar a melhor amostra dos ganhos realizaram-se diversos testes, nos quais foram avaliados o desempenho da resposta transitória de ativação do controlador, bem como o erro em regime permanente, mantido após a estabilização da variável de controle. Como os ganhos são interdependentes, a principal dificuldade na escolha dos seus valores está na conservação do sincronismo entre eles, a fim de atingir o objetivo único que é o controle das pressões. A partir de tentativas, o melhor ajuste foi encontrado para os ganhos contidos na Tabela 2. Com esses valores foram realizados todos os testes com ação do controlador PID.

Tabela 2. Ganhos do controlador PID para cada atuador. Fonte: Autora do Trabalho.

Atuadores	Ganhos do Controlador PID		
	K_p	K_i	K_d
Conjunto Motobomba (CMB)	0,01	0,01	1
Booster (BST)	0,05	0,01	1
Válvula Redutora de Pressão (VRP)	0,002	0,002	0,002

Os gráficos das Figuras 7 e 8 apresentam os resultados obtidos nas simulações dos Sistemas 1 e 2. Nestes estão as pressões medidas pelos transdutores PT-3 e PT-5, bem como os valores de referência (10 e 15 mca) que serão utilizados para o controle das pressões. Também são apresentadas as vazões de serviço da rede, em m^3/h . O tempo de amostragem utilizado para coleta de dados foi de 50 ms, e a duração de cada teste foi de aproximadamente 4 min e 40 s.

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos na simulação do Sistema 1, o qual emula uma rede de abastecimento de água convencional, com emprego do conjunto motobomba e *booster*, operando com rotação fixa de 60 Hz (frequência padrão da rede elétrica brasileira), ou seja, sem ação de um sistema de controle.

No gráfico pode-se observar grandes variações da pressão em decorrência às mudanças de demanda. Em todas as faixas de consumo analisadas existem pressões superiores aos *setpoints*, com destaque ao período de consumo mínimo, no qual a pressão máxima atingiu 161,5% da referência na zona baixa e 127,2% na zona alta.

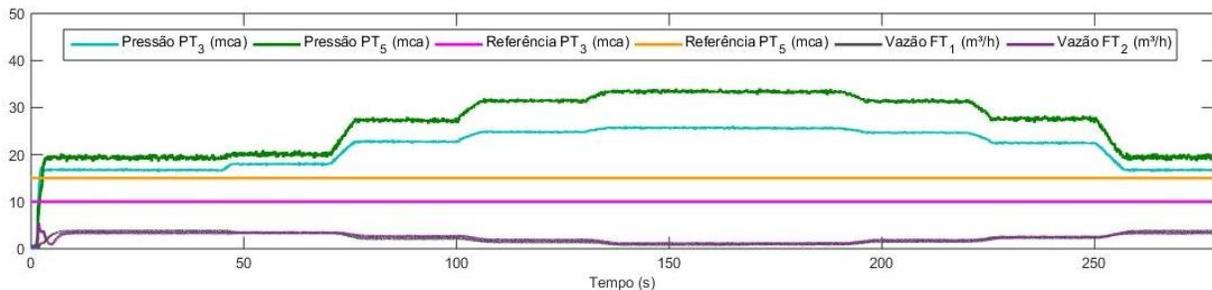


Figura 7: Resultados obtidos na simulação do Sistema 1. Fonte: Autora do Trabalho.

Os resultados obtidos no Sistema 2 aparecem na Figura 8. Com a utilização do controlador PID atuando sobre a bomba e o *booster* pode-se notar que as variações de demanda não comprometeram as pressões de serviço. Durante o teste o sistema manteve as pressões praticamente constantes dentro da faixa tolerada de erro (5%). É válido ressaltar que a variação de pressão ocorrida nos instantes de fechamento ou abertura das válvulas proporcionais são esperadas, pois correspondem a perturbações na planta, conhecidas hidraulicamente como transientes hidráulicos, que serão reparadas pelo controlador.

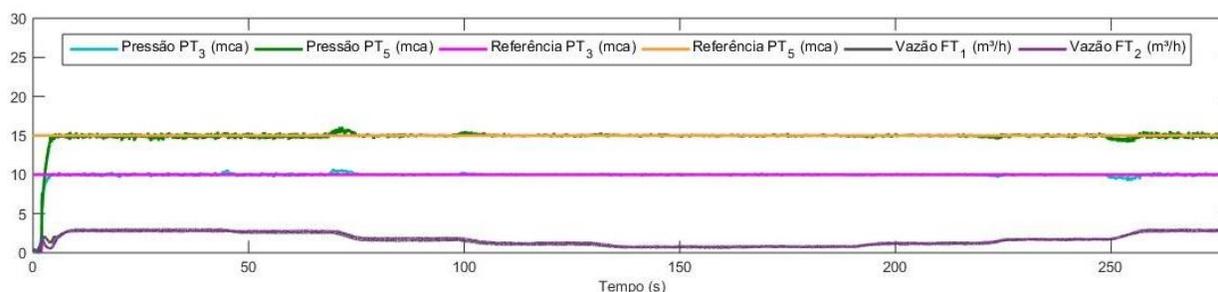


Figura 8: Resultados obtidos na simulação do Sistema 2. Fonte: Autora do Trabalho.

A Figura 9 apresenta o consumo específico de energia elétrica (CE) nos sistemas analisados. Cada ponto em destaque nas curvas representa o valor médio do CE calculado em uma faixa específica de consumo. O instante $t = 0$ coincide com o período de máxima demanda de vazão e o instante $t = 120$ s com o de consumo mínimo.

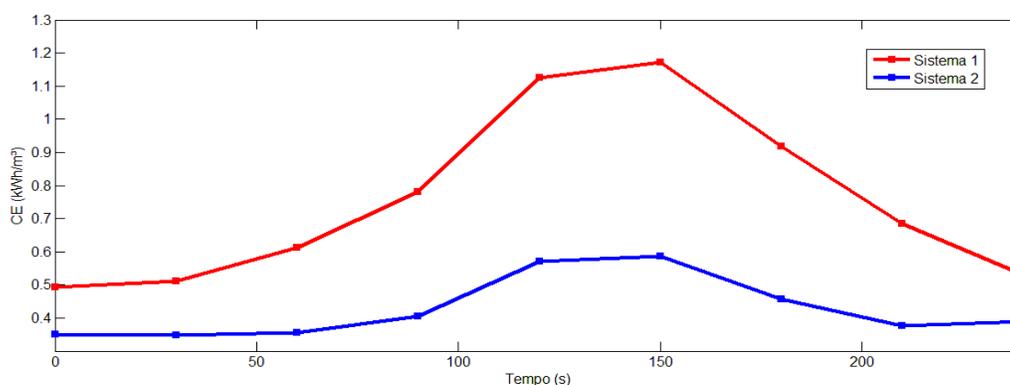


Figura 9: Consumo específico de energia elétrica (CE). Fonte: Autora do Trabalho.

Para a obtenção da potência elétrica consumida pelo sistema de bombeamento da rede SADA e, conseqüentemente obtenção das curvas acima, foi utilizado o Analisador de Qualidade de Energia Fluke. A partir da Figura 9, nota-se uma clara diferença entre o consumo de energia elétrica no Sistema 1 (sem controlador) e nos Sistemas 2 (com controlador). A discrepância entre esses valores é máxima durante o período de menor demanda (centro da curva), em que o CE do Sistema 1 (1,17 kWh/m³) é 100% superior ao obtido nos Sistemas 2 (0,585 kWh/m³).

Os parâmetros elétricos e hidráulicos coletados foram reunidos de forma objetiva e resumida na Tabela 3, a fim de obter uma melhor visualização dos dados característicos de cada sistema analisado.

Tabela 1. Parâmetros elétricos e hidráulicos para os sistemas analisados. Fonte: Autora do Trabalho

	Frequência* (Hz)		Pressão* (mca)		Potência* (kW)	Vazão bombeada* (m³/h)	CE (kWh/m³)
	CMB	BST	PT-3	PT-5			
Sistema 1 Sistema Convencional	60	60	21,94 6	27,06	3,00	4,58	0,66
Sistema 2 PID (CMB+BST)	40,65	51,55	10,00	14,99	1,36	3,48	0,39

*Os valores apresentados correspondem às médias dos dados obtidos ao longo dos testes.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que, dentre as estratégias de gestão propostas, o Sistema 2 (com controlador PID) foi o que apresentou menor consumo energético e garantiu o controle das pressões, sem comprometer o atendimento das demandas de consumo. Quando comparado ao Sistema 1 (sem controlador), o Sistema 2 promoveu uma redução de 67,95% no consumo de energia elétrica.

Portanto, pode-se concluir que o controlador PID mostrou-se uma ferramenta eficiente e confiável no controle das pressões e na reabilitação do sistema quando submetido a perturbações bruscas. Além de ser, comprovadamente, vetor na redução do consumo de energia elétrica.

Os resultados obtidos comprovam a importância da automação em sistemas de distribuição de água e justificam a necessidade de esforços técnicos, financeiros e tecnológicos por parte das empresas prestadoras de serviço para atingir a otimização dos processos. O monitoramento das redes de abastecimento em tempo real e o controle das pressões garantirão, a médio e longo prazo, diversos benefícios para o sistema, dentre os quais: diminuição das perdas físicas de água, redução do consumo de energia elétrica e dos custos de operação, melhoria na qualidade do serviço de abastecimento e preservação dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12218: **Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro. 1994. 4 p.
2. Astrom, K.J; Hagglund, T. **PID controllers: theory, design and tuning**. Instrument Society of America, 2^a ed. 1995. 343p.
3. Bezerra, S.T.M, (2009). “**Sistema fuzzy para controle piezométrico de sistemas de distribuição de água visando à economia de água e energia.**” Tese D. Sc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.
4. Böhm, J. Bobál, V. Fessl, J. e Macháček, J. **Digital Self-tuning Controllers - Algorithms, Implementation and Applications**, U.K. 2005.
5. Campestrini, L. (2006) **Sintonia de controladores PID descentralizados baseada no método do ponto crítico**. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica). Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 98p.
6. Carvalho, P. S. O (2012). “**Controle para bombeamento distribuído com vistas à minimização dos custos energéticos aplicado a sistemas de abastecimento de água**” Tese D. Sc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.
7. Duarte Filho, M. **Síntese de controlador pid para controle de ph em um reator com otimização via algoritmos genéticos**. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2014.
8. Fonseca, F.R. **Modelo de sistema de automação aplicado à setorização de redes de abastecimento hídrico**. 2011. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
9. Gomes, H. P. 2009. “**Sistemas de Abastecimento de Água – Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias**”. 3a Edição. Editora Universitária, UFPB, João Pessoa, Brasil.
10. Haffner, J. F. **Projetos de Sistemas de Controle**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul Departamento de Engenharia Elétrica. 2013
11. Yu, Cheng-Ching. **Autotuning of PID controllers: A relay feedback approach**. Springer Science & Business Media, 2006.
12. Otero, Osvaldo Luiz Cremer de; GOMES, Airton Sampaio; COURA, Sebastião de Paula. **Diagnóstico de Sistemas**. In: GOMES, Heber Pimentel. **Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética**. 2. ed. João Pessoa: Editora Universitária Ufpb, 2012. Cap. 6. p. 253-296.
13. Programa Mundial de Avaliação de Recursos Hídricos (WWAP). **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (WWDR4)**. 2012. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/educacaoambiental/images/stories/biblioteca/rio_20/wwdr4-fatos-e-dados.pdf>. Acesso em: 10 set. 2016.
14. Ramos, H. M., Costa L. H. M., Gonçalves F. V., (2012). “**Energy Efficiency in Water Supply Systems: GA for Pump Schedule Optimization and ANN for Hybrid Energy Prediction, Water Supply System Analysis**” - Selected Topics, Dr. Avi Ostfeld (Ed.), ISBN: 978-953-51-0889-4.
15. SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2013**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014