

EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA APLICAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID NA OPERAÇÃO DE SISTEMA DE BOMBAS EM PARALELO

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

* Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – arthurbndiniz@hotmail.com

RESUMO

O cenário dos sistemas de abastecimento de água no Brasil se mostra bastante ineficiente diante do crescimento populacional gradativo e da falta de investimentos na modernização do setor nos últimos anos. Além de apresentarem elevados índices de perdas de água (incluindo as perdas reais e aparentes) em suas redes de distribuição, as empresas de abastecimento convivem com altos custos energéticos devido a ineficiência operacional dos seus sistemas de bombeamento, gerando redução de faturamento e danos ambientais. Com o intuito de minimizar essa problemática, a literatura sugere introduzir a automação de sistemas elevatórios através do uso de conversores de frequência e implementação de um controlador inteligente que atue na velocidade de rotação dos conjuntos motobomba. Dessa forma, há um maior controle do consumo energético bem como das pressões de serviço. Neste trabalho é proposto a utilização de um sistema de controle PID, em ambiente LabVIEW®, para o controle de pressão de redes de distribuição de água, por meio de dois conjuntos motobomba acionados por conversores de frequência. O acionamento desse sistema de impulsão é realizado com motores de indução trifásico com velocidade de rotação variável visando a economia de energia elétrica e água. Para isso foi desenvolvido uma bancada experimental instrumentada emulando um sistema de abastecimento real. O sistema proposto é constituído de dois conjuntos motobomba em paralelo, devido à variação de demanda de vazão requerida. A eficiência hidroenergética do controlador PID foi avaliada a partir de testes utilizando o cenário convencional (sem controlador) e empregando o sistema de controle. Os resultados foram obtidos simulando uma curva de demanda através de válvula de controle, avaliando-se a eficiência energética desse sistema com o uso do controlador.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética, controlador PID, abastecimento de água, inversor de frequência

INTRODUÇÃO

Os desenvolvimentos econômico e social nos diversos setores do mundo contemporâneo são fundamentados no emprego de alguns insumos indispensáveis, tais como a água e a energia elétrica. São eles que garantem a continuidade do progresso humano, além de interferirem diretamente sobre o funcionamento do setor industrial. A escassez somada à urgente necessidade de preservação ambiental convergem à crescente preocupação sobre o emprego racional desses recursos, visando garantir boas condições às gerações futuras.

Nesse sentido, os sistemas de abastecimento de água são merecedores de uma atenção especial já que englobam tanto a indústria de produção de água potável como o elevado consumo de energia em seus funcionamentos. Segundo Gomes e Carvalho (2012), os sistemas de abastecimento e de esgotamento sanitário são responsáveis por aproximadamente 3% da energia consumida no mundo. No Brasil, esse dado não é diferente, visto que, de acordo com o Programa Nacional de Conservação de Energia para o setor de saneamento (PROCEL SANEAR), entre 2% e 3% do consumo total de energia elétrica do país, equivalendo a cerca de 10 bilhões de kWh/ano, são demandados pelo funcionamento das prestadoras de serviços de água e esgotamento sanitário.

De acordo com Tsutiya (2013), os conjuntos motobomba das estações elevatórias são responsáveis por 90% da energia consumida nos serviços de saneamento e abastecimento de água. A ineficiência energética desses sistemas é responsável por parte significativa do consumo, sendo ela derivada de excessos de perda de carga hidráulica nas adutoras e redes de abastecimento, conjuntos motobomba com baixo rendimento, falta de manutenção, perdas reais de água, dentre outros. James et al. (2002) afirmam que o consumo de energia nos sistemas de abastecimento e esgotamento sanitário poderia ser reduzido em 25% em todo o mundo a partir de ações que visam a implantar equipamentos e sistemas mais eficientes.

Diante da elevada perda financeira, dificuldade operacional e degradação ambiental oriunda da ineficácia de seus sistemas, as prestadoras de serviços de saneamento passaram, nos últimos anos, a adotar técnicas e implantar tecnologias que visam minimizar custos e reduzir desperdícios sem que haja o comprometimento da qualidade das suas atividades.

Dentre as ações operacionais que visam a diminuição do consumo de energia elétrica, destaca-se a redução das pressões nas redes de abastecimento, dado que o número de vazamentos e as suas vazões são diretamente influenciadas pela pressão fornecida no bombeamento (TSUTIYA, 2013). De acordo com Carvalho (2012), essa medida é fundamental

para reduzir as perdas reais em sistemas urbanos de distribuição de água, amortizando o volume de água fornecido sem que haja o racionamento. Dessa forma, as prestadoras de serviços obtêm ganhos financeiros e operacionais consideráveis, haja vista que convivem com altos índices de perdas de água além de que as tubulações e acessórios das redes terão ganho notável de vida útil.

Nesse sentido, os conversores de frequência têm muito a acrescentar: são dispositivos que geram uma frequência e tensão trifásicas ajustáveis a fim de que seja possível controlar a velocidade de rotação de um motor de indução trifásico e, conseqüentemente, sua potência. O emprego adequado desses equipamentos evita o bombeamento com pressões excessivas que provocam avarias nas tubulações e proporcionam desperdício de água podendo, também, substituir os reservatórios elevados, responsáveis por elevados custos de implantação e manutenção.

Gurgel (2006) avaliou a aplicação de conversores de frequência em estações elevatórias de água tratada da cidade de São José dos Campos – SP. Foram estudadas as características técnicas de quatro sistemas de bombeamento que operam com velocidade variável. Foi concluído que o uso desses equipamentos mostrou significativa eficiência energética, na medida que obteve êxito no controle das pressões da rede. Dessa forma, foi recomendado pelo autor o uso de conversores de frequência em outros sistemas de abastecimentos similares ao estudado.

É necessário, portanto, o desenvolvimento e aplicação de técnicas que busquem explorar o uso dos conversores de frequência da maneira mais otimizada. A correção do fator de potência, melhoramento no rendimento além de modificações no controle operacional, como a abertura e fechamento de válvulas, acionamento e controle de velocidade de rotação de conjuntos motobomba e ajuste de nível de reservatórios são ações que visam o aprimoramento das operações de um sistema de bombeamento equipados por conversores de frequência (CAMBOIM, 2012).

Segundo Tsutiya (2013), a maior parte do abastecimento de água, no Brasil, de zonas de topografias altas, utiliza reservatórios elevados, objetivando a garantia de pressões adequadas na rede de abastecimento, cuja alimentação ocorre através de uma estação elevatória com bombas de rotação fixa. A operação desse sistema apresenta um elevado grau de complexidade devido a extensa distribuição espacial, múltiplos caminhos percorridos pela água e vazões que variam temporalmente e espacialmente. Dessa feita, Cheung e Reis (2007) asseguram que o uso de modelos computacionais contribui para uma melhor gestão, tanto na fase de planejamento como na operação desses sistemas.

A necessidade de otimização, entretanto, implica ainda na implantação de técnicas computacionais durante a operação desses sistemas. Considerando a complexidade de uma rede de abastecimento de água, onde uma gama de decisões pode ser tomada em seu funcionamento, o empirismo dos técnicos responsáveis, evidenciado nas regras operacionais, contribui para a ineficiência hidráulica e energética. O avanço tecnológico, sobretudo na informática, tem auxiliado a engenharia de sobremaneira. Esse desenvolvimento permitiu, inclusive, a aplicação direta dessa ferramenta nos sistemas de abastecimento de água para o seu melhor monitoramento, controle e interferência das suas unidades em tempo real, que é o que sugere a automação.

Na literatura, pode-se encontrar alguns tipos de sistemas de controle aplicados tanto em sistemas industriais bem como em sistemas de abastecimento. O PID, por exemplo, é bastante difundido principalmente nas indústrias, devido a sua aplicabilidade em grande parte dos sistemas de controle além de ter um baixo custo e apresentar fácil implementação, como afirma Salvino et al. (2014). Porém, é crescente seu uso no controle de válvulas proporcionais e sistemas de bombeamento com a finalidade de reduzir pressões excessivas e controle de surtos e flutuações abruptas de pressão na rede (QUADROS e PINTO, 2013).

Salvino et al. (2014) desenvolveu um controlador PID convencional, que foi implementado numa bancada experimental que simula um sistema real composto por uma região de baixa e alta altitude. O funcionamento desse sistema dar-se através de um conjunto motobomba, um booster e uma válvula proporcional. Os resultados mostraram que, dependendo do consumo, existe uma combinação dos elementos de controle que poderá proporcionar uma economia no consumo energético. Além disso, o controlador PID se mostrou eficiente no controle das pressões de serviço na entrada dos setores abastecidos.

Quadros e Pinto (2013) desenvolveram um controle de pressões em sistemas de abastecimento de água, através do uso de válvulas redutoras de pressão como vetor para a redução das perdas reais. As oscilações das pressões de operação nas redes de distribuição, provocadas por variações nas características do processo ou das condições operacionais, são filtradas pelo sistema de controle PID, com sintonia automática. As simulações realizadas demonstraram a aplicabilidade dos métodos de sintonia propostos. Todos os indicadores de desempenho da VRP controlada pelos controladores PID foram melhorados em relação à VRP com a válvula piloto.

Com a finalidade de controlar as pressões no sistema hidráulico de abastecimento e sua verificar a eficiência energética e hidráulica, esse trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de controle para operar uma estação de bombeamento com dois conjuntos motobomba em paralelo, acionados por conversores de frequência.

METODOLOGIA

Caracterização da Bancada Experimental

Com o objetivo de implantar o sistema de controle utilizando controlador robusto em um sistema de impulsão com bombas em paralelo acionadas por conversores de frequência e analisar seu comportamento, foi desenvolvida uma bancada experimental (Figura 1) totalmente instrumentalizada capaz de simular o bombeamento em configurações de demandas distintas (máxima e mínima). Dessa forma, foi possível realizar o monitoramento minucioso dos parâmetros hidráulicos característicos de uma rede de abastecimento, tais como: pressão e vazão.



Figura 1: Bancada Experimental. Fonte: Própria

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 (tubulão), dois conjuntos motobomba (CMB), dois conversores de frequência (Figura 2), quatro transdutores de pressão (PT), dois transdutores de vazão (FT), uma válvula de controle (CV), uma fonte de alimentação, uma interface de aquisição de dados (IAD) e um computador portátil.

Os dois conjuntos motobomba são de mesmo modelo e fabricante, sendo operadas com a mesma vazão e altura manométrica, como recomenda a literatura (GOMES, 2009). Para simulação da variação da demanda ao longo do dia, utilizou-se a válvula de controle (CV).

Antes de iniciar a etapa de testes, todos os equipamentos utilizados na bancada experimental foram calibrados com o intuito de garantir o fornecimento de dados válidos e úteis que pudessem auxiliar na avaliação do sistema e na tomada de decisões. Esse procedimento permitiu ainda, o estabelecimento da correspondência entre a indicação do instrumento de medição e o valor padrão.



Figura 2: Conversor de frequência CFW-11 (WEG) Fonte: GOMES (2009)

Elaboração do Algoritmo de Controle PID Convencional

A aplicação do controlador PID convencional se deu a partir da introdução de algoritmos robustos em ambiente LabVIEW® na sua forma digital dada pela Equação 3. Esta equação é resultado da discretização da lei de controle do PID no domínio do tempo, como mostra a Equação 1. O algoritmo serve de base para a criação de uma rede de abastecimento mais autônoma, sendo controlada a partir de programas computacionais.

O algoritmo de controle PID envolve três parâmetros constantes: o proporcional (“P”), os valores integrais (“I”) e derivativos (“D”). Simplificando, estes valores podem ser definidos como: P é a correção proporcional ao erro presente, I é a correção proporcional ao produto entre o erro e o tempo e o “D” é a correção proporcional à taxa de variação do erro

A variável de controle é formada pela soma dos termos Proporcional, Integral e Derivativo. O ganho proporcional K_p , a constante integral K_i , e a constante derivativa K_d são os parâmetros do controlador.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad \text{equação (1)}$$

$$e(t) = y_{sp}(t) - y(t) \quad \text{equação (2)}$$

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T_s}{T_I} \left[\frac{e(0) + e(k)}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} e(i) \right] + \frac{T_D}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad \text{equação (3)}$$

Onde:

$u(t)$ = sinal de controle;

$e(t)$ = erro de controle;

$y(t)$ = valor medido da saída do processo;

$y_{sp}(t)$ = o valor do *setpoint*.

A variável $e(t)$, representa a diferença entre o sinal de referência estabelecido na entrada do sistema e a variável medida na saída do sistema. Este sinal de erro será a variável de entrada do controlador PID, que calculará a sua derivada e a sua integral. O sinal de saída do controlador, $u(t)$, será igual a magnitude do erro multiplicada pelo ganho proporcional (K_p) mais, o ganho integral (K_i) multiplicado pela integral do erro e mais o ganho derivativo (K_d) multiplicado pela derivada do erro.

Em linhas gerais pode-se dizer que o sinal de controle $u(t)$ será aplicado a planta, implicando novo valor a variável de saída $y(t)$. Este novo valor será imediatamente comparado com o sinal de referência ocasionando um novo sinal de erro $e(t)$. O controlador processa este novo sinal erro que, por sua vez, gera um novo sinal de controle alterando o valor da saída. Considerando-se uma referência constante ou constante por partes, este ciclo repetir-se-á automaticamente até que o erro seja eliminado, indicando que a variável de saída do processo é igual a variável de referência estabelecida pelo operador.

O controlador PID foi elaborado e implementado em ambiente LabVIEW® para controlar a frequência dos dois conjuntos motobomba com o objetivo de manter a pressão do sistema em 15 m.c.a no ponto mais à jusante do sistema que possui medição de pressão (PT-05). Dessa maneira a rede de abastecimento simulada pela bancada experimental atenderia os requisitos mínimos dado pela NBR 12218 buscando a otimização e a eficiência hidroenergética.

A Figura 3 apresenta a tela principal (Front Painel) para acionar o sistema, nela é possível identificar o esquema em 2D da bancada experimental. No lado direito superior há dois gráficos. O primeiro representa a variação da pressão (m.c.a) ao longo do tempo, enquanto o segundo mostra a variação da vazão (m^3/h) ao longo do tempo. As abreviaturas PT, FT e CV que aparecem ao longo do esquema, indicam os transdutores de pressão, transdutores de vazão e as válvulas de controle, respectivamente.

Os parâmetros K_p , K_i e K_d do controlador PID foram determinados por tentativa e erro. Para cada conjunto de parâmetros escolhidos, o sistema era testado e avaliado quanto ao acionamento e presença de sobressinal (*overshooting*), eficácia no controle e sua resposta frente à ocorrência de perturbações no sistema. O tempo de amostragem determinado experimentalmente para o sistema foi de 10 ms.

O processo de comunicação entre a planta e o LabVIEW® ocorre por intermédio de uma placa de aquisição de dados da National Instruments. Esta placa realiza a interface do algoritmo de controle com a planta através dos conversores D/A (digital/analógico) e A/D (analógico/digital).

Com o intuito de avaliar a otimização hidroenergética e a eficácia do controlador PID no sistema de impulsão com bombas em paralelo, foram adotados os dois cenários a seguir. A abertura e fechamento da válvula de controle (CV) simula as situações de demanda no sistema.

- Cenário 1 - Sistema de impulsão operando sem controlador funcionando com frequência constante de 60 Hz. A válvula de controle (CV) inicia com 60° de fechamento, abrindo a cada 15° até atingir 15° de fechamento, refazendo o ciclo até a válvula de controle (CV) alcançar 60° de fechamento.
- Cenário 2 - Sistema de impulsão operando sob ação do controlador PID. A válvula de controle (CV) inicia com 60° de fechamento, abrindo a cada 15° até atingir 15° de fechamento, refazendo o ciclo uma vez.

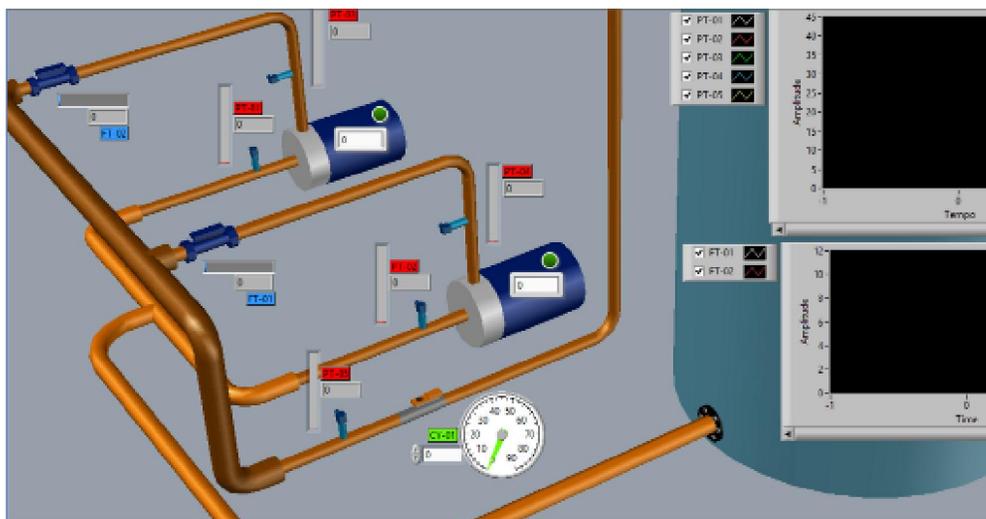


Figura 3: Representação 2D da bancada experimental no LabVIEW® Fonte: Própria

Experimentalmente, determinou-se que o consumo referente à máxima demanda ocorre quando a válvula de controle (CV), instalada na saída que simula a zona abastecida, estiver operando com 15° de fechamento e a mínima demanda com 60° de fechamento.

As determinações da demanda máxima e mínima sucederam com base na resposta do sistema piloto ao grau de fechamento da válvula de controle (CV) mantendo a frequência das bombas constante (60 Hz). O fechamento dessa válvula diminui a vazão bombeada pelos conjuntos motobomba e aumenta a pressão à montante da válvula decorrente do acréscimo de perda de carga no sistema, caracterizando uma situação real de uma rede de abastecimento em horário de baixo consumo. Ao contrário, a abertura dessa válvula representa uma rede de abastecimento em momento de consumo elevado, já que se verifica o aumento da vazão no sistema e diminuição da pressão à montante dessa válvula, uma vez que há um decréscimo da perda de carga no sistema. Esse efeito do fechamento parcial da válvula de controle (CV) sobre os parâmetros hidráulicos é demonstrado na Figura 4 a seguir através de curvas representativas tanto dos conjuntos motobomba como do sistema.

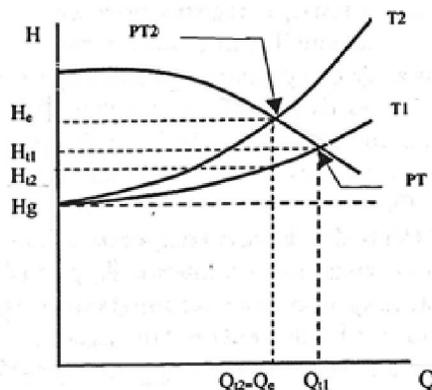


Figura 4: Efeito do fechamento parcial da válvula de controle (CV) nos parâmetros hidráulicos do sistema. Fonte: GOMES (2009)

Em sequência, foi realizado um teste tanto no acionamento dos conjuntos motobomba como através de uma perturbação brusca no sistema visando avaliar algumas características das respostas transitórias do controlador PID frente a esses

dois procedimentos. Em ambas as situações o sistema estava sendo operado em situação de máxima demanda (válvula CV com 15° de fechamento). A perturbação causada se deu através do rápido fechamento e abertura da válvula globo localizada na tubulação de descarga.

Os parâmetros avaliados são: Tempo de atraso (t_d), Tempo de subida (t_r), Tempo de pico (t_p), Máximo sobressinal (M_p), Tempo de acomodação (t_s), como mostra a Fig. 13. Segundo OGATA (2010), assim são definidas:

- 1. Tempo de atraso, t_d :** é o tempo necessário para que a resposta alcance, pela primeira vez, a metade do valor final.
- 2. Tempo de subida, t_r :** é o tempo necessário para que a resposta passe de 10% a 90%, de 5% a 95%, ou de 0% a 100% do seu valor final. Para sistemas de segunda ordem subamortecidos, normalmente se usa o tempo de subida de 0% a 100%. Para sistemas de segunda ordem superamortecidos, o tempo de subida normalmente usado diz respeito ao intervalo de 10% a 90%.
- 3. Tempo de pico, t_p :** é o tempo necessário para que a resposta alcance o primeiro pico de ultrapassagem.
- 4. Máximo sobressinal, M_p :** é o máximo valor de pico da curva de resposta medido a partir do valor unitário. Quando o valor final de regime estacionário da resposta difere da unidade, é comum usar-se a máxima ultrapassagem percentual, definida por:

$$\frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \quad \text{equação (4)}$$

O valor de máximo sobressinal (percentual) indica diretamente a estabilidade relativa do sistema.

- 5. Tempo de acomodação, t_s :** é o tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores dentro de uma faixa em torno do valor final e aí permaneça. O intervalo de valores no interior da faixa é especificado por uma porcentagem absoluta do valor final (normalmente 2% ou 5%). O tempo de acomodação está relacionado com a maior constante de tempo do sistema de controle. A escolha de que porcentagem usar no critério de erro pode ser determinada a partir dos objetivos do projeto do sistema em questão.

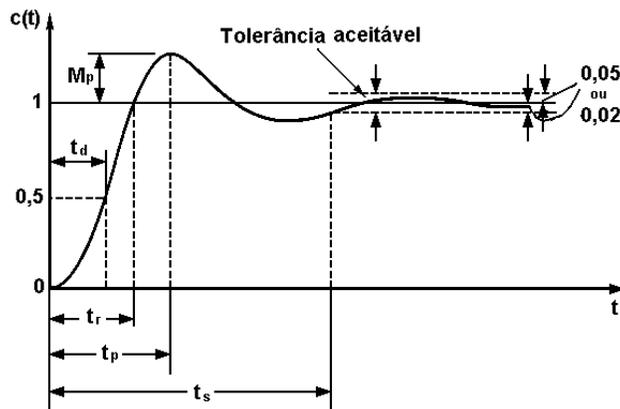


Figura 5: Curva de resposta em degrau unitário. Fonte: OGATA (2010)

Por último, foi selecionada uma amostra aleatória de 1 (um) segundo dos dados obtidos do sistema operando em regime permanente com a finalidade de avaliar o erro máximo obtido da relação entre a pressão em PT-05 e a referência utilizada. De acordo com OGATA (2010), a faixa de tolerância tem um alcance de 2% a 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a fase de elaboração e implementação do controlador PID na bancada experimental, foram realizados alguns testes com vistas na comparação do funcionamento do sistema controlado com o sistema convencional. A análise do controlador foi realizada com base nas pressões de referência em conjunto com as frequências de saída dos conjuntos motobomba. Para tanto, primeiramente foi realizado o teste utilizando o Cenário 1. Os resultados referentes a pressão

(m.c.a) em PT-05, as frequências dos conjuntos motobomba em paralelo (Hz) bem como o grau de fechamento da válvula de controle (CV) ao longo do tempo são mostrados na Figura 6 a seguir.

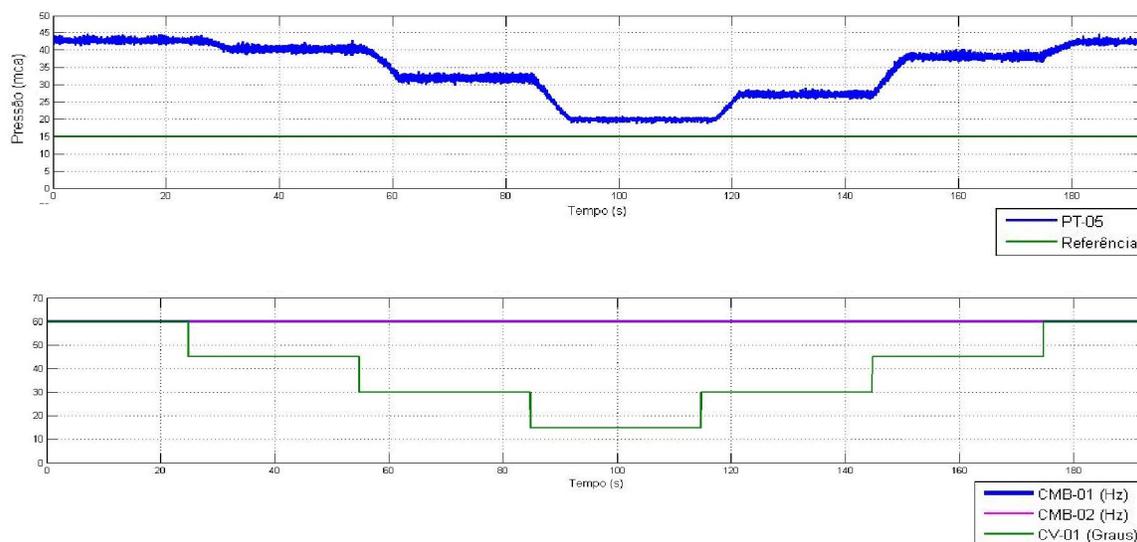


Figura 6: Resultados obtidos referentes ao teste do Cenário 1. Fonte: Própria

De acordo com os gráficos apresentados, pode-se observar que o sistema de impulsão funcionou com sua frequência convencional (60 Hz) constante para atender todas os níveis de demanda. Como já esperado, verificou-se que a pressão do sistema em PT-05 se eleva a medida que o consumo e, portanto, a vazão diminui. Em todas as situações de demanda, constatou-se que as pressões aferidas foram superiores a pressão proposta nesse trabalho (15 m.c.a).

Posteriormente, o controlador PID atuou no sistema através do controle das frequências dos conjuntos motobomba no sistema utilizando o Cenário 2, como pode ser visto na Figura 7 a seguir, onde é mostrado os resultados referentes a pressão (m.c.a) em PT-05, as frequências dos conjuntos motobomba em paralelo (Hz) bem como o grau de fechamento da válvula de controle (CV) ao longo do tempo.

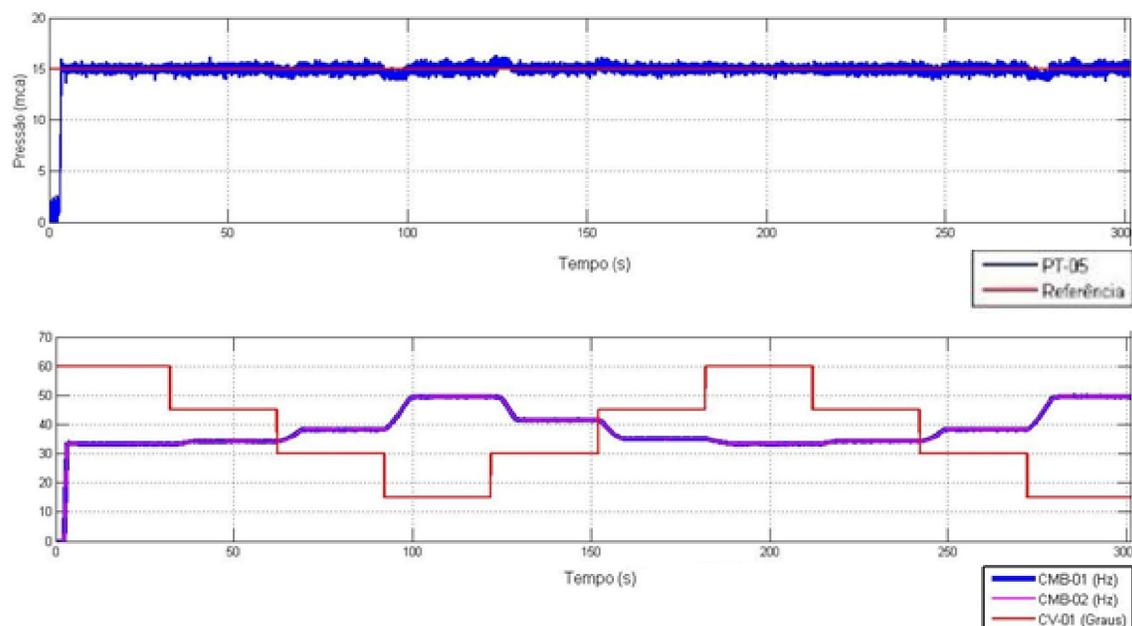


Figura 7: Resultados obtidos referentes ao teste do Cenário 2. Fonte: Própria

Nesse caso, o controlador PID atuou regulando a frequência em que os conjuntos motobomba operavam enquanto as pressões eram mantidas de acordo com a pressão de entrada (15 m.c.a), independentemente das situações de demanda.

Isto é, o sistema funcionou atendendo a pressão proposta e utilizando menores frequências comparando com o Cenário 1, sem qualquer déficit de vazão bombeada.

Em seguida, foram realizados testes para avaliar as características da resposta transitória do controlador ao acionamento dos conjuntos motobomba, bem como a uma perturbação brusca causada pelo rápido fechamento e abertura de uma válvula globo na tubulação de descarga. Após avaliação dos dados referentes ao acionamento dos conjuntos motobomba, verificou-se as seguintes características da resposta transitória do controlador PID

- Tempo de atraso (t_p) de 0,96 segundos
- Tempo de subida (t_r) de 2,94 segundos.

Alguns dados importantes foram extraídos para a análise do controlador PID após perturbação do sistema, tais como: Tempo de acomodação (t_s), *Overshooting*, e análise dos erros nos sobressinais. Avaliando os dados obtidos, obteve-se os seguintes resultados:

- Tempo de acomodação (t_s) de 4,38 segundos
- *Overshooting*: 8,39 m.c.a com relação a pressão de entrada
- Erro no primeiro sobressinal: 55,93% (sobressinal de 8,39 m.c.a)
- Erro no segundo sobressinal: 34,33% (sobressinal de 5,15 m.c.a)

A oscilação máxima observada no sistema funcionando em regime permanente indicou uma pressão de 14,2 m.c.a. Como a diferença entre esse valor e a pressão de entrada (referência) de 15 m.c.a é de 0,8 m.c.a, pode-se concluir que o erro encontrado no sistema foi de 5,33%.

CONCLUSÃO

A partir da implementação do controlador PID em ambiente LabVIEW®, foi possível controlar e monitorar as pressões e demais parâmetros hidráulicos da bancada experimental. O sistema de controle proporcionou uma partida dos conjuntos motobomba suave e, ao mesmo tempo, precisa, ajustando a pressão de serviço em 15 m.c.a conforme definição prévia. O tempo de subida (t_r) a partir do acionamento foi de 2,98 segundos e não apresentou ultrapassagem do sinal de referência. O erro do sistema de controle no regime permanente ficou dentro da faixa de tolerância definido pela literatura.

Diante dos testes realizados e da atuação do controlador, pode-se concluir que o sistema de controle atuou de forma eficiente em todas as etapas do experimento, permitindo o fornecimento da vazão demandada com uma pressão de serviço controlada em 15 m.c.a. 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.

Apesar da impossibilidade de coletar dados de potência e, portanto, não possuir valores de Consumo Específico de Energia Elétrica (CE) para avaliação da eficiência energética, GOMES (2009) afirma que a própria eliminação do excesso de pressão no sistema, resultado de ações como o ajuste da velocidade de rotação dos conjuntos motobomba, já resulta em redução do consumo elétrico.

Recomenda-se, em trabalhos futuros, comparar esse sistema de controle com outras técnicas de forma a avaliar o ganho energético e operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12218 - Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público**. Rio de Janeiro, 1994.
2. Camboim, W.L.M., 2012, **Aplicações de Técnicas de Controle Fuzzy em Sistemas de Abastecimento de Água Visando Melhoria no Rendimento Energético e Hidráulico**, tese de doutorado, PPGEM/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
3. Carvalho, P.S., 2012, **O Controle para bombeamento distribuído com vistas à minimização dos custos energéticos aplicado a sistemas de abastecimento de água**, tese de doutorado, PPGEM/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2012.
4. Cheung, P. B.; Reis, L. F. R. **Gerenciamento da qualidade da água em sistemas de distribuição - técnicas computacionais**. In: Heber Pimentel Gomes; Rafael Pérez Garcia; Pedro L. Iglesias Rey. (Org.). Abastecimento de água - O estado da arte e técnicas avançadas. João Pessoa, PB: Editora Universitária UFPB, 2007, p. 9-28.
5. Gomes, H. P. **Sistema de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias**. 3ª edição (Revisada e Ampliada). João Pessoa: UFPB, 2009a. 277 p.

6. Gurgel, B. B. F. A., 2006, **Proposição de uma metodologia para avaliação de inversores de frequência em estações elevatórias de água. Estudo de casos no sistema de abastecimento de água de São José dos Campos**, dissertação de mestrado. PHA/USP. São Paulo, SP, Brasil.
7. James, K., Campbell, S.L., Godlove, C.E., 2002, **Água e Energia – Aproveitando as Oportunidades de Eficientização de Água e Energia não Exploradas nos Sistemas Municipais**. ALLIANCE - Aliança para Conservação de Energia. Washington, USA.
8. Ogata, K. **Engenharia de Controle Moderno**, 5ª ed., São Paulo – SP, Ed. Pearson, 2010.
9. Programa Nacional de Eficiência Energética em Sanamento Ambiental (Procel Sanear). **Manual de Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL, 2005. 65 p.
10. Quadros, A. S.; Pinto, A. M. A. **Controle PID com sintonia automática e adaptativa de válvulas redutoras de pressão em sistemas de abastecimento de água**. In: XI SBAI 2013, Fortaleza/CE.
11. Salvino, L. R et al. **Aplicação de um controle PID na operação de sistemas de distribuição de água**. In: XIII SEREA 2014, Fortaleza/CE.
12. Tsutiya, M. T. **Abastecimento de Água**. 4ª edição. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013. 643 p.