

XI-046 – OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL PARA SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

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.

Saulo de Tarso Bezerra Marques⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Professor do curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Simplicio Arnaud da Silva⁽⁴⁾

Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Professor associado a UFPB.

Heber Gomes Pimentel⁽⁵⁾

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

A crescente urbanização e a expansão das atividades industriais vêm gerando um aumento na demanda dos serviços prestados pelas companhias de tratamento e distribuição de água. No entanto, este aumento na demanda não vem acompanhado de um melhoramento tecnológico e de investimentos no setor por estas empresas. Por isso, a utilização de técnicas de controle que minimizem os gastos operacionais e energéticos das estações de bombeamento vem norteando uma série de pesquisas que visam o aperfeiçoamento dos procedimentos operacionais utilizados nos sistemas de abastecimento. O gerenciamento destes sistemas se mostram bastantes complexos devido à variação de diversos parâmetros hidráulicos que essenciais ao funcionamento adequado da rede, tais como as pressões de serviço e as vazões requeridas nos diversos pontos de consumo. Assim, a utilização de técnicas de controle e automação garante maior domínio sobre as condições operacionais da rede, no que se refere ao monitoramento, controle e interferência em tempo real. Sob esta perspectiva, o presente trabalho visa mostrar a eficiência energética garantida a um sistema de abastecimento de água, para zonas distintas com topografia diferenciada, utilizando para isso o controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) do tipo convencional, por não haver a necessidade do conhecimento prévio da modelagem matemática que descreve o comportamento do sistema. Após a aplicação do controlador e posterior análise dos dados apresentado, a técnica de controle utilizada se mostrou bastante eficiente ao controlar a pressão mínima exigida pela rede e garantir o menor consumo energético do conjunto motor-bomba, apresentando uma redução de 29% na máxima demanda e de 49,33% na demanda mínima, quando comparado ao sistema sem o uso do controlador.

PALAVRAS-CHAVE: Automação, Controle, Eficiência Energética.

INTRODUÇÃO

Com a evolução da urbanização e da industrialização ocorrida nas últimas décadas, os sistemas de abastecimento de água sofreram significativas alterações no seu padrão de consumo e de demanda energética. A falta de planejamento quanto à expansão das redes de distribuição tem acarretado graves falhas operacionais

e gastos de energia desnecessários; desta forma, ações que priorizem o atendimento adequado das pressões e vazões de serviço e evitem desperdícios energéticos, sobretudo em estações de bombeamento, são fundamentais. A complexidade do gerenciamento dos sistemas de distribuição de água está associada à heterogeneidade das condições de abastecimento dos setores de consumo e à constante variabilidade dos parâmetros envolvidos. Assim a implantação de sistemas de controle e automação garantem maior domínio sobre as operações da rede, no tocante ao monitoramento, controle e interferência em tempo real.

Segundo BEZERRA (2009), o controle da pressão está associado à aplicação de três ações simultâneas: setorização do sistema de distribuição de água, instalação de válvulas redutoras de pressão e utilização de bombas com velocidade de rotação variável. O incentivo às ações descritas são sobremaneira importantes em regiões com topografias acentuadamente distintas. Nestes locais, quando utilizado apenas o conjunto motor bomba para elevação da água até as cotas altas do sistema, são gerados custos elevados de energia elétrica e as pressões são distribuídas de forma insatisfatória ao longo da rede. Assim, a segmentação da região em setores piezométricos homogêneos e a inserção de VRPs (Válvulas Redutoras de Pressão) à montante da zona baixa, para dissipação de energia hidráulica, e *booster* à montante da zona alta, para incremento da altura manométrica da rede são mecanismos importantes na otimização energética e hidráulica dos sistemas de distribuição de água.

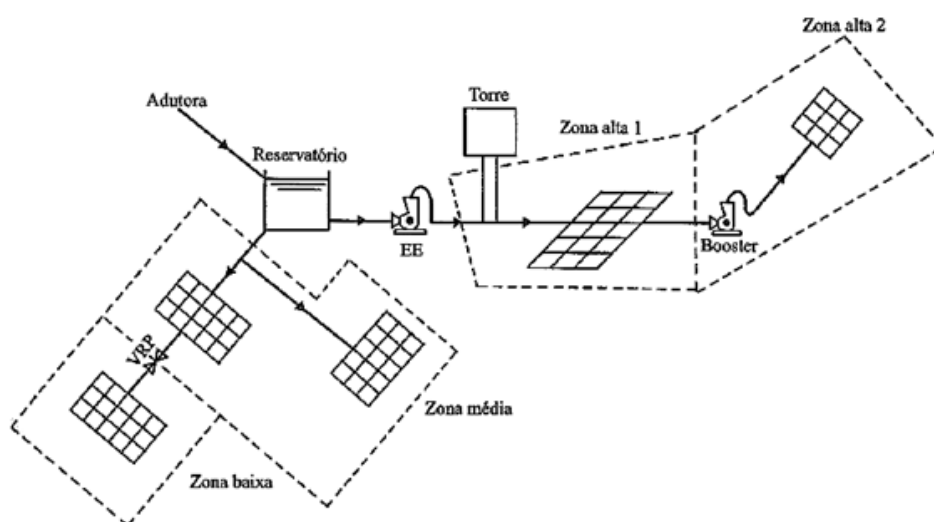


Figura 1 - Esquema de abastecimento de água para atender as diversas zonas de pressão

Fonte: TSUTIYA, 2013, p. 401.

Uma grande ferramenta utilizada para auxiliar o gerenciamento, planejamento, projeto e diagnóstico de um sistema de abastecimento é a modelagem computacional, a partir da elaboração de projeções e simulações que garantam a composição mais eficiente de seus componentes. Como exemplo, cita-se o Epanet, programa concebido para dar apoio à análise de sistemas de distribuição, podendo ser utilizado em diversas situações onde seja necessário efetuar simulações de redes pressurizadas de distribuição de água. Além do uso de programas refinados que trabalham com uma gama de variáveis para a elaboração de projetos e concepção de redes otimizadas, a implementação de controles automatizados em pontos estratégicos do sistema, auxiliam de forma eficiente no monitoramento e ajuste de parâmetros. Ao automatizar um sistema de grandes dimensões, como o de abastecimento, é possível realizar um gerenciamento mais eficiente, detectando problemas na rede em tempo real, além de ser possível introduzir algoritmos e programas computacionais capazes de operar alguns parâmetros imprescindíveis ao sistema como a vazão e a pressão.

Atualmente, existem diversos trabalhos envolvendo o uso de controladores em sistemas de distribuição de água, como nos casos de COSTA et al (2010), onde apresentaram um modelo de operação de sistemas de abastecimento de água que permite determinar as estratégias de operações com custos energéticos reduzidos. Esta otimização foi realizada a partir do uso de um Algoritmo Genético Híbrido (A.G.H.), um modelo que determina a melhor programação a ser seguida pelas bombas para um horizonte diário de operação. A partir de um processo iterativo é escolhida a estratégia que apresente o menor valor do custo energético diário. Para análise do algoritmo, aplicou-se em dois subsistemas adutores do todo o sistema de abastecimento de água de

Ourém. A partir da coleta de dados, construção do modelo no EPANET e calibração do sistema, foi feita uma análise comparativa do funcionamento do sistema submetido ao algoritmo genético híbrido e ao Algoritmo Genético Simples (A.G.S.). Os resultados confirmaram a eficiência do primeiro, em relação ao segundo, o modelo AGH-EPANET convergiu cinco vezes mais rapidamente quando comparado ao AGS-EPANET. O que comprova a eficiência dos algoritmos criados na busca da solução de melhor custo operacional de uma rede. BEZERRA et al (2012) apresentaram um sistema de controle com a finalidade de controlar a pressão em um ponto específico do sistema de abastecimento através de válvulas e do controle da velocidade de rotação dos sistemas de impulsão. O algoritmo para realizar o controle foi a Logica Fuzzy e a eficiência do sistema desenvolvido foi constatada através de experimentos em uma bancada. Os resultados obtidos foram satisfatórios. CAMBOIM et al (2014) desenvolveram um sistema de controle Fuzzy para o controle de pressão em sistemas abastecidos por bombas em paralelo. O sistema de controle atuou na velocidade de rotação dos conjuntos motor-bomba e no acionamento ou desligamento, de forma a manter a pressão de serviço constante em um ponto de operação que proporcione economia de água e energia. Para avaliar a metodologia proposta foi desenvolvida uma bancada experimental que simula o abastecimento com bombas em paralelo. Os resultados mostraram uma redução significativa do consumo energético, além do controle da pressão.

Neste trabalho, optou-se pelo uso do controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) do tipo convencional, por não haver a necessidade do conhecimento prévio da modelagem matemática que descreve o comportamento do sistema.

Ao se optar pela utilização de um controle na automação de uma dada tarefa, é importante que se analise todas as variáveis envolvidas, além das vantagens e desvantagens ao se aplicar determinado controle. É preciso definir quais variáveis serão controladas, e quais parâmetros se desejam alcançar, de forma a atender, de maneira satisfatória, as necessidades de cada usuário. Para VUKIC e KULJACA (2002), os tipos de controles mais conhecidos são:

- ❖ Controles on-off: são simples, fáceis de desenhar e de se operar. Geralmente são utilizados quando não se faz necessário o ajuste de parâmetros. Uma grande vantagem é que na maior parte das vezes não necessita de manutenção.
- ❖ Controlador Proporcional (P): relaciona a diferença entre o ponto de ajuste e a variável de processo. O ganho proporcional (K_p) determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro. Em geral, aumentando o ganho proporcional aumenta a velocidade da resposta do sistema de controle. Quanto maior for esse ganho, maiores serão as chances do sistema se tornar instável.
- ❖ Controlador Derivativo (D): faz com que a resposta do sistema diminua se a variável de processo for aumentando rapidamente. A derivada de resposta é proporcional à taxa de variação da variável de processo. Aumentar o ganho derivativo fará com que o sistema de controle reaja mais intensamente a mudanças no parâmetro de erro aumentando a velocidade da resposta global de controle do sistema. Na prática, a maioria dos sistemas de controle utiliza um valor muito pequeno deste ganho, pois a derivada de resposta é muito sensível ao ruído no sinal da variável de processo. Se o sinal de feedback do sensor é ruidoso ou se a taxa de malha de controle é muito lenta, a derivada de resposta pode tornar o sistema de controle instável.
- ❖ Controlador Integrativo (I): soma o termo de erro ao longo do tempo, por isso, mesmo com um erro mínimo, o ganho integral irá aumentar lentamente. A resposta integral é aumentada ao longo do tempo a menos que o erro seja zero, portanto, o efeito é o de conduzir o erro de estado estacionário para zero.

Para esse trabalho, será aplicado o controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) convencional. O controlador PID consiste na elaboração de um controle somando-se três termos: um termo proporcional ao erro, um termo proporcional a integral do erro e um termo proporcional à derivada do erro (DE NEGRI, 2004), conforme ilustrado na figura 2.

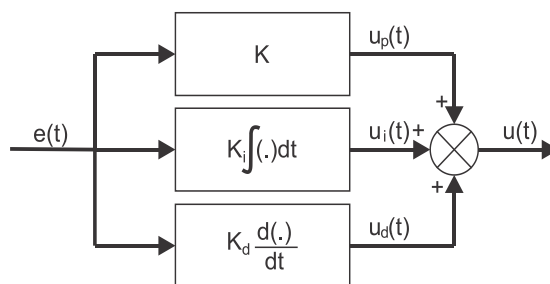


Figura 2 – Esquema ilustrativo do controlador do PID

Segundo HAFFNER (2013), o funcionamento do controlador PID, utilizado como algoritmo robusto, pode ser entendido da seguinte forma (ver Fig. 2):

- ❖ A variável $e(t)$ representa a diferença entre a entrada de referência e a variável de saída do sistema. Este sinal de erro será a variável de entrada do controlador PID, responsável por calcular sua derivada e sua integral;
- ❖ O sinal de saída do controlador é representado por $u(t)$, e será igual à magnitude do erro – $e(t)$ – multiplicada pelo ganho proporcional (K_p), adicionando o ganho integral (K_i) multiplicado pela integral do erro, e mais o ganho derivativo (K_d) multiplicado pela derivada do erro.

Na criação do controle PID para um dado processo, é importante conhecer as variáveis de entrada e os dados esperados de saída. Segundo BÖHM (2005), o controlador PID em tempo contínuo é geralmente dado pela equação 1:

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

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento e a aplicação de um controlador PID convencional na operação de uma bancada experimental composta por um conjunto moto-bomba (CMB), um *booster* (BST) e VRP's. As válvulas redutoras de pressão simulam um sistema de abastecimento com duas zonas de cotas topográficas diferenciadas conforme ilustrado na figura 3. Essa bancada experimental foi desenvolvida no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS – UFPB), a fim de proporcionar estudos de eficiência energética aliados a um controle das pressões de serviços, resultando na minimização das perdas de água e dos custos energéticos.

MATERIAIS E MÉTODOS

O Sistema Automatizado de Distribuição de Água (SADA) é uma rede experimental pressurizada desenvolvida no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS UFPB com o propósito de emular sistemas de abastecimento que fornecem água para regiões com cotas consideravelmente distintas.

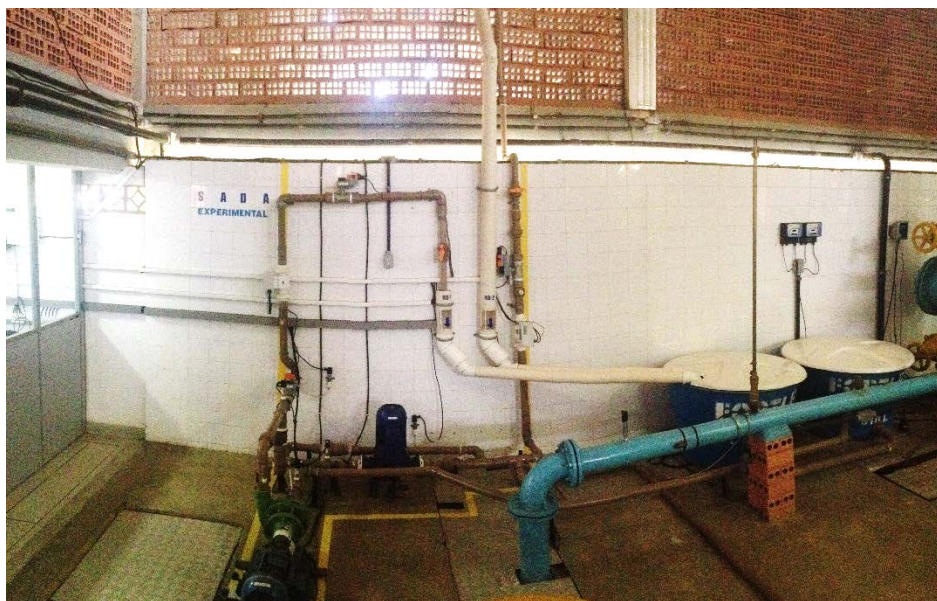


Figura 3 - Vista panorâmica da bancada experimental SADA

A metodologia empregada neste sistema consiste no controle síncrono de um conjunto moto-bomba, um *booster* e uma VRP, para regulação da pressão em pontos específicos da rede, garantindo, assim, eficiência hidráulica e energética no atendimento das zonas de consumo.

A rede SADA possui dois nós de consumo representados pelos ramais de descarga da zona baixa e zona alta. A estação elevatória do sistema é composta pela associação em série de um conjunto moto-bomba de 3 cv, e um *booster* de 1,5 cv. Este último está localizado à montante da zona alta e seu funcionamento é determinado pela demanda requerida, evitando, desta forma, desperdícios de energia elétrica.

A alimentação do sistema é feita por um reservatório de sucção com capacidade de armazenamento igual a 310 litros e a vazão produzida é conduzida até um reservatório de descarga de mesma capacidade, o qual está interligado ao reservatório alimentador permitindo, assim, a recirculação da água.

Ao longo da rede de distribuição, o sistema é dotado de sensores e atuadores. Para o monitoramento das pressões e vazões existem cinco transdutores de pressão e dois transdutores de vazão. Três válvulas proporcionais estão posicionadas estrategicamente ao longo da rede; duas delas, localizadas próximo aos pontos de descarga, simulam as variações das demandas, por meio da regulação do seu grau de fechamento e uma terceira, posicionada à montante da zona baixa, atua como uma válvula redutora de pressão.

Os sensores, atuadores e conversores de frequência comunicam-se através de uma placa de aquisição de dados da *National Instruments* com o software supervisor LabVIEW®, garantindo a leitura e o gerenciamento dos parâmetros elétricos e hidráulicos envolvidos.

Ao lado da bancada experimental encontra-se um Centro de Controle Operacional – CCO que dá suporte à gestão da rede.

A versão digital do controlador PID convencional foi implementado no sistema através de uma programação gráfica em ambiente LabVIEW®, para obter uma versão digital do PID, deve-se discretizar os componentes integrativos e derivativos. A maneira mais simples de discretizar uma integral é aproximá-la de uma soma, chegando à forma utilizada do controle na versão digital, conforme a equação abaixo:

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T_0}{K_i} \left[\frac{e(0) + e(k)}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} e(i) \right] + \frac{K_d}{T_0} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad \text{equação (2)}$$

Os parâmetros K_p , K_i e K_d foram determinados a partir dos testes realizados para avaliar o desempenho do controlador PID. O tempo de amostragem (T_0) determinado para o sistema foi de 10 ms.

Experimentalmente, determinou-se que o consumo referente à máxima demanda ocorre quando a válvula proporcional, instalada em cada uma das saídas que simula a zona abastecida, estiver operando com 30° de fechamento e a mínima demanda com 60° de fechamento. A fim de se avaliar a eficiência do controlador PID nos sistemas de impulsão e na válvula redutora de pressão, foram escolhidos dois cenários que simulam as seguintes situações:

- ❖ Cenário 1 – Primeiramente as válvulas que simulam os consumos das duas zonas foram posicionados nos ângulos de fechamento de 30°, representando um consumo máximo, onde foram simuladas as seguintes combinações:
 - a) Bomba (CMB) e Booster (BST) funcionando sem controle e com sua capacidade máxima.
 - b) Com o controle de pressão, através do PID:
 - I. Acionar apenas o CMB para controlar as pressões nas zonas baixa e alta com as respectivas pressões de 10 e 15 mca.
 - II. Acionar o CMB e o BST para controlar as pressões das zonas conforme item I.
 - III. Acionar o CMB juntamente com a válvula de controle (CV-1) no controle das pressões conforme item I.
 - IV. Acionar todos os elementos de controle e controlar as pressões de acordo com item I.
- ❖ Cenário 2 – As válvulas que simulam os consumos das duas zonas foram posicionadas nos ângulos de fechamento de 60°, representando um consumo mínimo, onde foram simuladas com as mesmas combinações propostas para o Cenário 1.

Para se avaliar a eficiência energética do controlador PID convencional, foi utilizado o analisador de energia FLUKE®, para medição dos parâmetros elétricos. Esta avaliação deu-se a partir do cálculo do Consumo Específico de Energia Elétrica (CEE), conforme equação 3. Este coeficiente é amplamente utilizado para avaliar a eficiência energética de sistemas de abastecimento através da relação entre a energia consumida e o volume bombeado (GOMES, 2010).

$$CEE = \frac{P_a \times t}{V} \quad \text{equação (3)}$$

Onde P_a é a potência elétrica medida em kW, t é o tempo de bombeamento em h (horas) e V é o volume bombeado em m³.

RESULTADOS E DISCURSSÕES

Primeiramente, foram realizados alguns testes de controle de pressão para se determinar os parâmetros do controlador. Os parâmetros dos atuadores são especificados na tabela 1. Como critério de avaliação foi admitido um erro de estado estacionário de 5%. O tempo de acomodação não foi um parâmetro determinante na escolha, uma vez que as partidas dos sistemas de impulsão e o fechamento das válvulas não podem ocorrer rapidamente, devido aos transientes hidráulicos gerados que podem danificar as instalações da bancada experimental.

Tabela 1 – Coeficientes do controlador PID para cada elemento de controle.

Elemento de Controle	K_p	K_i	K_d
CMB	0,05	0,4	0,8
BST	0,04	0,5	0,6
CV-1	0,00005	0,005	0,002

Após a determinação dos coeficientes do controlador, o sistema foi acionado conforme a metodologia proposta, obtendo os resultados apresentados na figura 4. Pode-se perceber que em todas as etapas, com exceção da primeira (que não tem atuação do controle), apresentaram convergência na ação do controlador PID. As sínteses das informações referentes a cada uma das etapas estão listadas na tabela 2. A etapa 0 simula o sistema atendendo as zonas abastecidas sem o uso do controlador PID, nessa etapa o consumo energético é elevado porque os sistemas de impulsão operam com rotação máxima (60Hz). A próxima simulação, representada pela etapa 1, foi estabelecida de forma a atender as duas zonas abastecidas apenas com o sistema de impulsão principal (CMB), neste caso as zonas abastecidas apresentaram pressões da ordem de 15 mca e houve uma economia energética quando comparada com a etapa 0, mas a zona baixa ainda se mostrou com pressões excessivas.

Na etapa 2 o sistema foi controlado através do CMB e do BST. As zonas abastecidas tiveram suas pressões controladas nas referências previamente determinadas e o CEE (Consumo Específico de Energia) foi o menor de todas as etapas simuladas. Quando comparado com a operação do sistema sem controle a redução do consumo específico de energia foi de 29%. Atuando com o CMB e BST, na etapa 3, as pressões foram controladas, mas o CEE foi superior ao da etapa 2. Por fim, na etapa 4, a atuação com a combinação de todos os elementos, proporcionou um controle das pressões e uma economia próxima a da etapa 2.

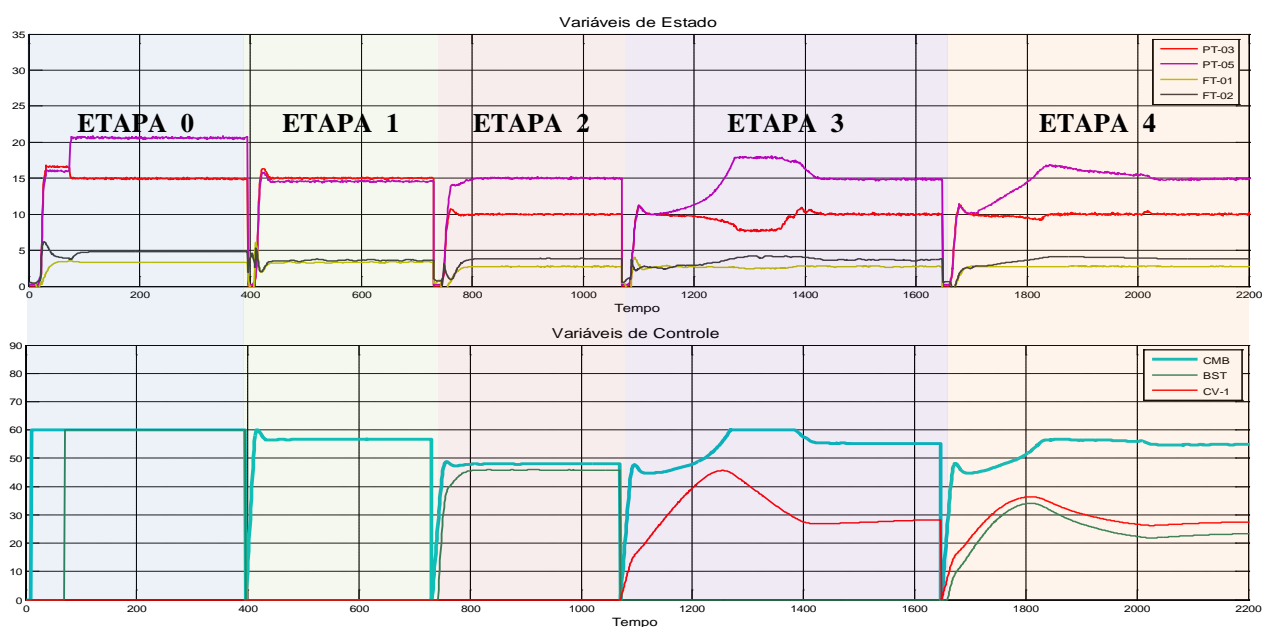


Figura 4 – Resultados da simulação para a demanda máxima.

Tabela 2 – Resultados calculados do CEE para cada uma das etapas da simulação do consumo máximo.

Etapa	Controle	Variáveis Controladas	Potência Elétrica (kW)	Vazão (m³/h)	CEE (kWh/m³)
0	NÃO	CMB+BST	3,70	8,14	0,45
1	SIM	CMB	2,44	7,01	0,35
2	SIM	CMB+BST	2,14	6,61	0,32
3	SIM	CMB+CV-1	2,23	6,60	0,34
4	SIM	CMB+BST+CV-1	2,38	6,58	0,36

A simulação do cenário 2 apresentou os resultados mostrados na figura 5. Nas etapas 2, 3 e 4 houve convergência no controle da pressão dos setores e excesso de pressão nas etapas 0 e 1, semelhante ao que foi identificado na simulação do cenário 1. A síntese dos dados da simulação do cenário 2 são exibidos na tabela

3. De acordo com esses dados, conclui-se que a etapa 4 foi a que encontrou o melhor ponto de operação com base no Coeficiente Específico de Energia e no controle das pressões. A etapa 1 apresentou o melhor valor do CEE, mas o excesso de pressão na zona baixa proporciona um desperdício de água. Portanto a etapa 4 é a mais eficiente, e quando comparada ao funcionamento sem o controlador PID, apresentou uma redução do consumo específico de energia de 49,33%.

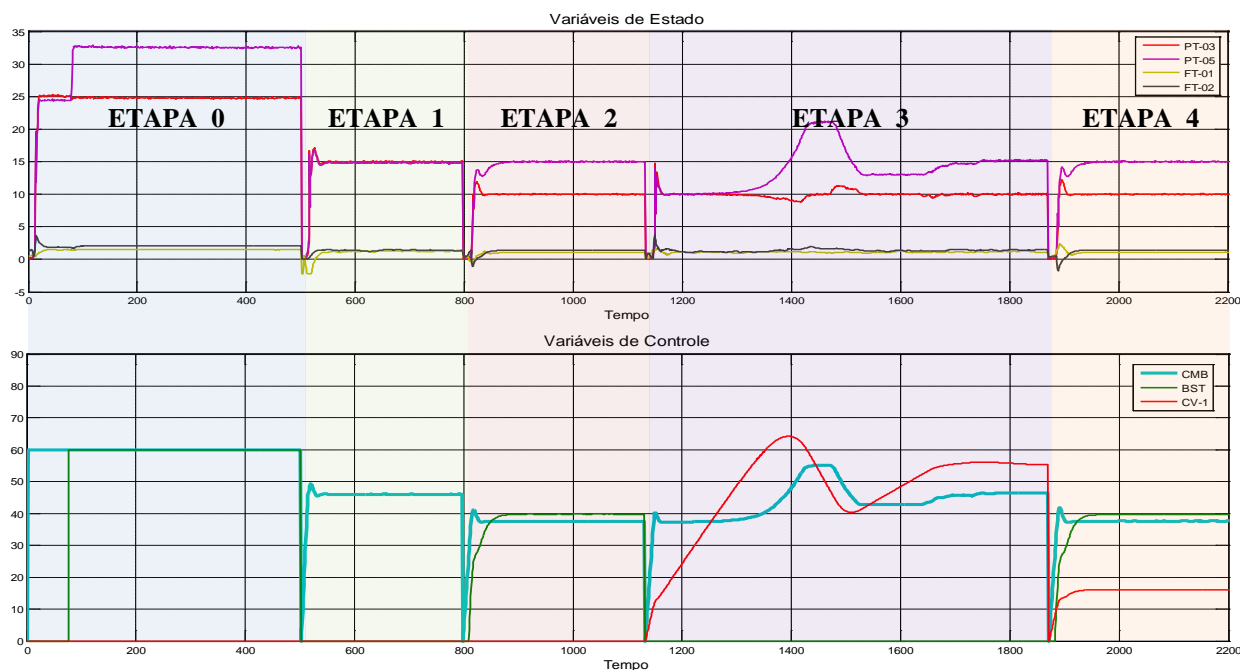


Figura 5 – Resultados da simulação para a demanda mínima

Tabela 3 – Resultados calculados do CEE para cada uma das etapas da simulação do consumo mínimo.

Etapa	Controle	Variáveis Controladas	Potência Elétrica (kW)	Vazão (m³/h)	CEE (kWh/m³)
0	NÃO	CMB+BST	2,75	3,57	0,77
1	SIM	CMB	1,05	2,91	0,36
2	SIM	CMB+BST	1,00	2,50	0,40
3	SIM	CMB+CV-1	1,04	2,40	0,43
4	SIM	CMB+BST+CV-1	1,00	2,51	0,39

CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos com o sistema funcionando com e sem o uso do controlador PID e também com a atuação do conjunto moto-bomba, *booster* e VRP, seguindo os cenários definidos a fim de simular uma situação real para um sistema de abastecimento que fornece água para zonas com topografias diferenciadas, o algoritmo implementado PID convencional apresentou um controle satisfatório das pressões das zonas abastecidas, além de proporcionar uma redução do consumo de energia. Quando a simulação foi realizada considerando-se uma situação de máxima demanda o uso do controlador promoveu uma economia no consumo energético de 29% se comparado com a mesma situação sem a utilização do controlador. No caso onde a demanda foi mínima essa economia chegou a 49,33%, assim mostrando a importância da intervenção de um controlador num sistema de abastecimento de água visando a redução dos gastos energéticos gerados sem comprometer a qualidade do serviço da companhia.

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

1. BEZERRA, S. T. M. Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia. João Pessoa. 2009. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal da Paraíba 2009.
2. BÖHM, J. BOBÁL, V. FESSL, J. e MACHÁČEK, J. Digital Self-tuning Controllers - Algorithms, Implementation and Applications, U.K. 2005.
3. CAMBOIM, W.L.L.; GOMES H. P.; SILVA, S. A. Aplicação de técnicas Fuzzy no controle de pressão em sistemas de abastecimento de água. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.19 n.1, p. 67-77, jan/mar 2014.
4. COSTA, L.H.M.; CASTRO, M.A.C.; RAMOS, H. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.15 n.2, p. 187-196, abr/jun 2010.
5. DE NEGRI, V.J. Introdução aos Sistemas para Automação e Controle Industrial. LASHIP / EMC / UFSC. Florianópolis, 2004.
6. GOMES, H.P. Sistemas de Saneamento – Eficiência Energética. Editora Universitária – UFPB, João Pessoa, 2010.
7. HAFFNER, J. F. Projetos de Sistemas de Controle Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul Departamento de Engenharia Elétrica. 2013.
8. TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Abastecimento de Água. 4. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013. 643 p.
9. VUKIC, Z. e KULJACA, O. Lectures On Pid Controllers. Automation and Robotics Research Institute, The University of Texas at Arlington. 2002.