

Aplicação De Um Controlador Baseado Na Lógica Fuzzy Para O Controle Da Vazão E Da Pressão De Um Sistema De Irrigação

Kamilla H. Mendonça*, Hugo A. Moreira*, Heber P. Gomes*, Juan M. Villanueva**, Thommas K. Flores*, Lucas Toledo*

* *Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba (Tel: 55 (083) 3216-7037 R.22; e-mail: kamillapdm@hotmail.com, heberp@uol.com.br, lucas.toledo@cear.ufpb.br, thommas.flores@cearufpb.br, hugomarinho93@outlook.com).*

** *Department of Electrical Engineering
Federal University of Paraíba
Campus I - Lot. Cidade Universitaria, PB, 58051-900, Brazil
jmauricio@cear.ufpb.br*

Abstract: Irrigation systems are present all over the world, boosting agriculture and agroindustry, sectors essential to the dynamism and development of a region. Widely associated with food production, the irrigation processes are diverse and changeable, adapting to the characteristics of each cultivated region. However, despite being so widespread, its operation is not always linked to efficient and optimized processes, and with agriculture being the largest concentration of fresh water consumption produced in the world, its operation must prioritize the conscious use of water and energy. The motivation for this work arises from the importance of reducing water and energy losses detected in the inefficient operation of pressurized irrigation networks. Thus, the objective of this work was the development of an intelligent control system with the use of Fuzzy logic, to optimize energy efficiency in an automated pressurized irrigation system. The developed controller was applied to a fully automated and instrumentalized experimental bench, aimed at controlling the flow and pressure at the point that simulates the control head of an irrigation system. The controller proved to be efficient in bringing the flow and pressure of the system to the values established as operating references. In the first scenario, the system recorded a 55% reduction in frequency, for the second scenario the system showed a reduction of 11.67% while the reduction presented in the third scenario was 15%. All calculated in relation to the nominal frequency of operation of the network.

Resumo: Os sistemas de irrigação estão presentes em todo mundo, impulsionando a agricultura e a agroindústria, setores essenciais ao dinamismo e desenvolvimento de uma região. Amplamente associada à produção de alimentos, os processos de irrigação são diversos e mutáveis, se adequando às características de cada região cultivada. No entanto, apesar de tão largamente difundida, sua operação nem sempre está vinculada a processos eficientes e otimizados, e estando na agricultura a maior concentração do consumo de água doce produzida no mundo, sua operação deve priorizar o uso consciente de água e energia. A motivação deste trabalho surge a partir da importância em reduzir as perdas de água e energia detectadas na operação ineficiente de redes pressurizadas de irrigação. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de controle inteligente com o emprego da lógica Fuzzy, para otimizar a eficiência energética em um sistema automatizado de irrigação pressurizada. O controlador desenvolvido foi aplicado em uma bancada experimental totalmente automatizada e instrumentalizada, com vistas a controlar a vazão e a pressão no ponto que simula o cabeçal de controle de um sistema de irrigação. O controlador se mostrou eficiente ao levar a vazão e a pressão do sistema aos valores estabelecidos como referências de operação. No primeiro cenário, o sistema registrou uma redução de 55% da frequência, para o segundo cenário o sistema apresentou uma redução de 11,67% enquanto a redução apresentada no terceiro cenário foi de 15%. Todas calculadas com relação a frequência nominal de operação da rede.

Keywords: Irrigation Systems; Fuzzy Logic; Controller; Automation

Palavras-chaves: Sistemas de irrigação; Lógica Fuzzy; Controlador

1. INTRODUÇÃO

Segundo estudo realizado pela Agência Nacional das Águas (ANA) e publicado no Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil, a irrigação é responsável por 68,4% do consumo total de água no Brasil (BRASIL, 2019). Ou seja, o setor de irrigação apresenta um consumo estimado de 101,7 m³/s, seguido pelo uso voltado para indústrias e abastecimento humano. Sob tal panorama, é relevante destacar a necessidade em se empregar métodos e estudos que tornem esta atividade cada vez mais eficiente e otimizada.

Em um estudo acerca da eficiência dos atuais sistemas de irrigação atuantes no mundo, no período de 2004 a 2009, registrou-se um consumo de 2469 km³ de água para irrigação, destes apenas 1257 km³ foram efetivamente utilizados, sendo o restante perdido para evapotranspiração, interceptação ou transporte (JÄGERMEYR, et al 2015).

Para efficientização no uso da água e energia, a automação surge como uma importante ferramenta. Com a automação dos sistemas de irrigação, é possível monitorar e corrigir imperfeições em tempo real, reduzindo os períodos de ineficiência decorrentes de problemas gerados nos períodos de operação da rede. Com os sistemas automatizados é possível a adoção de controladores com o intuito de otimizar as atividades delegadas a operadores e feitas, muitas vezes, de maneira empírica e sem os devidos cuidados técnicos, requeridos em sistemas de tamanha magnitude (BEZERRA e GOMES, 2013).

Testezlaf (2017) aponta que os dois erros mais comuns verificados nos atuais sistemas de irrigação está em aplicar a água em proporções inadequadas, ou seja, seu manejo; e a escolha inapropriada do método. Desta forma, a aplicação de técnicas de automação e controle em algumas etapas do processo de irrigação auxiliam no manejo mais eficiente e otimizado da água e da energia, estimulando ao máximo o crescimento da planta e, desta forma, possibilitando um aumento na produtividade e uma redução nos desperdícios encontrados em campo.

A utilização de sensores e atuadores, bem como válvulas de controle, já faz parte da realidade de diversos produtores. O uso de medidores que avaliam a umidade do solo e controlam seus níveis já podem ser encontrados no mercado. O funcionamento desses sistemas se baseia nos dados recebidos pelos sensores presentes no solo e quando comparados com parâmetros pré-determinados, atuam no ligamento ou desligamento dos registros no cabeçal de controle, liberando o volume de água necessário (NERYS et al, 2006) e (QUEIROZ et al, 2005).

Há também registro de automação no ligamento e desligamento do conjunto motor bomba, por meio da utilização de temporizadores que acionam a bomba a partir dos intervalos de rega e em períodos já pré-determinados. Como não há análise do nível de umidade do solo, além de não se verificar a real necessidade de introduzir algum volume de água, essa prática pode levar a dois erros comuns: excesso de água, que pode levar a lixiviação desnecessária do

solo; ou falta de água, que pode ocasionar um déficit hídrico para a cultura, interferindo em seu pleno desenvolvimento.

Em sistemas pressurizados de irrigação com múltiplas parcelas, o uso de sensores que analisam o nível de umidade do solo é bastante empregado. Seu uso intenso se justifica pela análise do nível de água presente no solo, e a necessidade de man-er aberta a válvula de fluxo ou fechá-la, conforme a demanda de água por parte da cultura e do solo.

Além das válvulas de fluxo, há também a instalação de válvulas multifuncionais, que regulam a pressão em cada parcela a partir da introdução de perda de carga, decorrente do seu fechamento parcial.

O uso de equipamentos como inversores de frequências e válvulas redutoras de pressão auxiliam no controle das variáveis de interesse, em diferentes cenários de operação do sistema de irrigação.

O uso de inversores de frequência proporciona vantagens hidráulicas, elétricas e econômicas, dentre elas: redução da pressão na tubulação, diminuição de transientes hidráulicos e elétricos, melhoria no fator de potência, redução na corrente de partida, possibilidade de integração com sistemas de automação, redução no consumo e, conseqüentemente, no custo de energia elétrica (CHEREM, 2016). Além disso, os inversores de frequência dispensam a utilização de múltiplos motores ou sistemas mecânicos de variação de velocidade, que introduzem perdas adicionais de energia (MESQUITA, 2009).

Os sistemas de irrigação trabalham com valores fixos de vazão e pressão na entrada de suas parcelas (áreas ocupadas pelas culturas que serão cultivadas). No entanto, nem sempre todas as parcelas terão a mesma necessidade de irrigação, o que pode variar com o tipo de cultura, área e condições de clima e umidade do solo. Os sistemas de irrigação podem trabalhar por turnos ou demanda. Na irrigação por demanda, uma parcela do solo é irrigada até que toda ela atinja a lâmina de água necessária (MORAES, et al 2014).

JunHui et al (2019) realizaram um trabalho de implementação de um controle com base na Lógica Fuzzy associada à irrigação controlada pelo método dependente da luz, para economia de água. O sistema decidiu quando deveria ser a próxima irrigação através do teor de umidade do substrato, quantidade e nutrientes de irrigação. O sistema desenvolvido se mostrou eficiente ao resolver o problema de maneira oportuna, moderada e com economia do consumo de água para irrigação.

De acordo com a problemática apresentada, este trabalho tem como objetivo aplicar um controle inteligente, com base na lógica fuzzy, com a finalidade de realizar o controle da vazão e da pressão em uma rede simulada de irrigação. O sistema de controle proposto irá controlar duas variáveis hidráulicas visando uma redução do consumo energético da rede.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para validação do controlador proposto, foi utilizada uma bancada experimental do Laboratório de Eficiência

Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS/UFPB. O Sistema Automatizado de Distribuição de Água – SADA é uma bancada experimental pressurizada que simula uma rede com demandas hidráulicas diferenciadas em cada uma de suas duas saídas (Fig. 1).



Fig. 1 Rede experimental SADA.

O SADA é composto por duas zonas de pressão. A zona baixa (ZB) possui cota de 1,50 m e a zona alta (ZA) uma cota de 6,50 m. Entende-se por ZB o trecho percorrido desde o reservatório de alimentação (RNF) até o ramal de descarga RD-1. A ZA é representada pelo trecho percorrido do reservatório até o ramal de descarga RD-2. A estação elevatória desse sistema é composta por um conjunto motor bomba (CMB) de 3 CV de potência cujo acionamento é realizado através de um conversor/inversor de frequência. Quando associado a um sistema de controle automático, o conversor permite manter as pressões de serviço em níveis constantes pré-estabelecidos. Evitando eventuais sobrepressões e gastos energéticos desnecessários.

A bancada também está equipada com cinco transdutores de pressão: PT-1, PT-2, PT-3, PT-4 e PT-5, sendo o PT-3 responsável pela medição da pressão da ZB e o PT-5 da ZA. Dois medidores de vazão: FT-1, ZB, e FT-2, ZA. Há também três válvulas de controle (CV): CV-1, CV-2 e CV-3. As válvulas de controle possuem uma variação de 0° a 90° em seu estágio de funcionamento. A 0° a válvula encontra-se totalmente aberta e a 90° totalmente fechada. A válvula CV-1 usualmente é denominada de válvula redutora de pressão (VRP), pois seu fechamento parcial gera uma perda de carga a montante da ZB, reduzindo a pressão em PT-3.

A leitura dos parâmetros hidráulicos fornecidos pelos sensores e atuadores é realizada a partir da comunicação estabelecida entre a placa de aquisição de dados da National Instruments e o software supervisor LabVIEW®. Bem como a execução de ações de comando sobre as válvulas proporcionais e os conversores de frequência.

A bancada utilizada para validação dos ensaios possui um comportamento dinâmico, conforme sejam realizadas variações em seus atuadores, tais como inversor de

frequência e válvulas. A bancada simula uma rede hidráulica, com variações de vazão e pressão ao longo de suas duas zonas, o que torna complexa a realização de uma modelagem matemática. No entanto, a leitura de seus parâmetros através dos sensores instalados ao longo da rede permite um conhecimento, por parte do operador, do seu funcionamento.

A Fig. 2 apresenta o layout do supervisor empregado. O SADA permite a simulação de redes hidráulicas, o que possibilita o desenvolvimento de pesquisas experimentais na área de controle de sistemas hidráulicos.

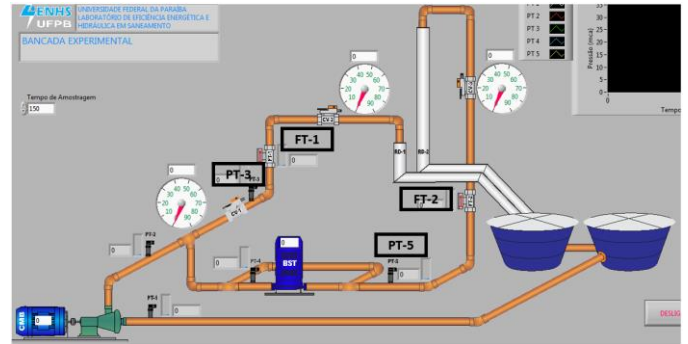


Fig. 2 Sistema supervisor SADA

2.1 Caracterização da Parcela de Irrigação

Há diversas metodologias para dimensionamento de sistemas de irrigação, variáveis entre si sob os mais diversos aspectos. No entanto, apesar das várias possibilidades, é importante que se chegue a um dimensionamento que mais se adeque ao real, tendo como objetivo o desenvolvimento pleno da cultura e uma máxima produtividade para o agricultor.

Levando em consideração a necessidade em se estimar a quantidade ideal de água que deve ser ministrada ao conjunto solo-planta para garantir um desenvolvimento otimizado, a Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, forneceu o programa CROPWAT.

O CROPWAT é um programa que utiliza o método da FAO Penman-Monteith para determinar a evapotranspiração das culturas (ET), sendo a radiação solar estimada com os dados de insolação. Os valores de ET são utilizados posteriormente para estimar os requerimentos de água dos cultivos e o calendário de irrigação.

Através de seus oito módulos (cinco de entradas de dados e três de cálculo) é possível fazer o levantamento da exigência de água pela cultura, a frequência de irrigação, e o esquema de irrigação para uma ou mais cultura dentro de uma determinada área (SALES, et al, 2016). Seus módulos de entrada de dados são:

- **Clima:** neste primeiro módulo serão inseridos dados referentes a temperatura, velocidade do vento, umidade do ar e horas de insolação, e será fornecida a evapotranspiração;
- **Chuva:** neste segundo módulo serão inseridos dados referentes às precipitações, para que o CROPWAT possa fornecer a precipitação efetiva. Obtida pelo método proposto

pelo USDA Soil Conservation Service (USDA-SCS). Este método foi desenvolvido por meio de balanços hídricos relacionando-se a entrada de precipitação com as saídas por escoamento superficial e percolação, bem como a água retida na zona radicular, para várias culturas (MINUZZI e RIBEIRO, 2012).

- **Cultura:** neste módulo necessita-se fornecer ao programa informações sobre a cultura, tais como coeficiente de cultivo, profundidade das raízes conforme nível de crescimento e fator de depleção;
- **Solo:** neste quarto módulo torna-se necessário o conhecimento das características do solo onde a cultura irá se desenvolver;
- **Requerimento de água do cultivo:** este último módulo é calculado após o preenchimento de dados dos módulos anteriores, e utilizado como dado de entrada para o levantamento dos últimos módulos.

Os critérios adotados para determinação da lâmina líquida durante todo o ciclo das culturas foram os seguintes: irrigar quando a água facilmente disponível (AFD) estiver próxima a zero, período no qual a planta ainda pode extrair água do solo sem passar por déficit hídrico; e aplicar uma lâmina de água variável para atingir a capacidade de campo do solo.

Finalizando a inserção dos dados para o levantamento do requerimento de água pela cultura, o passo seguinte é realizar o dimensionamento dos três últimos módulos: cronograma de irrigação das culturas; padrão de colheita; esquema de irrigação. O dimensionamento e cálculo dos parâmetros de interesse são realizados a partir do default do próprio programa, recomendado pela FAO.

Com o uso do CROPWAT chegou-se ao valor de Lâmina Bruta (Lb) de 53,3 mm. Adotando parâmetros referentes ao cultivo do feijão, e para uma Lb = 53,3 mm, e com o intuito de validar o controlador, foram feitas três simulações no sistema. O objetivo foi utilizar o SADA em três diferentes cenários, com requisitos de vazão e pressão diferenciados para cada um deles, conforme traz a Tabela 1.

Tabela 1. Vazões e pressões de referência para a ZB

Parâmetros	Zona Baixa		
	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Pressão (mca)	6,0	11,0	14,0
Vazão (L/s)	4,0	9,0	4,0

2.4 Controlador Fuzzy

Após determinar os valores de referência a partir do dimensionamento teórico das parcelas de irrigação, chegou-se às referências de vazão e pressão na entrada da parcela.

O controlador Fuzzy foi desenvolvido a partir do estudo da bancada SADA. Para isso, foram feitas alterações na velocidade do CMB, através do inversor de frequência, bem como variações nos ângulos de fechamento das válvulas, CV-1 e CV-2. O objetivo das simulações foi entender como as

vazões e pressões da planta se comportam nos mais variados cenários.

A bancada utilizada para aplicação e validação do controlador possui duas zonas de pressão, nomeadas como zona baixa (leituras de vazão no FT-1 e pressão no PT-3) e zona alta (leituras de vazão no FT-2 e pressão no PT-5). No entanto, optou-se por aplicar o controlador apenas na ZB, utilizando como sensores de referência o PT-3 e FT-1 e como atuadores o inversor de frequência associado ao CMB e a CV-1 e CV-2. A zona alta permanecerá fechada durante toda a simulação. A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos do controlador, que irá atuar na rotação do CMB e na angulação da VRP (CV-1) e CV-2.

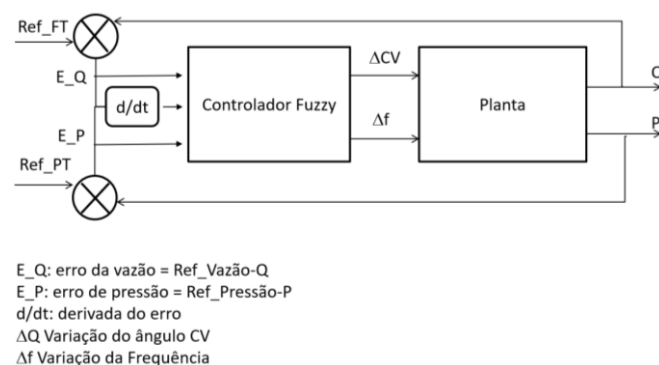


Fig. 3 Diagrama de blocos do controlador.

As variáveis de entrada e saída adotadas para a ZB estão descritas na Tabela 2

Tabela 2. Vazões e pressões de referência para a ZB

Variáveis de Entrada	
Erro FT-1	E
Derivada Do Erro FT-1	DE
Erro PT-3	E
Derivada Do Erro PT-3	DE
Variáveis de Saída	
ΔVRP (CV-1)	DA
ΔCV (CV-2)	DA
ΔIF	DF

Tabela 3. Funções de pertinência para o controle da vazão na ZB.

	ENGA	ENG	EZ	EP	EPA
DENA	DAPA	DAP	DAZ	DAN	DANA
DEN	DAPA	DAP	DAZ	DAN	DANA
DEZ	DAPA	DAP	DAZ	DAN	DANA
DEP	DAPA	DAP	DAZ	DAN	DANA

DEPA	DAPA	DAP	DAZ	DAN	DANA
------	------	-----	-----	-----	------

Para cada variável de entrada e de saída fo-ram criadas cinco funções de pertinência, sendo duas trapezoidais nos extremos do gráfico e três triangulares. A Tabela 3 apresenta a interação das variáveis de entrada com as variáveis de saída, formulando-se então, as 25 regras para o controle da vazão na ZB.

Tabela 4. Funções de pertinência para o controle da pressão na ZB.

	ENGA	ENG	EZ	EP	EPA
DENA	DFNA/ DAPA	DFN/ DAP	DFZ/ DAZ	DFP/ DAN	DFPA/DA NA
DEN	DFNA/ DAPA	DFN/ DAP	DFZ/ DAP	DFP/ DAN	DFPA/DA NA
DEZ	DFNA/ DAPA	DFN/ DAP	DFZ/ DAZ	DFP/ DAN	DFPA/DA NA
DEP	DFNA/ DAPA	DFN/ DAP	DFZ/ DAZ	DFP/ DAN	DFPA/DA NA
DEPA	DFNA/ DAPA	DFN/ DAP	DFZ/ DAZ	DFP/ DAN	DFPA/DA NA

Onde,

ENGA – Erro FT-1 (PT-3) Negativo Alto

ENG – Erro FT-1 (PT-3) Negativo

EZ – Erro FT-1 (PT-3) Zero

EP – Erro FT-1 (PT-3) Positivo

EPA – Erro FT-1 (PT-3) Positivo Alto

DENA – Derivada do Erro Negativo Alto

DEN – Derivada do Erro Negativo

DEZ – Derivada do Erro Zero

DEP – Derivada do Erro Positivo

DEPA – Derivada do Erro Positivo Alto

DANA – Delta Ângulo CV2/ (VRP) Negativo Alto

DAN – Delta Ângulo CV2/ (VRP) Negativo

DAZ – Delta Ângulo CV2/ (VRP) Zero

DAP – Delta Ângulo CV2 / (VRP) Positivo

DAPA – Delta Ângulo CV2/ (VRP) Positivo Alto

DFPA – Delta Frequência Positivo Alto

DFP – Delta Frequência Positivo

DFZ – Delta Frequência Zero

DFN – Delta Frequência Negativo

DFNA – Delta Frequência Negativo Alto

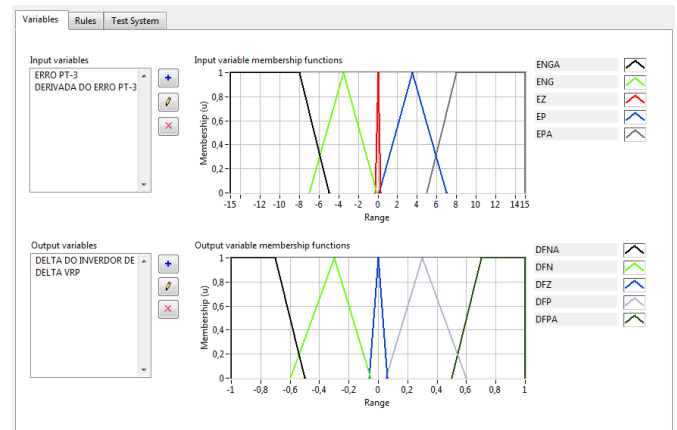


Fig. 4 Variáveis de entrada e saída do controlador da pressão na ZB.

O layout do LabVIEW® para inserção das variáveis de entrada e a interação, através das funções de pertinência, com as variáveis de saída do controlador da pressão na ZB, está representado na Figura 4.

Este trabalho utilizou, como método de defuzzyficação, o centro de gravidade. Esse método fornece a média das áreas das figuras que representam os graus de pertinência de um subconjunto fuzzy. Adotou-se o método Mamdani de inferência.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de validar o controlador desenvolvido, optou-se por sua aplicação em três diferentes configurações de sistema, onde as regras são aplicadas no controle da vazão e da pressão, separadamente, na ZB. No sistema descentralizado, o controlador desenvolvido é do tipo MIMO, ou seja, múltiplas entradas (Vazão - erro da vazão e derivada do erro; Pressão - erro da pressão, derivada do erro) e múltiplas saídas. Para a vazão, a saída será a variação do ângulo de CV-2, e para pressão as variáveis de saída são a variação de CV-1 ou VRP e um delta da frequência.

Para cada simulação, foram testados diferentes set points para cada uma das duas variáveis de controle (PT-3 e FT-1 / ZB). Os set-points foram calculados a partir da metodologia descrita no item 3. A Tabela 5 traz um resumo dos principais parâmetros necessários ao cálculo e dimensionamento do setor de irrigação, bem como dos valores adotados para o controlador da ZB.

Tabela 5. Parâmetros Zona Baixa – Feijão.

Parâmetro	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Lâmina bruta (mm)	53,30	53,30	53,30
Área espaçamento (m x m)	0,80 x 0,30	0,80 x 0,30	0,80 x 0,30
Vazão do gotejador (L/h)	1,42	1,42	1,42
Área de cultivo (m x m)	20 x 50	40 x 80	40 x 100

Vazão (L/s)	1,25	9,00	4,00
Pressão (mca)	6,00	11,00	14,00

No primeiro cenário de operação proposto, espera-se que o controlador atue satisfatoriamente, atingindo uma pressão de 6 mca e uma vazão de 1,25 L/s na ZB. A Figura 5 (a) traz o gráfico referente ao controle da pressão e a Figura 5 (b), refere-se ao comportamento do sistema com controle da vazão.

Analisando o gráfico ilustrado na Figura 5 (a), é possível constatar que o controlador leva cerca de 180 segundos para levar a pressão ao seu valor de referência, sem apresentar overshoot, permanecendo em seu valor de referência até o final do teste. No entanto, a atuação do controlador no FT-1 para o controle da vazão, apresenta um overshoot, atingindo aproximadamente 5 L/s, e, através da atuação do controlador, inicia-se o seu processo de descida, objetivando seu valor de referência, ou seja 1,25 L/s. O overshoot apresentado no controle da vazão justifica-se pelo tempo levado pela CV-2 para reduzir a angulação. Cada ângulo leva 1 segundo para uma variação unitária, ou seja, para seus 90° de atuação, há um tempo de 1 minuto e 30 segundos para sair do estágio totalmente aberta e atingir seu estado de totalmente fechada.

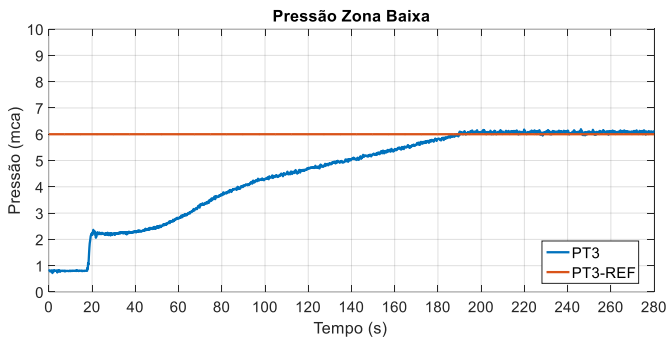


Fig. 5 (a) Cenário I – Controle da Pressão ZB.

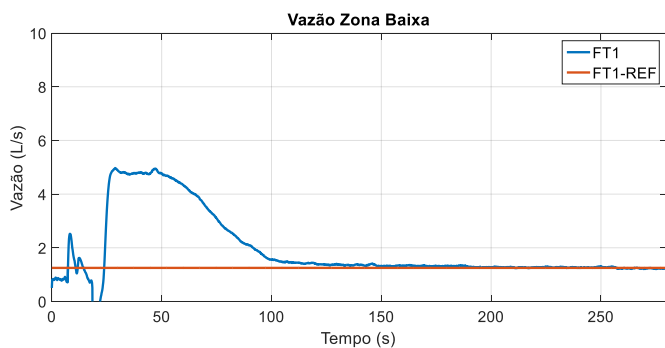


Fig. 5 (b) Cenário I – Controle da Vazão ZB.

A Figura 6 traz os elementos de controle que agiram para permitir que o sistema operasse com seus valores de referência apenas dois minutos após o início de sua operação.

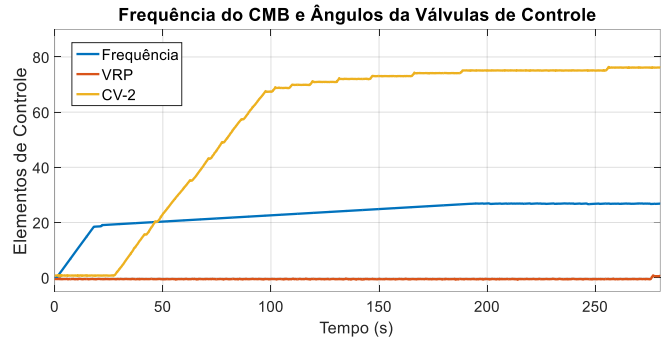


Fig. 6 Atuação dos elementos de controle.

Sabendo que a vazão de projeto do cenário I apresenta um valor relativamente baixo, quando comparado ao porte do sistema, conforme o esperado, a CV-2 opera próxima ao seu fechamento, cerca de 78°. Além disso, percebe-se que o inversor de frequência apresenta influência predominante no controle da pressão. Conforme pode-se observar na Figura 6, ao atingir o tempo de 180 segundos, tanto o inversor de frequência, quando a pressão atinge seu regime permanente de operação, permitindo que a pressão alcance seu valor de referência de 6 mca, a uma frequência de 26,8 Hz.

No Cenário II, espera-se que o controlador atue satisfatoriamente, atingindo uma pressão de 11 mca e uma vazão de 9 L/s. A Figura 7 (a) traz o gráfico referente ao controle da pressão e a Figura 7 (b), refere-se ao comportamento do sistema com o controle da vazão.

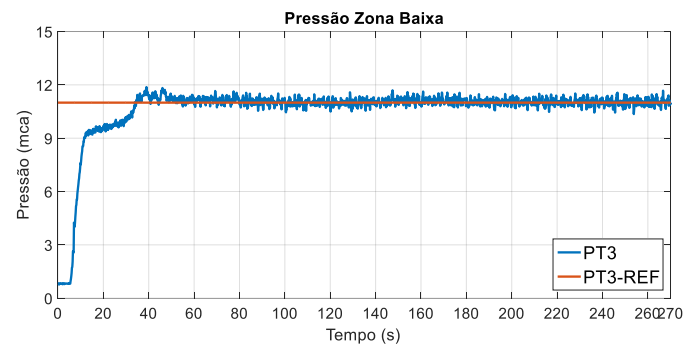


Figura 7 (a). Cenário II – Controle da Pressão ZB

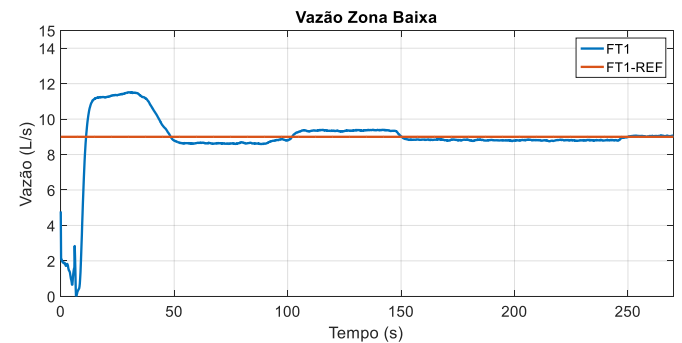


Figura 7 (b). Cenário II – Controle da Vazão ZB

No Cenário II, a pressão atinge seu valor de referência em apenas 40 segundos após o início da atuação do controlador, sem apresentar um sobressinal considerável. No entanto, a vazão, mesmo atingindo seu valor de referência em aproximadamente 50 segundo após atuação do controlador, apresenta um sobressinal, atingindo uma vazão máxima de 11,8 L/s. Para levar FT-1 ao seu valor de referência, o controlador atua em CV-2, permitindo variação em seu ângulo de operação. É importante salientar que o elemento de controle que age na vazão, para seu controle é a válvula CV-2, que varia cada ângulo em um intervalo de 1 segundo,

A Figura 8 traz os elementos de controle que agiram para permitir que o sistema operasse em seus valores de referência.

Ao analisar o gráfico da Figura 8, percebe-se uma instabilidade maior nas válvulas, enquanto a frequência acompanha o comportamento da pressão, registrado no gráfico da Figura 7 (a). Tal instabilidade em atingir um patamar ideal de angulação para as duas válvulas é refletido no comportamento da vazão, que mesmo atingindo seu valor de referência, apresenta um erro em regime permanente.

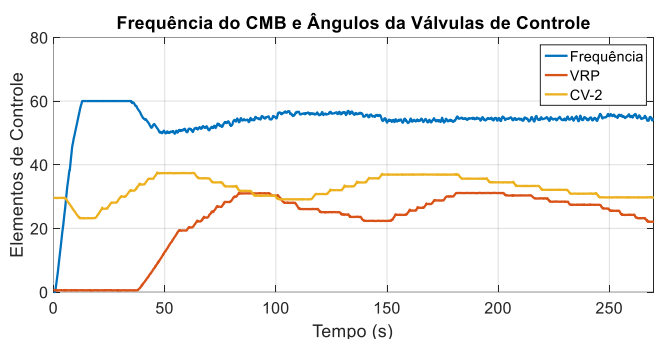


Figura 8. Atuação dos elementos de controle

No Cenário III, espera-se que o controlador atue satisfatoriamente, atingindo uma pressão de 14 mca e uma vazão de 4 L/s na ZB. A Figura 9 (a) traz o gráfico referente ao controle da pressão e a Figura 9 (b), refere-se ao comportamento do sistema ao controle da vazão.

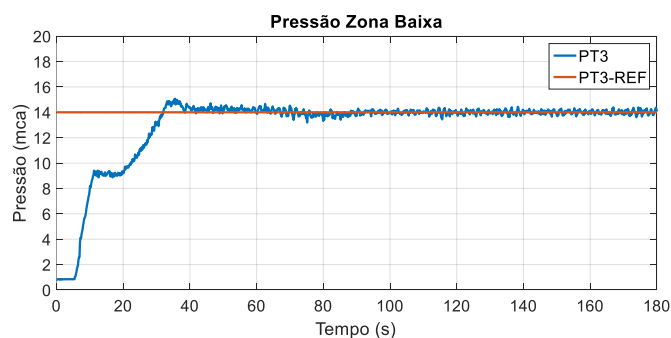


Figura 9 (a). Cenário III – Controle da Pressão ZB

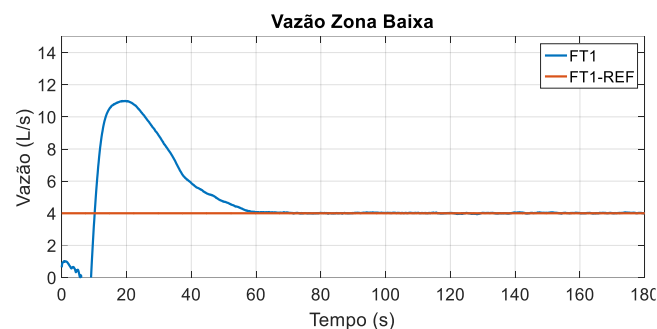


Figura 9 (b). Cenário III – Controle da Vazão ZB

No Cenário III, os dois sensores apresentam sobressinal. Conforme gráfico da Figura 9 (a), a pressão atinge um sobressinal elevando a resposta até 15 mca, retornando rapidamente para seu valor de referência, no instante de tempo $t = 40$ segundos. No entanto, é neste terceiro cenário, que a vazão apresenta seu maior sobressinal, atingindo a marca de 11 L/s, quase 3 vezes maior do que o seu set point desejado, ou seja, 4 L/s.

A Figura 10 traz os elementos de controle que agiram para permitir que o sistema operasse em seus valores de referência.

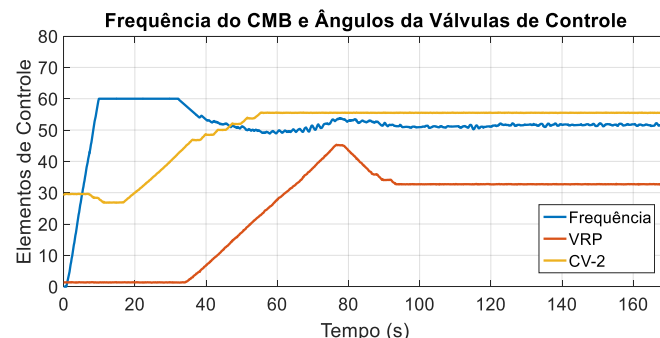


Figura 10. Atuação dos elementos de controle

Percebe-se, novamente a predominância do inversor de frequência em rapidamente levar a pressão ao seu valor de referência. No entanto, é válido salientar, que mesmo apresentando um tempo maior de estabelecimento em seu regime estacionário, quando comparada com a pressão, a vazão levou apenas 60 segundos para atingir seu valor de referência.

4. CONCLUSÃO

Os avanços registrados nos setores de engenharia de controle e automação possibilitam o uso de diversas ferramentas na melhoria dos processos voltados para sistemas de irrigação. Atualmente, é vasta a aplicação de sensores que analisam o nível de água no solo e calculam a quantidade exata a ser

enviada ao solo. No entanto, a automação inteligente associada às redes hidráulicas responsáveis pela alimentação do sistema não vem recebendo a mesma atenção. O objetivo deste trabalho foi apresentar um controlador com base na lógica Fuzzy para o controle dinâmico de uma rede hidráulica voltada para alimentar um sistema de irrigação pressurizada.

Com a aplicação do controlador proposto, o sistema se mostrou capaz de controlar não apenas a pressão, variável comum de ser controlada em sistemas hidráulicos, como também controlou a vazão na entrada da parcela simulada. Com isso, a rede hidráulica requisitou do CMB, apenas a frequência necessária para permitir que a rede operasse com seus valores de referência. Mesmo após alteração dos valores de referência, com três cenários de operação, o sistema ainda se mostrou eficiente, controlando rapidamente as novas vazões e pressões demandadas pela rede.

Nos três cenários propostos, foi possível simular três diferentes sistemas de irrigação, utilizando a mesma rede hidráulica, com diferentes pontos de operação. Além disso, o uso da lógica Fuzzy facilitou o processo de elaboração do controlador, visto que utilizou a própria experiência do operador para adequar as regras, bem como suas variáveis linguísticas a operação da rede em diferentes regimes de operação.

No primeiro cenário, ao se comparar o sistema operando a uma frequência nominal de 60 Hz, houve uma redução de 55,3% na frequência de operação, o que reflete diretamente no consumo de energia elétrica do sistema. Para o segundo e terceiro cenário, suas reduções foram de 11,67% e 15%, respectivamente.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS/UFPB. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. Bem como a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Bezerra, S. T. M. Gomes, H.P. (2013) Automação em sistemas de irrigação. In: Heber Pimentel Gomes Org(s), Ed(s). Sistemas de irrigação: Eficiência energética. João Pessoa.
- Brasil (2019). Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil. Agência Nacional das Águas (ANA).
- Cherem, L. B (2016). Avaliação do uso de inversor de frequência em estação elevatória de água. Palmas, 2016. Dissertação de mestrado- Universidade Federal do Tocantins.
- Huang, H. S. and Lu, C. N (1994). Efficient Storage Scheme and Algorithms for W-matrix Vector Multiplication on Vector Computers. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No. 2; pp. 1083- 1094.
- Jägermeyr, J. G, D. Heinke, J. Schaphoff, S. Kumm, M. Lucht, W, (2015). Water savings potentials of irrigation systems: global simulation of processes and linkages. Global simulation of irrigation. V19, p3073–309.
- JunHui, W. Yaping, M. Jie, C. Yusheng, W. Fuzzy Control System of Substrate Lettuce Cultivation Based on Light-Dependent Irrigation Control Method. 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering.
- Kostenko, M. and Piotrovsky, 1970, L., Electrical Machines, part 2, Mir, Russia.
- Lin, S.L. and Van Ness J.E (1994). Parallel Solution of Sparse Algebraic Equations. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No. 2, pp. 743- 799.
- Marquadt, D.W., June 1963, "An Algorithm for Least-squares Estimation of Nonlinear Parameter" - J. Soc. Indust. Appl. Math., vol. 11, n° 2, pp. 431-441.
- Mesquita, R. P (2009). Análise de viabilidade técnica-econômica para a aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de baixa potência. Guaratinguetá, 2009. Dissertação de mestrado-Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá-Universidade Estadual Paulista.
- Minuzzi, R. B. Ribeiro, A. J. (2012). Requerimento de água para irrigação do milho em Santa Catarina durante eventos La Niña. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 16, n.12, p.1330–1337.
- Monticelli, A. (1983). Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. Edgar Blucher, Rio de Janeiro - RJ.
- Moraes, M.J. Oliveira Filho, D. Mantovani, E.C. Monteiro, P.M.B. Mendes, A.L.C. Damião, J.H.A.C. (2014). Automação em Sistema de Irrigação Tipo Pivô Central para Economia de Energia Elétrica. Eng. Agríc., Jaboticabal. V34, n6, p. 1075-1088.
- Morelato, A; Amaro,M. and Kokai,Y (1994). Combining Direct and Inverse Factors for Solving Sparse Network Equations in Parallel. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 1942- 1948.
- Nerys, J. W. L. et al. (2006) Conversor de Frequência Aplicado na Eficientização de Sistemas de Irrigação do Tipo Pivô Central. Eletrônica de Potência, vol. 11, n° 3.
- Queiroz, T. M., Carvalho, J. A. Rabelo, G. F. Andrade, M. J. B. (2005). Avaliação de Sistema Alternativo de Automação da Irrigação do Feijoeiro em Casa de Vegetação. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.25, n.3, p.632-641, set./dez.
- Sales, R.A. Louzada, J.M. Oliveira, E.C. Pinheiro, M.A.B. Sales, R.A. (2016). Estimativa das necessidades hídricas do milho cultivado nas condições edafoclimáticas de São Mateus – ES. NCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.13 n.23;p.
- Testezlaf, R, (2017) Irrigação: técnicas, usos e impactos. Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP. São Paulo.