



**RICARDO CHAVES NETO**

**HISTERESE EM VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO  
UTILIZADAS EM PIVÔ CENTRAL**

**LAVRAS – MG  
2023**

**RICARDO CHAVES NETO**

**HISTERESE EM VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO UTILIZADAS EM  
PIVÔ CENTRAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, área de concentração Recursos Hídricos em Sistemas agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto  
Orientador

Prof. Dr. Alberto Colombo  
Coorientador

**LAVRAS - MG  
2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Neto, Ricardo Chaves.

Histerese em válvulas reguladoras de pressão utilizadas em pivô central / Ricardo Chaves Neto. - 2023.

52 p. : il.

Orientador: Adriano Valentim Diotto.

Coorientador: Alberto Colombo

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Histerese em válvulas reguladoras de pressão. 2. Pivô central. 3. Agricultura irrigada. I. Chaves Neto, Ricardo. II. Diotto, Adriano Valentim. III. Título.

**RICARDO CHAVES NETO**

**HISTERESE EM VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO UTILIZADAS EM  
PIVÔ CENTRAL**

**HYSTERESIS IN PRESSURE REGULATORY VALVES USED IN CENTER PIVOT**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, área de concentração Recursos Hídricos em Sistemas agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA 28 de junho de 2023.

Dr. Alberto Colombo

UFLA

Dr. Victor Buono Silva Baptista

UFLA

Dr. Lessandro Coll Faria

UEM (Universidade Federal de Pelotas)

Dr. João Paulo Francisco

UEM (Universidade Estadual de Maringá)

Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2023**

A Deus por nos ter dado o Conhecer “o Verbo”

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo Ser.

Aos meus pais, José Pracildo Neto e Maria de Lourdes Chaves Neto e a todos os meus familiares, em especial, à minha tia Geromira Martins Abreu pelo apoio e incentivo.

Aos professores do Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras, Alberto Colombo, Jacinto de Assunção Carvalho, Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, Felipe Schwerz, Luiz Antonio Lima, Luiz Gonsaga de Carvalho, Michael Silveira Thebaldi, Carlos Rogerio de Mello, Gilberto Coelho, Livia Alves Alvarenga, Marcelo Ribeiro Viola, em especial, aos professores Fábio Ponciano de Deus e Adriano Valentim Diotto pelos ensinamentos.

Aos técnicos do Departamento do Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras, Elvis Márcio de Castro Lima e Renato Antônio da Silva, pelos trabalhos desenvolvidos.

Às secretárias do Departamento do Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras, Pâmela Salvador e Luíza Nayara de Andrade Costa e Aline Aparecida de Sousa Luiz, pela organização do departamento.

Aos amigos do Departamento dos Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras, Fidel Luis Rodrigues Tambo, Leonidas Alejandro Arias Baltazar, Mariana Lúcio Gontijo, Pâmela Aparecida Melo, Yasmin Fernandes, Virgílio Henrique Barros Nogueira, Maurício Pinheiro de Pinho Machado, André Ferreira Rodrigues, Rubens Junqueira e aos demais amigos que conheci, neste departamento e na cidade de Lavras, em especial, aos amigos Jonas Faria Dionísio de Oliveira, Jhones da Silva Amorim pelos trabalhos e ensinamentos compartilhados.

Aos amigos da República Veio Chico, Indalécio Cunha Vieira Júnior, Adriano Francis Dorigan, Francisco Neres de Lima, Fernando Adolfo Alay, Máximo Lages Vieira Passos, Manuel Alejandro Pajoy Trujillo, em especial, ao Jeferson Carlos de Oliveira Silva pela amizade.

À fonoaudióloga Cibele Cecconi de Sousa e Sousa pelos ensinamentos e pelo seu excelente trabalho.

Aos órgãos de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico – CNPq e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG – pelos recursos prestados.

À Universidade Federal de Lavras, ao Reitor vigente João Chrysóstomo de Resende Júnior, a todos os técnicos, docentes, discentes e servidores, por manterem a universalidade do conhecimento.

**Muito obrigado!**

**Crescei, multiplicai-vos**, enchei a terra e submetei-a, dominai os peixes do mar, as aves do céu e todos os animais que se movem sobre a terra.

## RESUMO

O sistema de irrigação tipo pivô central vem ganhando importância pela sua viabilidade técnica e econômica. Uma das características desse sistema é a abrangência de grandes áreas e o nível tecnológico que vem sendo implementado nesse sistema. A tecnologia de aplicação de água pelo uso de válvulas reguladoras de pressão, que estabiliza a lâmina aplicada, ao longo de toda a linha lateral, é uma tecnologia indispensável à irrigação por esse sistema. Porém, ainda, falta pesquisa, para esclarecer a variação de vazão nas válvulas reguladoras de pressão, em a seu montante, por variação de pressão. Assim, com este trabalho objetivou-se estudar a magnitude da variação de vazão dos conjuntos emissores mais válvulas reguladoras de pressão utilizadas em pivô central, pela variação de pressão à montante dos emissores mais as válvulas reguladoras de pressão, denominado fenômeno da histerese. Foram realizadas também simulações dos efeitos desse fenômeno, para a área de perfil declivoso em equipamento pivô central. A magnitude da variação da vazão, nos emissores mais as válvulas em razão da histerese, foi avaliada pela obtenção direta da vazão com a variação da pressão de trabalho do sistema. Os ensaios foram realizados no laboratório de Irrigação da UFPA, a experimentação foi composta de três válvulas reguladoras de pressão 10 PSI, emissores com três diferentes vazões e três repetições. Para realizar a simulação dos efeitos da histerese, na vazão em um pivô central, em área com perfil declivoso, foram coletadas, por um giro completo, as pressões a montante dos primeiros emissores mais as válvulas reguladoras de pressão dos lances, tendo assim oito pontos de coletas. Pôde-se analisar e descrever, para os conjuntos emissores mais válvulas reguladoras de pressão estudados, a magnitude da variação da vazão pelo fenômeno da histerese. Pôde-se identificar e descrever os intervalos de pressão, nas curvas características geradas, as condições que determinaram maior susceptibilidade à variação da vazão pela histerese. O Tratamento dos dados permitiu o agrupamento dos dados e as generalizações do fenômeno da histerese para quaisquer conjuntos de emissores mais válvulas reguladoras de pressão. Com as simulações da variação da vazão, de acordo com as condições de variação de pressão ao montante da válvula, em área com perfil declivoso, obtidas de um equipamento de pivô central, pôde-se identificar a influência espacial, em campo, do fenômeno da histerese. Há possibilidade de realizar manejo, considerando a espacialidade de ocorrência do fenômeno da histerese na área, minimizando, assim, seus impactos na uniformidade de aplicação.

**Palavras-chave:** Irrigação. Uniformidade de aplicação. Linha lateral. Variação de vazão.

## ABSTRACT

The center pivot irrigation system has been gaining importance due to its technical and economic viability. One of the characteristics of this system is the coverage of large areas and the technological level that has been implemented in this system. The technology of water application through the use of pressure regulating valves, which stabilizes the blade applied along the entire lateral line, is an indispensable technology for irrigation using this system. However, there is still a lack of research to clarify the flow variation in pressure regulating valves due to the pressure variation in their upstream. Thus, as this work aimed to study the magnitude of the variation in the flow of the emitter sets plus pressure regulating valves used in central pivot due to the variation of pressure upstream of the emitters plus the pressure regulating valves, which is called the phenomenon of hysteresis. Simulations of the effects of this phenomenon were also carried out for the area with a sloping profile in a central pivot equipment. The magnitude of the flow variation in the emitters plus the valves due to hysteresis was evaluated by directly obtaining the flow with the variation in the working pressure of the system. The tests were carried out at the UFLA Irrigation laboratory, the experiment was composed of 3 pressure regulating valves 10 PSI, emitters with three different flows and three repetitions. In the simulation of the effects of hysteresis on the flow in a central pivot in an area with a sloping profile, the pressures upstream of the first emitters plus the pressure regulating valves of the spans were collected, thus having 8 collection points. It was possible to analyze and describe for the emitter sets plus pressure regulator valves studied the magnitude of the flow variation due to the hysteresis phenomenon. Data treatment allowed data grouping and generalizations of the hysteresis phenomenon for any sets of emitters plus pressure regulating valves. With the simulations of the flow variation according to the conditions of pressure variation in the valve upstream in an area with a sloping profile obtained from a central pivot equipment, it was possible to identify the spatial influence, in the field, of the hysteresis phenomenon. Thus, it is possible to carry out management considering the spatiality of the occurrence of the hysteresis phenomenon in the area, thus minimizing its impacts on the uniformity of application.

**Keywords:** Irrigation. Uniformity of application. Lateral line. Flow variation.

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 Objetivo .....	12
1.2 Hipótese .....	12
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>13</b>
2.1 Definição do sistema de aspersão, pivô central e panorama .....	13
2.2 Válvulas reguladoras de pressão e emissores.....	14
2.3 Histerese em válvulas reguladoras de pressão.....	15
2.4 Uniformidade de Aplicação .....	16
2.5 Eficiência do uso da água na agricultura .....	16
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>18</b>
<b>SEGUNDA PARTE - ARTIGOS</b> .....	<b>20</b>
<b>ARTIGO 1 - HISTERESE EM VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO</b> .....	<b>20</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>23</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>26</b>
3.1 Caracterização da histerese .....	26
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>33</b>
<b>ARTIGO 2 - VARIAÇÃO DA VAZÃO EM EMISSORES DE PIVÔ CENTRAL EM ÁREA ACIDENTADA PELO FENÔMENO DA HISTERESE</b> .....	<b>34</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>36</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>41</b>
3.1 Modelo da variação de vazão do conjunto em função da pressão de entrada .....	41
3.2 Perfil de distribuição de pressão na linha lateral e ao longo de sua revolução.....	42
3.3 Perfil de distribuição de vazão na linha lateral e ao longo do giro da linha lateral no sentido horário.....	44
3.4 Influência da reversão do sentido do giro da linha lateral do pivô central na variação da vazão .....	46
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>49</b>
<b>ANEXO A – PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO AO LONGO DO GIRO DO PIVÔ CENTRAL COM A LINHA LATERAL E SENTIDO HORÁRIO E ANTI-HORÁRIO</b> .....	<b>50</b>
<b>ANEXO B – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE VAZÃO (A) E DO TRADUTOR DE PRESSÃO (B)</b> .....	<b>51</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

O sistema de irrigação por aspersão tipo pivô central apresenta uma das maiores expansões de área irrigada entre os sistemas de irrigação (GUIMARAES; LANDAU, 2019). “Essa expansão se dá pela sua facilidade de manejo, necessidade de pouca mão de obra, capacidade de aplicar pequenas lâminas e a capacidade de ser completamente automatizado” (FRIZZONE *et al.*, 2018, p. 63). A utilização de equipamento de pivô central, para área com topografia acidentada, com a utilização intermitente do canhão final e com sistema de canto, requer dispositivos específicos, como as válvulas reguladoras de pressão, cujo objetivo é a estabilização da pressão de saída das válvulas reguladoras, mantendo, assim, vazão constante de um determinado emissor, possibilitando maior potencial de uniformidade da lâmina aplicada ao longo da linha lateral (MARTIN; KINCAID; LYLE, 2007).

Um dos focos de pesquisas em pivô central são as tecnologias de aplicações, os conjuntos emissores mais válvulas reguladoras de pressões. Têm como principal objetivo a estabilização da pressão de saída, ao longo da linha lateral do pivô central, mantendo, assim, a pressão de entrada de cada emissor em um determinado valor, também, têm como objetivo a minimização dos problemas de escoamento superficial; das perdas de água por deriva e arraste pelo vento; do selamento e erosão do solo pela maior homogeneização das gotas aplicadas; da redução da área deficientemente irrigada e a maximização da uniformidade de aplicação por estabilização da pressão de saída das válvulas e das tecnologias contidas nas placas defletoras (KELLER; BLIESNER, 1990).

A expansão do tamanho da linha do pivô, pela estabilidade da lâmina, conferida pelo uso das válvulas reguladoras, acarretou maior variação de pressão de entrada nas válvulas reguladoras, levando, assim, ao aumento do intervalo de pressão a ser regulada pelas válvulas reguladoras de pressão. Os autores Talamini Júnior *et al.* (2018) e Von Bemuth e Baird (1990) abordam um problema relacionado à essa variação de pressão a montante das válvulas reguladoras, pois não deveria haver variação de pressão a jusante das válvulas reguladoras de pressão com a variação de pressão a seu montante. Porém foi detectado por Talamini Júnior *et al.* (2018) que a variação de pressão na entrada influencia a pressão de saída, que, por sua vez, influencia a variação de vazão, denominada histerese.

Assim, o efeito da histerese na lâmina aplicada pode ser levado em consideração ao manejo de irrigação, principalmente em equipamento em área com maior desnível topográfico,

em que vai haver maior variação de pressão a montante das válvulas reguladoras de pressão. Podem, assim, influenciar na uniformidade de aplicação de água pela variação de vazão aplicada dentro do intervalo de regulagem tendo impactos na eficiência do uso da água.

### **1.1 Objetivo**

Artigo 1 - Determinar, analisar e descrever a variação de vazão, para o conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão, pela variação e pressão a montante da válvula.

Artigo 2 - Determinar os efeitos da variação da vazão dividido da variação e pressão à montante do conjunto emissor mais válvulas reguladoras de pressão, ao longo da linha lateral de um equipamento de pivô central e de seu giro em área com topográfica acentuada.

### **1.2 Hipótese**

Artigo 1 - A variação de pressão na entrada dos conjuntos emissores mais válvulas reguladoras de pressão resulta em variação de vazão do emissor por motivos da histerese na válvula reguladora.

Artigo 2 - Em campo com topografia acentuada, a variação de pressão na linha lateral, a montante do conjunto emissor mais válvula reguladora de um pivô central, pelo componente topográfico, vai ocasionar variação da vazão do emissor em função da sua posição na área.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Definição do sistema de aspersão, pivô central e panorama

De acordo com Waller e Yitayew (2016), o sistema de pivô central é constituído de uma única linha lateral, fabricada com aço ou alumínio de alta resistência, porém leve, apoiada sobre torres e sustentada por treliças e cabos de aço. As estruturas entre as torres são denominadas lances ou vãos, em que estão instalados os emissores. As torres móveis são apoiadas sobre rodas e são conectadas ao centro da área (com sistema de propulsão por motores elétricos), em uma torre fixa; por meio de um sistema de articulação, a linha lateral gira em torno dessa torre fixa, o ponto pivotante central.

O sistema de irrigação tipo pivô central é caracterizado por requerer alta vazão, abranger áreas de grandes extensões, apresentar fácil manejo e utilizar pouca mão de obra para a sua operação, trabalhar com pequenas lâminas e com alta frequência, podendo ser completamente automatizado, visto que, nas situações de elevada declividade topográfica e em situações de utilização intermitente de canhão final e sistema de canto, são recomendadas válvulas reguladoras de pressão, em todas as saídas para a estabilização da pressão de saída dos emissores ao longo dos lances (FRIZZONE *et al.*, 2018; KELLER; BLIESNER, 1990).

Com os avanços técnicos científicos e com as melhorias dos componentes hidráulicos, elétricos, mecânicos e principalmente, nos dispositivos de aplicação de água (emissores), o pivô central tem se tornado cada vez mais eficiente na aplicação de água, ganhando maior visibilidade. Exemplos das primeiras inovações no pivô central foram a substituição dos órgãos propulsores, pistões hidráulicos substituídos por motores elétricos e o acionamento da movimentação das torres passou a ser por sistema de desalinhamento, com diversos controles eletrônicos (FRIZZONE *et al.*, 2018). Outra modificação no pivô central foi a substituição dos emissores de impactos, para os emissores *sprays*, com o objetivo da redução da pressão de operação, porém essa alteração ocasionou redução da largura molhada e aumento da intensidade de aplicação, o que pode colocar em dúvida se essa substituição promoveu ganhos de uniformidade de aplicação (KELLEY; BLIESNER, 1990).

Os primeiros pivôs centrais utilizavam emissores de impactos acima da tubulação com ângulo de 23 e, posteriormente, de 6° ao 15°, com raio de molhamento de 6 metros e, por fim, os *sprays* que são predominantemente utilizados nesse sistema. Os emissores tipo *sprays* decorreram do desenvolvimento dos sistemas MESA (*Medium Elevation Spray Application*), LESA (*Low Elevation Spray Application*) e LEPA (*Low Energy Precision Application*). Os

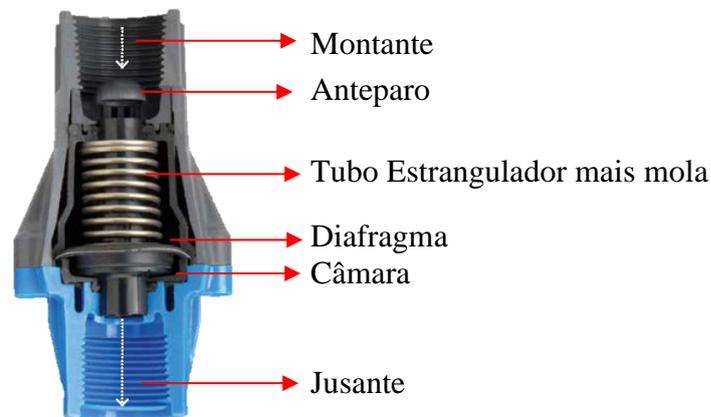
*sprays* ficam sob a tubulação, fixados em tubos de descida, também havendo equipamentos com *sprays* utilizados sobre a tubulação; os diferentes emissores têm como objetivo reduzir as perdas de água por evaporação e arraste pelo vento, aumentar a uniformidade de aplicação e reduzir a pressão de operação. As diferentes placas defletoras e designs dos *sprays* garantem adequações às diferentes condições agronômicas e climáticas. O pivô central também possibilita práticas como fertirrigação, quimigação, entre outras práticas que aumentam a sua viabilidade econômica (CARVALHO; SILVA, 2007; FRIZZONE *et al.*, 2018; SENNINGER IRRIGATION, 2021).

De acordo com Ayrimoraes (2017), no Brasil, em 2017, o sistema de pivô central foi o segundo sistema de irrigação mais utilizado, com 23.181 equipamentos instalados, com área de ocupação de 1.476.000 hectares, concentrada nos estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, São Paulo, Mato Grosso e Rio Grande do Sul com 31; 18,0; 15,0; 13,0; 6,0 e 6,0%, respectivamente. O maior crescimento do sistema de pivô ocorreu, no período de 2000 a 2017, com crescimento médio nacional de 201% para esse período e, ainda há a previsão, para 2030, que esse sistema passe de 19,9% para 28,6% da área irrigada.

## **2.2 Válvulas reguladoras de pressão e emissores**

As válvulas reguladoras de pressão são dispositivos utilizados, em redes hidráulicas pressurizadas, para manter a pressão de saída de um líquido, dentro dos limites projetados. As válvulas reguladoras de pressão contêm, em seu interior, um sistema de estrangulamento; um diafragma, na parte inferior, acoplado a um tubo estrangulador, que se encontra em repouso comprimido por uma mola; e, na parte superior da válvula, há um anteparo, assim toda a pressão, acima da pressão de serviço do emissor, é utilizada para a elevação do diafragma/tubo estrangulador, por meio de uma câmara que se preenche de água, que interrompe parcialmente a secção de passagem do líquido, mantendo a pressão de saída constante e dissipando a pressão acima da recomendação para o funcionamento das válvulas, Figura 1. Assim, o comportamento do conjunto válvula reguladora mais emissor estabelece um platô, logo após atingir a pressão de funcionamento da válvula, não permitindo uma grande variação de vazão do emissor (SENNINGER IRRIGATION, 2021).

Figura 1 – Perfil Interno da Válvula Reguladora de Pressão 68,9<sub>(10PSI)</sub> kPa.



Fonte: Imagem Nelson Irrigação Corporation (2023).

De acordo com New e Fipps (2000), para o funcionamento das válvulas reguladoras de pressão, há a necessidade de pressão extra para o seu funcionamento referente às perdas internas da válvula, de 20,68<sub>(4,16PSI)</sub> kPa e, de acordo com Komet Innovative Irrigation (2020), Nelson Irrigation Corporation (2023) e Senninger Irrigation (2021), esse valor é de 34,5<sub>(5PSI)</sub> kPa. Há, no mercado, válvulas que possibilitam a regulação da pressão de 41<sub>(6PSI)</sub>; 69<sub>(10PSI)</sub>; 103<sub>(15PSI)</sub>; 138<sub>(20PSI)</sub>; 172<sub>(25PSI)</sub>; 207<sub>(30PSI)</sub>; 276<sub>(40PSI)</sub> e de 345<sub>(50PSI)</sub> kPa. New e Fipps (2000) abordam que a variação topográfica é um dos principais fatores, para a recomendação do uso de válvulas reguladoras de pressão, além dos limites de variação de pressão da linha lateral.

### 2.3 Histerese em válvulas reguladoras de pressão

As válvulas reguladoras de pressão ideais devem manter a pressão de saída constante independente da pressão de entrada, mas, em função das perdas internas, fricção interna dos componentes das válvulas reguladoras com comportamento não linear, ocorre a variação de pressão e de vazão na saída da válvula, dependendo da variação de pressão de entrada, levando assim à redução da uniformidade de aplicação (ALMEIDA; COSTA, 2000; VON BEMUTH; BAIRD, 1990). Essa variação de vazão, decorrente da variação de pressão na entrada da válvula, caracteriza-se pelas diferentes curvas características vazão x pressão, em um ciclo de operação (pressurização e despressurização do sistema) (ALMEIDA; COSTA, 2000), o que acarreta imprecisões nos projetos e pode resultar, em níveis de desuniformidade de aplicação de água e aumentar a área deficientemente irrigada com elevação dos gastos energéticos reduzindo a viabilidade econômica deste sistema.

Com o aprimoramento dos pivôs centrais, que passaram a ter uma abrangência maior de área irrigada (um único equipamento pode irrigar uma área de até 300 hectares) isso faz o uso das válvulas reguladoras obrigatório. A variação espacial da pressão na linha lateral, em razão da topografia, é extremamente dinâmica, causando variação da pressão e o deslocamento do ponto de pressão máximo e mínima na linha, principalmente em áreas declivosas, que torna o fenômeno da histerese relevante, pela variação da pressão de entrada das válvulas, levando, assim, à ocorrência da desuniformidade ao longo da linha lateral e de seu giro (TALAMINI JÚNIOR *et al.*, 2018).

## 2.4 Uniformidade de Aplicação

O termo uniformidade de aplicação ou coeficiente de uniformidade (CUC) de água refere-se aos indicadores associados à variabilidade espacial da lâmina de irrigação aplicada em relação a um valor médio; esse índice determina o espaçamento entre emissores, a vazão total do projeto e o tempo de operação. De acordo com Evans (2001), o coeficiente de uniformidade utilizado em pivô central é classificado, para um sistema de área ponderada, a fração de área de coletor representa áreas progressivamente maiores, a partir do centro do pivô central (característica intrínseca desse sistema, como forma que mantém a lâmina constante, ao longo dos vãos), sendo assim, o modelo mais indicado, para determinar a uniformidade de aplicação, é o modelo ponderação da área, em pivô central, proposto por Heinemann *et al.* (1998) (American Society of Agricultural Engineers – ASAE).

Evans (2001) pontua que o coeficiente de uniformidade mínimo desejado, para pivô central, é de 0,85, mas, dependendo das condições climáticas, os valores de CU podem ser inferiores, como encontrados por Delirhasannia *et al.* (2010), de 73,9 a 88,3 %, por Takács *et al.* (2019) de 88,8 a 92,8%. O CUC é um bom índice, para ser comparado entre sistema, mas não fornece uma descrição real da distribuição de água, devendo ser analisado conjuntamente com o coeficiente de distribuição (CUD).

## 2.5 Eficiência do uso da água na agricultura

A eficiência do uso da água na agricultura é a razão entre a quantidade de água efetivamente utilizada para a produção de biomassa direta ou indiretamente e a quantidade de água retirada da fonte hídrica sendo expressa em  $m^3kg^{-1}$  (LIMA *et al.*, 2003). Entre a captação

de água na fonte até a sua finalidade final, ou seja, ser absorvida pelas plantas e contribuir para a produção efetiva de biomassa há diversos fatores que reduzem a eficiência do uso da água. Desses fatores são destaque as condições topográficas do terreno, o tipo de solo e sua profundidade. As condições climáticas (a evaporação e arraste pelo vento (PEA) podem alcançar aproximadamente 10% (COLOMBO *et al.*, 2015)); os fatores humanos, como a tecnificação da mão de obra, os aspectos econômicos (FRIZZONE *et al.*, 2018) e a eficiência do sistema de irrigação, Hart e Reynolds, em 1995, descreveram a eficiência de aplicação relacionada à uniformidade de aplicação de água e a área adequadamente irrigada.

Salazar-Moreno, Rojano-Aguilar e López-Cruz (2014) apontam que a produção em campo aberto tem menor eficiência do uso da água, sendo essa redução relacionada às influências das condições climáticas e ao controle dos processos produtivos, o manejo agrônomico. O coeficiente de uniformidade e de distribuição de aplicação (CUC e CUD) de água são indicativos da eficiência do uso da água. A eficiência de condução e aplicação de água pela rede hidráulica e pelas tecnologias, respectivamente, também são parâmetros a serem levados em consideração para compor o índice de eficiência do uso da água. A rede hidráulica tem seu maior desempenho quando adequadamente projetada com o mínimo gasto energético. Já as tecnologias de aplicação de água, como o conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão utilizado em pivô central, vão determinar o perfil de distribuição de água que compõe a uniformidade de aplicação de água, tendo implicação direta na eficiência do uso da água (LIMA *et al.*, 2003, 2009).

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. P. de; COSTA, U. M. S. Exemplo de histerese com um sistema de massa-mola. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 49-53, mar. 2000.
- AYRIMORAES, S. **Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília, DF: ANA, 2017.
- CARVALHO, D. A.; SILVA, L. D. B. A evolução dos pivôs. **Revista a Granja**, Porto Alegre, n. 705, p. 45-46, 2007.
- COLOMBO, A. *et al.* Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste de sprays de placa oscilante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 8, p. 719-726, ago. 2015.
- DELIRHASANNIA, R. *et al.* Dynamic model for water application using centre pivot irrigation. **Biosystems Engineering**, London, v. 105, n. 4, p. 476-485, Apr. 2010.
- EVANS, R. G. Center pivot irrigation. Agricultural systems research Unit, North Plain Agricultural Research laboratory. **USDN-Agricultural Research Service**, [Washington], v. 1500, 2001.
- FRIZZONE, J. A. *et al.* **Irrigação por aspersão: sistema pivô central**. Maringá: Eduem, 2018.
- GUIMARAES, D. P.; LANDAU, E. C. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Milho e Sorgo, 2019.
- HART, W. E.; REYNOLDS, W. N. Analytical design of sprinkler systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 8, p. 83-89, 1965.
- HEINEMANN, A. B. *et al.* Influência da altura do emissor na uniformidade de distribuição da água de um sistema pivô central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 9, p. 1487-1491, set. 1998.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: The Blackburn Press, 1990.
- KOMET INNOVATIVE IRRIGATION. Komet Precision Twister (KPT) modelos. **Komet**, Lienz, 2020. Disponível em: <https://www.kometirrigation.com/wp-content/uploads/2020/07/Catalog-Komet-Pivot-5-Features-Portuguese-Rif.-181.pdf>. Acesso em: 23 out. 2021.
- LIMA, A. C. de *et al.* Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistemas pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 499-505, jul./ago. 2009.
- LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. **O uso da irrigação no Brasil: o estado das águas no Brasil**. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica, 1999.

LIMA, S. C. R. V. *et al.* Curvas de desempenho de válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 201-209, ago. 2003.

MARTIN, D. L.; KINCAID, D. C.; LYLE, W. M. Design and operation of sprinkler systems. *In*: JENSEN, M. E. **Design and operation of farm irrigation systems**. 2<sup>nd</sup> ed. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007. chap. 16, p. 557-631.

NELSON IRRIGATION CORPORATION. **Irrigation technology for the future**. Washington, DC: Nelson, 2023. Disponível em: [https://nelsonirrigation.com/library/2021\\_Nelson\\_Catalog.pdf](https://nelsonirrigation.com/library/2021_Nelson_Catalog.pdf). Acesso em: 23 jan. 2023.

NEW, L.; FIPPS, G. **Center pivot irrigation**. Texas: Texas Agricultural Extension Service, 2000.

SALAZAR-MORENO, R.; ROJANO-AGUILAR, A.; LÓPEZ-CRUZ, I. L. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. **Tecnología y Ciencias del Agua**, México, v. 5, n. 2, p. 177-183, Mar./Apr. 2014.

SENNINGER IRRIGATION. Catalogs & Product Overviews: a full line of irrigation products working for you. **Senninger**, Clermont, 2021. Disponível em: <https://www.senninger.com/catalogs>. Acesso em: 1 jul. 2023.

TAKÁCS, S. *et al.* Variable rate precision irrigation technology for deficit irrigation of processing tomato. **Irrigation and Drainage**, New York, v. 68, n. 2, p. 234-244, Apr. 2019.

TALAMINI JÚNIOR, M. V. *et al.* Operational characterization of pressure regulating valves. **The Scientific World Journal**, Boynton Beach, FL, p. 1213638, June 2018.

VON BEMUTH, R. D.; BAIRD, D. Characterizing pressure regulator performance. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 1, p. 145-150, 1990.

WALLER, P.; YITAYEW, M. Center pivot irrigation systems. *In*: WALLER, P.; YITAYEW, M. **Irrigation and drainage engineering**. New York: Springer, 2016. p. 209-228.

**SEGUNDA PARTE - ARTIGOS**

**ARTIGO 1 - HISTERESE EM VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

## RESUMO

Para um conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão ideal não deve haver variação de vazão após atingir a pressão de funcionamento do mecanismo de regulagem da válvula reguladora de pressão. Em pivô central, em área com perfil declivoso com elevado comprimento da linha lateral, o perfil de pressão, ao longo na linha lateral, tem valor com elevada magnitude, o que pode alterar o fluxo de aplicação de água pelo conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão. A ocorrência de variação de vazão, no conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão, por variação de pressão a montante, é denominada fenômeno da histerese. Assim, este estudo foi realizado no laboratório de Irrigação do Departamento de Recursos Hídricos da UFLA, a fim de caracterizar, analisar e descrever o fenômeno histerese. O trabalho foi realizado, avaliando o conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão, utilizado no intervalo de pressão entre 40 e 600 kPa, também havendo a caracterização para os intervalos de pressão 40 e 600; 40 a 400; 40 a 250 e 40 a 120 kPa, consideração das condições de pressurização e na despressurização do sistema. A coleta dos dados de vazão e de pressão ocorreu de forma simultânea com o sistema próprio de coleta e com a utilização do inversor de frequência para a aceleração de 10 em 10 Hertz do motor da motobomba, estabilizado à pressão por três minutos, para a obtenção dos intervalos de pressões desejados. O delineamento experimental utilizado foi o fatorial 3 x 3 com três repetições, sendo três válvulas reguladoras de pressão de 68,9 kPa (10 PSI) novas e três emissores com três diferentes vazões. Conclui-se que, em todas as repetições e intervalos estudados dos conjuntos emissores mais válvulas reguladoras de pressão, apresentaram variação de vazão significativa pela variação e pressão a montante do conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão. Obteve-se, assim, um coeficiente de variação máximo, magnitude da histerese, de 7% entre as vazões nas condições de pressurização e despressurização do sistema. Houve maior impacto quando o conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão esteve em situação de despressurização.

**Palavras chave:** Agricultura Irrigada. Eficiência do Uso da Água. Manejo da Irrigação. Pivô central.

## 1 INTRODUÇÃO

As válvulas reguladoras de pressão são dispositivos utilizados em redes hidráulicas pressurizadas para manter a pressão de saída de um líquido dentro dos limites projetados. Assim, as válvulas reguladoras dissipam toda a pressão excedente, por meio de um mecanismo de estrangulamento (VON BEMUTH; BAIRD, 1990).

As válvulas reguladoras podem apresentar diferentes respostas, valores de pressão de saída, quando opera em processo de pressurização ou de despressurização, o que caracteriza o fenômeno denominado histerese. A turbulência, a taxa de fluxo e a fricção entre as partes dos componentes das válvulas são responsáveis por esse comportamento não ideal (KELLER; BLIESNER, 1990; TALAMINI JÚNIOR *et al.*, 2018; VON BEMUTH; BAIRD, 1990).

Em sistemas de irrigação por pivô central, o uso de válvulas reguladoras de pressão é indispensável, quando a variação de pressão na linha é maior que 20% da pressão do início da linha lateral, mas sua recomendação pode-se dar, em todas as situações, pelos benefícios alcançados quanto à uniformidade de aplicação dos emissores. Outro benefício é manter a pressão constante e promover maior facilidade, no dimensionamento dos diâmetros dos bocais, ao longo da linha lateral e ajudar na padronização dos pivôs centrais (KELLER; BLIESNER, 1990; MARLOW; ALLEN; MERKLEY, 2016).

Com o uso das válvulas reguladoras de pressão, a variação da pressão de entrada nos emissores pode ser minimizada drasticamente, porém, ainda assim, pode ocorrer variação de pressão de saída, podendo alcançar variações de 5 a 24% dependendo da variação da pressão na entrada (TALAMINI JÚNIOR *et al.*, 2018). Essa variação pode ainda ser intensificada pelo tempo de uso das válvulas, podendo até dobrar após três anos de uso (MARLOW; ALLEN; MERKLEY, 2016).

Baptista *et al.* (2020) e Scaloppi e Allen (1993) apresentam o dimensionamento e análise da distribuição de pressão para os diferentes cenários topográficos de uma área irrigada por pivô central, predizendo a variação temporal e espacial da pressão, ao longo da linha lateral de um pivô central, à medida que o pivô se desloca durante o seu giro. Quanto maior a declividade dentro da área a ser irrigada, maior é essa variação de pressão. Assim, dependendo da configuração da área, à medida que o pivô central se movimenta, pode ocorrer picos de pressão com diferentes intensidades, em diferentes pontos da lateral, levando à variação da vazão com o fenômeno da histerese.

Assim, com este trabalho, objetivou-se caracterizar o fenômeno da histerese, em válvula reguladora de pressão utilizada em sistemas de irrigação do tipo pivô central.

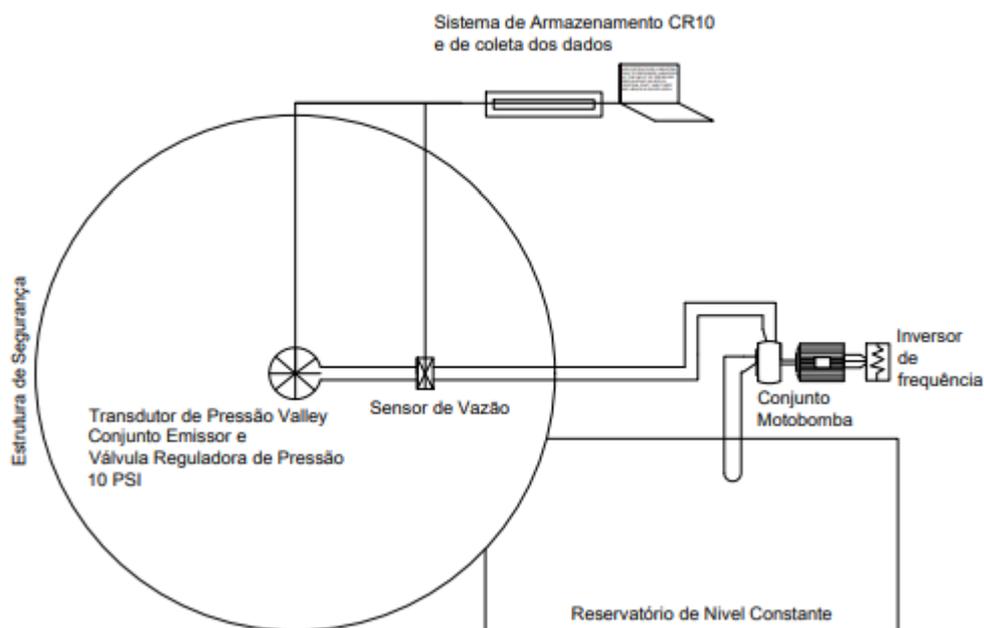
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Irrigação do Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, Minas Gerais/Brasil.

Foram utilizados emissores, modelos Rotator®, da série 3030, da marca Nelson Irrigation Corporation, com os bocais (diâmetro dos bocais) 32<sub>(0,250")</sub>, 33<sub>(0,258")</sub> e 34<sub>(0,266")</sub> de vazão nominal de 1,29; 1,36 e 1,44 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> para a pressão de 68,9 kPa (10 PSI). Esses emissores estavam acoplados às válvulas reguladoras de pressão novas, também do mesmo fabricante, modelo Uni-Flow®, com pressão de regulagem de 68,9 kPa (10 PSI), à qual se recomenda, para seu ótimo funcionamento, pressão de entrada acima de 103,4 kPa (15 PSI).

Para a caracterização geral do fenômeno da histerese, os pares dos dados vazão x pressão foram obtidos, utilizando-se um sensor de vazão GF+ SIGNET® 2536/3-8512-X e um transdutor de pressão P15RVA1/10B, 0 a 200 PSI. Os dados foram coletados por um *Datalogger* Campbell® modelo CR10X, com leitura a cada 10 segundos e armazenamento da média a cada um minuto. E, com a utilização de um inversor de frequência marca Omron Modelo 3G3RX A2150®, obtiveram-se os diferentes valores de pressão, variando a rotação de um motor de 7.5 kW acoplado a uma bomba centrífuga de acordo com a Figura 1.

Figura 1 - Esquematização das estruturas utilizadas para a realização dos ensaios.



Fonte: Do autor (2022).

O transdutor de pressão foi instalado a montante da válvula reguladora de pressão para registrar a pressão de entrada. O sensor de vazão foi instalado, em um trecho retilíneo da tubulação, para a estabilização do fluxo, de acordo com a indicação do fabricante, representado na Figura 1. E, por meio de ensaio, foi realizada a calibração do sensor de vazão e do transdutor de pressão, Anexo 2 - A e B, respectivamente.

A obtenção dos pares dos dados vazão x pressão foi por meio do sensor de vazão e do tradutor de pressão de forma simultânea. Os dados foram armazenados no *Datalogger*, com leitura a cada 10 segundos e armazenamento a cada um minuto, média dos dados. E, com a utilização de um inversor de frequência, obtiveram-se os diferentes valores de pressão, os intervalos estabelecidos.

O delineamento experimental utilizado foi o fatorial 3 x 3 com três repetições, sendo três válvulas e três bocais (com três diferentes vazões). As repetições tiveram como objetivo a verificação da influência dos bocais e das válvulas reguladoras utilizadas na obtenção da vazão. Os intervalos de pressão estabelecidos para o estudo foi 40 a 600 kPa que compreende a faixa recomendada pela fabricante também dentro com referência aos trabalhos de Talamini Júnior *et al.* (2018) e Von Benuth e Baird (1990). Coletando-se os dados, durante a pressurização e a depressurização do sistema de forma ininterrupta, a mudança de frequência, no inversor de frequência, foi realizada 10 em 10 Hertz, deixando estabilizar por três minutos, de forma que se obteve aproximadamente 180 dados de vazão/pressão.

Para estudar e descrever os efeitos da histerese nas válvulas reguladoras de 68,9 kPa, simulando diferentes cenários, foram realizados outros ensaios de pressurização de depressurização, porém, de maneira ininterrupta, utilizando as mesmas estruturas e bocais, variando a pressão na entrada da válvula reguladora da seguinte maneira: depressurização de 250 a 40, de 400 a 40 e 600 a 40 kPa e um ciclo pressurização 600 retornando a 120 e pressurização da 600 novamente.

Apesar de estabelecer o intervalo de 40 a 600 kPa, os dados de vazões utilizados, para as análises realizadas, estão compreendidos no intervalo de 103,4 a 600 kPa, pois o monitoramento da pressão foi realizado a montante da válvula reguladora. E, de acordo com o fabricante, para se obter a pressão de saída recomendada 68,9 kPa (10 PSI), a pressão de entrada deve ser 34,5 kPa acima dessa recomendação, de 103,4 kPa. Assim, após a obtenção dos dados de vazão, para os intervalos de pressão estabelecidos, verificou-se a dispersão dos dados de vazão, por meio da análise de variância e do teste de Tukey em nível de probabilidade 5%.

Para a possibilitar a comparação dos dados entre bocais, foi realizada a adimensionalização da vazão obtida pela vazão nominal de catálogo, de acordo com a Equação 1.

$$Q_{adim} = \frac{Q_{obtida}}{Q_{Nom}} \quad (1)$$

Sendo:  $Q_{adim}$  - Vazão adimensionalizada;  $Q_{obtida}$  - Vazão obtida,  $Q_{Nom}$  - Vazão nominal (vazão declarada pelo fabricante para a pressão de 68,9 kPa (10 PSD).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização da histerese

A análise de variância dos dados coletados tanto na pressurização quanto na despressurização do sistema demonstrou que não houve variação dos valores das vazões, em função da fonte de variação das válvulas reguladoras, ou seja, as válvulas reguladoras não foram determinantes na heterogeneidade dos valores de vazão obtidos. Já a fonte de variações bocais apresentou diferenças significativas em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, nos valores da vazão, ou seja, a substituição dos bocais promove variação detectável de vazão entre os emissores, o que possibilita a descrição da histerese aos diferentes diâmetros de bocais, Tabela 1.

Na Tabela 1, estão descritas as vazões médias obtidas e os coeficientes de variações da vazão ( $R^2$ ), para os Bocais 32, 33 e 34 na pressurização e na despressurização do sistema. Consideraram-se o intervalo de funcionamento entre a pressão recomendada mínima que é 103,4 kPa e a pressão máxima de ensaio que foi de 600 kPa.

Tabela 1 - Vazão média para o intervalo recomendado de ótimo funcionamento das válvulas para os bocais 32, 33 e 34

Itens.	Vazões na Pressurização	CV (%)	Vazões na Despressurização	CV (%)
Bocal 32	1,411 c	1,778	1,285 c	6,077
Bocal 33	1,497 b	1,905	1,346 b	6,551
Bocal 34	1,613 a	1,786	1,434 a	7,068
Modelo <sup>AD</sup>	1,105	1,990	0,994	6,550
Geral <sup>AD</sup>	1,049	7,045		

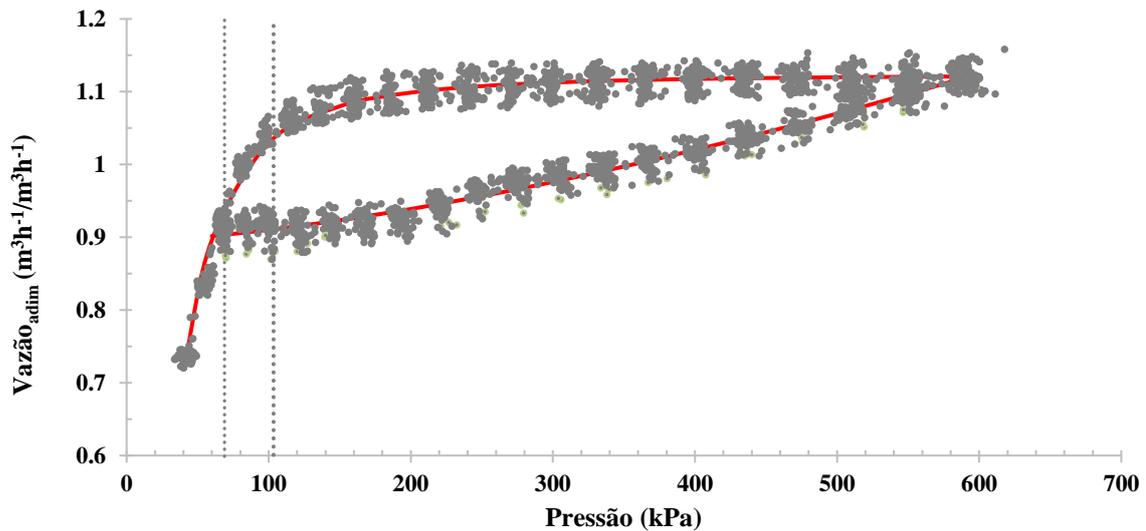
Fonte: Do autor (2022).

Valores seguidos da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, com probabilidade em nível de significância de 5%, teste de Tukey. Modelo<sup>AD</sup> - valores do agrupamento de todos as curvas da pressurização e da despressurização (valores adimensionalizados, Figura 2), Geral<sup>AD</sup> - agrupamento de todos as curvas como sendo únicas, dados adimensionalizados, Vazão em  $m^3h^{-1}/m^3h^{-1}$ .

Na Figura 2, observa-se a representação da variação das vazões adimensionalizadas para o intervalo de variação de pressão de 40 a 600 kPa, para os três emissores, três válvulas reguladoras de pressão e suas repetições. É possível observar que os dados se concentraram, em dois grupos distintos, resultando em um conjunto de dados localizados na parte superior, que representa os dados obtidos na pressurização do sistema; e um conjunto na parte inferior,

que representa os dados de vazão na despressurização do sistema. A variação de vazão com a histerese ocorreu dentro dos limites estabelecidos pelas curvas geradas 40 a 600 e de 600 a 40 kPa o que indica o potencial máximo da variação da vazão para as condições estudadas.

Figura 2 – Variação de vazão média adimensionalizada dos conjuntos emissores (32, 33 e 34) mais válvula reguladora, para uma variação de pressão de 40 a 600 kPa



Linha sólida – Representação dos modelos empíricos. Pontos – valores de vazão adimensionalizados para os conjuntos emissores (32,33 e 34) mais válvulas reguladoras de pressão; linhas pontilhadas verticais e ponto de pressão recomendada e pressão de entrada para o funcionamento da válvula 68,9 e 103,4 kPa.

Fonte: Do autor (2022).

A diferença entre as vazões para uma determinada pressão considerando as curvas geradas para as condições de pressurização e despressurização corresponde à ocorrência do fenômeno da histerese, cujo resultado também foi encontrado por Marlow, Allen e Merkley (2016). Em termos práticos, essa variação da pressão, na entrada da válvula reguladora pressão, pode ocorrer em pivô central, principalmente, com a variação topográfica, quando o equipamento se movimenta, em área com declividade, ou quando ocorre uso intermitente do canhão final ou sistema de canto. A variação de vazão decorrente da histerese pode ser minimizada com o uso de sistema de bombeamento com velocidade variável (BAPTISTA *et al.*, 2019). Atualmente, apesar de algumas empresas fazerem referência ao fenômeno da histerese, nas válvulas reguladoras pressão em seus catálogos, não abordam as características da histerese e seus impactos na variação da vazão, para o manejo da irrigação, o que torna o dimensionamento da lâmina a ser aplicada impreciso.

Talamini Júnior *et al.* (2018) e Von Bemuth e Baird (1990) encontraram resultados semelhantes aos observados neste trabalho, estudando a variação de pressão a montante pela

variação de pressão a jusante do conjunto emissor mais válvula reguladora pressão, estabelecendo uma curva superior que representa os dados da variação da pressão na pressurização e uma curva inferior que representa os dados da variação de pressão na despressurização do sistema. Von Bemuth e Baird (1990) representaram a caracterização do conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão em dois segmentos, para a situação de pressurização e dois, para a situação de despressurização do sistema. Os primeiros dois segmentos, com comportamentos lineares abaixo da pressão recomendada, para o ótimo funcionamento e o segundo segmento, com a variação da pressão a montante da válvula, predominantemente constante acima da pressão declarada, o que indica o funcionamento do sistema de regulagem.

A estabilização da vazão foi observada neste trabalho, na Figura 2, para a situação de pressurização do sistema, estabelecendo um platô. Mas, para a situação de despressurização do sistema, a variação de vazão, em função da variação de pressão de entrada da válvula, acima da pressão recomendada, não se manteve constante, para o intervalo de funcionamento da válvula, o que mostra maior influência da histerese na despressurização do sistema.

Com os dados adimensionalizados, Tabela 1, pode-se observar que a variação de vazão na pressurização e na despressurização apresentam diferentes magnitudes dependendo da variação de pressão que ocorre à montante da válvula. Frizzone *et al.* (2018) e Talamini Júnior *et al.* (2018) apontaram que o comportamento da curva característica dos conjuntos emissores mais válvulas reguladoras apresenta um comportamento sigmoide, pois, acima de 680 kPa, haveria a ruptura do sistema de regulagem e a vazão voltaria a aumentar. Neste trabalho, como as avaliações foram feitas apenas até 600 kPa, não foi possível observar essa ruptura da regulagem, mas foi possível a verificação o comportamento tendendo a uma sigmoide, principalmente na pressurização do sistema.

Frizzone *et al.* (2018), Keller e Bliesner (1990) e Marlow, Allen e Merkle (2016) indicam que as válvulas reguladoras de pressão requerem uma pressão de 35 kPa, referente às perdas internas, sendo essa pressão requerida para o seu bom funcionamento, pressão que deve ser contabilizada no dimensionamento e nos custos energéticos do projeto. Assim, para as válvulas analisadas de 10 PSI (68,9kPa), a pressão mínima na entrada recomendada seria de 15 PSI (103,4 kPa). A partir desta pressão de mínima pressão de 15 PSI, é que foi observada a maior estabilidade da vazão, Figura 2.

Lima *et al.* (2003) e Talamini Júnior *et al.* (2018) determinaram a histerese, por meio da variação da pressão a montante, em relação à variação de pressão a jusante da válvula reguladora de pressão, porém não abordam de forma direta a variação da vazão decorrente da

histerese. No presente trabalho, podemos observar que a vazão sofre um efeito significativo (Tabela 1), decorrente da variação de pressão de entrada na válvula com diferentes intensidades, durante o processo de pressurização e despressurização, característico do fenômeno da histerese.

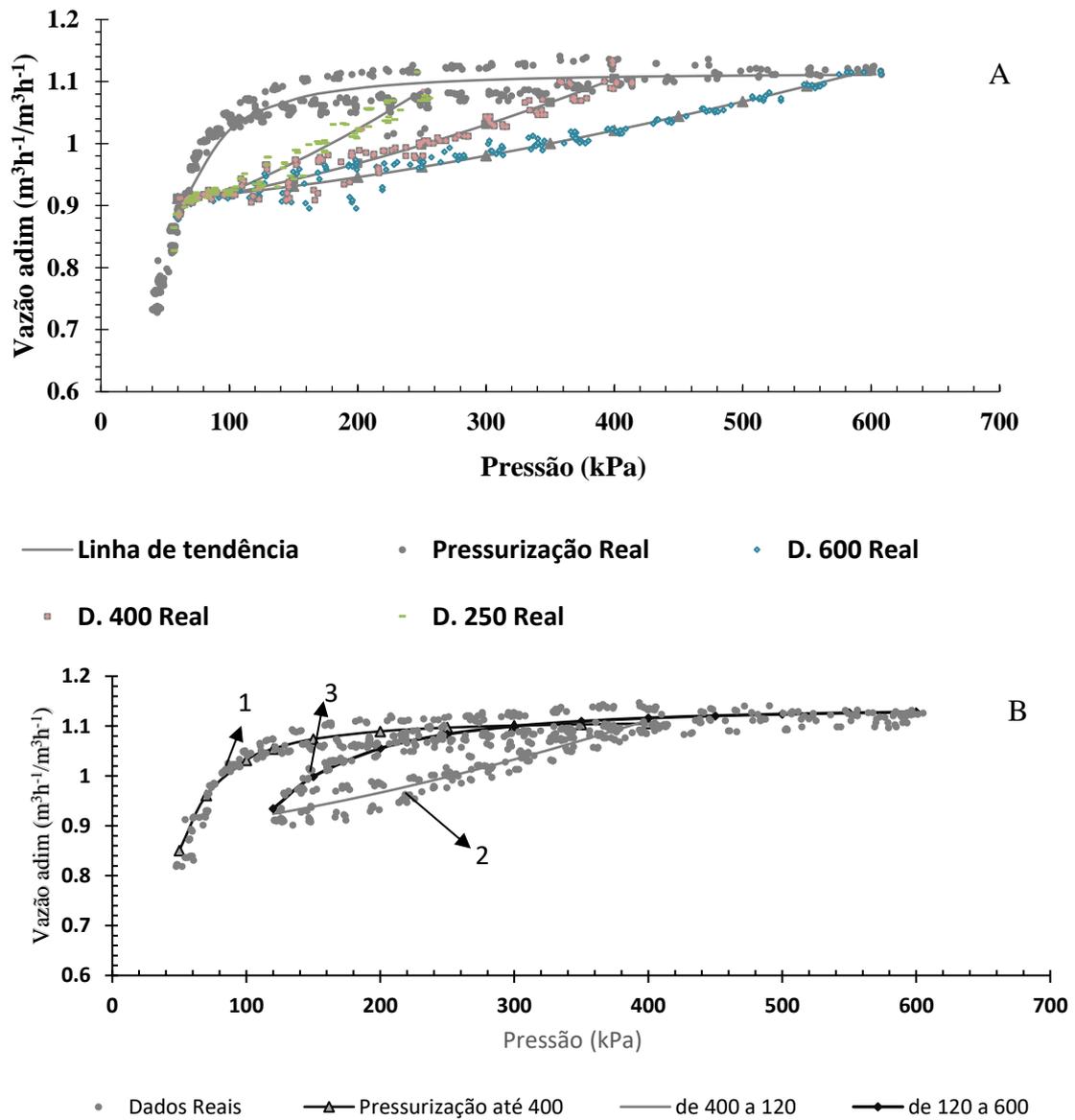
Segundo Edling (1979) e Frizzone *et al.* (2018), em situação de deslocamento da linha lateral do pivô central, a linha lateral, estando em nível, 75% das perdas de carga vão ocorrer em, aproximadamente, 50% do comprimento total da linha lateral. Em declive, as válvulas, no final da linha, vão ser pressurizadas e as do início vão estar se despressurizando pelo componente geométrico; e, para a situação de aclave, ocorre o oposto. Assim, pode-se considerar, de acordo com os resultados obtidos da Tabela 1, que a histerese, em válvulas reguladoras, em pivô central, é influenciada tanto pela distribuição de pressão na linha lateral quanto pela variação da topografia da área a ser irrigada.

Talamini Júnior *et al.* (2018) observaram que a variação da pressão de saída pode chegar a valores de 1 a 8 % e de 7 a 20%, para a pressurização e despressurização, respectivamente, no intervalo de pressão de 147 a 784,5 kPa, para uma válvula de 10 PSI. Para válvulas de 15 e 20 PSI, encontraram variação de pressão de menores magnitudes, quando comparadas às válvulas de 10 PSI, porém, com semelhante tendência de maior variação, no processo de despressurização.

Para as condições estudadas de pressurização e despressurização de 103,4 a 600 dos bocais 32, 33 e 34, a variação de vazão decorrente da histerese tem sua maior magnitude para o intervalo de pressão de 133 a 255 kPa, com variação acima de 15%, chegando ao valor máximo de 15,9% a 200 kPa. E, para a pressão recomendada na entrada da válvula, de 103,4 kPa, a variação de vazão média é 12,4% entre as vazões na pressurização e despressurização do sistema.

Na Figura 3(A e B), estão representados os ensaios da válvula reguladora 68,9 kPa, para os conjuntos emissores mais válvulas, nos intervalos de pressão de 40 a 120 de 40 a 250, de 40 a 400 e 40 a 600 kPa e, para o intervalo 40 a 600, retornando a 120 e pressurização 600 kPa ininterruptamente. Pode-se observar que, assim como na Figura 3, o fenômeno da histerese apresentou-se, em todos os bocais, válvulas e intervalos utilizados. Apresentando para os diferentes bocais a mesma tendência com relação à variação de vazão com a variação de pressão na entrada da válvula.

Figura 3 - Variação da vazão adimensionalizada, para o conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão, em função de diferentes pressões máximas atingidas na pressurização e despressurização do sistema



Fonte: Do autor (2022).

Na Figura 3 (B), pode-se observar que houve uma curva (1) superior representando os dados na pressurização de 40 a 400 kPa, seguida da curva (2) com tendência linear, representando os dados na despressurização 400 a 120 kPa e, posteriormente, a curva (3) para o intervalo de pressurização 120 a 600kPa com semelhante dispersão ao da curva 1.

A perda de carga, ao longo da linha lateral do pivô central, como demonstrado por Baptista *et al.* (2020), aliada ao desnível geográfico, é a principal causa da variação de pressão da entrada das válvulas. Em pivôs centrais com declividade acentuada e com ondulações dentro da área podem ocorrer tanto pressurização quanto despressurização a montante dos conjuntos emissores mais válvula reguladoras de pressão e essas variações alteram a dinâmica da pressão na adutora, assim, é extrema importância conhecer os impactos dessa variação de pressão, na variação de vazão, pelo fenômeno da histerese, mesmo quando a pressão estiver dentro dos limites recomendados.

Ainda pode-se observar, na Figura 3, que as dispersões dos dados da vazão tendem a um comportamento linear nas condições de despressurização do sistema. Sempre que ocorre a despressurização do sistema, há um retorno com tendência linear ao ponto correspondente à pressão de 68,9 kPa. Há, assim, para as curvas geradas, diferentes coeficientes de inclinações dependendo da pressão inicial. Já, para a pressurização, sempre há uma tendência a uma curva sigmoide, como abordando por Frizzone *et al.* (2018).

## 4 CONCLUSÃO

As válvulas reguladoras de pressão de 68,9 kPa (10 PSI), para todos os bocais utilizados, apresentaram variação de vazão, para uma mesma pressão, com o fenômeno da histerese, tendo variação média de vazão de 6,56%.

A vazão real do conjunto emissor mais válvula reguladora, considerando o fenômeno da histerese, para uma específica pressão, é dependente da pressão de entrada na válvula e das condições do sistema, ou seja, se esse está em pressurização ou despressurização.

Para todos os bocais e válvulas estudados, houve a mesma tendência, quando a variação de vazão, por causa da histerese, mesmo quando se avaliaram diferentes intervalos de pressurização e despressurização.

## REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, V. B. da S. *et al.* Pressure distribution on center pivot lateral lines: analytical models compared to EPANET 2.0. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 146, n. 8, p. 04020025, Aug. 2020.
- BAPTISTA, V. B. S. *et al.* Feasibility of the use of variable speed drives in center pivot systems installed in plots with variable topography. **Water**, Oxford, v. 11, n. 10, p. 2192, 2019.
- EDLING, R. J. Variation of center Pivot operation with field slope. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 22, n. 5, p. 1039-1043, 1979.
- FRIZZONE, J. A. *et al.* **Irrigação por aspersão: sistema pivô central**. Maringá: Eduem, 2018.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. Center-pivot system design. KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: The Blackburn Press, 1990. p. 307-387.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: The Blackburn Press, 1990.
- LIMA, S. C. R. V. *et al.* Curvas de desempenho de válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 201-209, ago. 2003.
- MARLOW, R.; ALLEN, R.; MERKLEY, G. **Sprinkler irrigation: part 623**. Washington, DC: National Engineering Handbook, 2016. chap. 11, p. 1-236.
- SCALOPPI, E. J.; ALLEN, R. G. Hydraulics of center-pivot laterals. **Journal Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n. 3, p. 554-567, 1993.
- TALAMINI JÚNIOR, M. V. *et al.* Operational characterization of pressure regulating valves. **The Scientific World Journal**, Boynton Beach, FL, p. 1213638, June 2018.
- VON BEMUTH, R. D.; BAIRD, D. Characterizing pressure regulator performance. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 1, p. 145-0150, 1990.

**ARTIGO 2 - VARIAÇÃO DA VAZÃO EM EMISSORES DE PIVÔ CENTRAL EM  
ÁREA ACIDENTADA PELO FENÔMENO DA HISTERESE**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com  
o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

## RESUMO

O uso das válvulas reguladoras de pressão em pivô central é uma das tecnologias que promovem a difusão dos pivôs centrais para áreas com topografia acidentada. Porém o funcionamento do emissor mais válvula reguladora de pressão é alterado pela variação de pressão a montante das válvulas, resultando na variação de pressão e de vazão a jusante. Assim, com este trabalho, objetivou-se simular, para um pivô central em topografia acidentada, a variação de vazão decorrente da variação da pressão a montante do emissor mais válvula reguladora de pressão em razão dos diversos cenários topográficos. Para tal, foram monitorados oito pontos de pressão a montante dos conjuntos emissores mais válvulas reguladoras de pressão, com a utilização de tradutores de pressão com sistema próprio de armazenamento de dados, ao longo da linha lateral do pivô, em cada lance e ao longo de seu giro completo. A simulação foi realizada por meio da utilização de planilha eletrônica do software Microsoft Excel. Também foi ajustado um modelo, para descrever a variação da vazão do conjunto emissor mais válvula reguladora de pressão, em função da pressão a montante do conjunto, considerando a situação de pressurização e a despressurização. Pôde-se concluir que houve redução da vazão predominantemente para a situação, em que a topografia causa a redução da pressão, a montante dos conjuntos emissores mais válvulas reguladoras de pressão. Pôde-se, também, pela análise dos dados, estabelecer as regiões onde houve a variação da vazão e estabelecer o perfil de distribuição de vazão axial e radial na área ao longo do giro da linha lateral do pivô central.

**Palavras chave:** Eficiência de Irrigação. Válvula Reguladora de Pressão. Agricultura Irrigada.

## 1 INTRODUÇÃO

Desde sua criação, em 1947, o pivô central vem se destacando como um dos sistemas de irrigação mais difundido, seja pela sua facilidade de manejo, por possibilitar sua completa automatizado e pela sua capacidade de abranger grande área com um único equipamento. Apesar do sistema de pivô central ter sido idealizado para terreno com leve declividade, o incremento de tecnologia proporcionou a expansão desse equipamento às diversas condições topográficas. Uma dessas tecnologias é a válvula reguladora de pressão, que possibilita a estabilização pressão de entrada, em cada emissor, ao longo da linha lateral do pivô central (FRIZZONE *et al.*, 2018).

Apesar das válvulas reguladoras de pressão possibilitarem a estabilização da lâmina aplicada em terrenos declivosos, os autores Marlow, Allen e Merkley (2016), Talamini Júnior *et al.* (2018) e Von Bemuth e Baird (1990) abordaram a existência de variação da pressão de saída decorrente da variação da pressão de entrada, o que pode levar à variação da vazão aplicada e aumentar a área deficientemente irrigada. Tal variação é denominada histerese, tendo como causas principais a variação da pressão de entrada das válvulas e os componentes internos (FRIZZONE *et al.*, 2018; VON BEMUTH; BAIRD, 1990).

A variação de pressão, na entrada das válvulas reguladoras, em uma linha lateral do pivô central, é originada pela própria distribuição da carga de pressão e alterada, principalmente, pela topografia “aclive e declive do terreno”, pelo aumento da vazão com o sistema de canto e também pelo rebaixamento do nível do reservatório ao longo do ano ou das irrigações (MARLOW; ALLEN; MERKLEY, 2016). Assim, de acordo com declividade do terreno, que é uma das principais causas de variação de pressão, a distribuição de pressão na linha lateral vai ser tão dinâmica quanto a variação topográfica. Diferentes cenários da linha lateral, em relação à topografia, devem ser levados em consideração, a fim de estabelecer a distribuição de pressão e o monitoramento dos picos e das variações da pressão, ao longo da linha lateral, para a análise da influência do efeito da histerese.

Para algumas generalizações, 75% da perda de carga ocorre em até metade na linha lateral em pivô central (FRIZZONE *et al.*, 2018), assim, haveria uma sobrepressão, na entrada das válvulas, no início da linha do pivô, estando esse em nível. Para as condições de aclive e declive do terreno, a componente geométrica tem maior impacto na distribuição da pressão ao longo da linha lateral. Há, assim, maior pressão, no início da linha, para a situação de aclive acentuado e maior pressão no final da linha em situação de desnível acentuado (JAMES, 1982). Portanto o ponto de mínima pressão dentro da lateral do pivô central, em um sistema com

declividade variada, vai se alterando dentro da linha lateral, à medida que está se movimentando dentro da área.

Baptista *et al.* (2020), James (1982), Scalopi e Allen (1993) e Valiantzas e Dercas (2004), (2005) abordam os diversos métodos de distribuição e monitoramento da pressão, na linha lateral do pivô central, considerando diversos cenários que possibilitam prever a pressão e vazão em cada ponto da área. Considerando a possibilidade de haver variação de pressão, na jusante das válvulas reguladoras, que resultaria em alteração de vazão, o monitoramento da variação de pressão à linha lateral dá base para estabelecer posições em que ocorrerão variações significativas de vazão pelo efeito da histerese.

Assim, com este trabalho, objetivou-se simular a variação de vazão de diferentes emissores, localizados em diferentes pontos na linha lateral do pivô central, à medida que essa se movimentava em uma área com relevo declivoso.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de pressão na linha lateral, a montante dos conjuntos emissores mais válvulas reguladoras de pressão, foram coletados, em um equipamento de pivô central, pertencente à fazenda Santa Izabel, no Município de Formiga-MG, com linha lateral de 351 m, oito torres e um vão de balanço de 20 metros, vazão de  $445 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ , sem canhão final e com tempo de giro de 10 horas com o percentímetro a 100%.

Para o monitoramento da variação de pressão, ao longo da linha do pivô central, foram estabelecidos oito pontos de coleta, no primeiro emissor de cada lance, coletando-se a pressão antes dos conjuntos emissores mais válvulas reguladoras de pressão. Foi utilizado, para a coleta, tradutores de pressão com sistema próprio de coleta e armazenamento dos dados, os quais realizaram coletas dos dados de pressão, a cada minuto, ao longo de um giro completo do equipamento.

Para o ajuste de um modelo matemático que expressasse a variação da vazão do conjunto válvula reguladora mais emissor, foram coletados dados no Laboratório de Irrigação da Universidade Federal de Lavras de emissores Rotator série 3000 da marca Nelson Irrigação®, com bocais de vazão nominal de 1,29; 1,36 e  $1,44 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  para pressão de 10 PSI, com diâmetro de bocal de 6,35; 6,54 e 6,74 mm, identificados pelo catálogo do fabricante pelos números  $32_{(0,250^\circ)}$ ,  $33_{(0,258^\circ)}$  e  $34_{(0,266^\circ)}$ , respectivamente, trabalhando com as válvulas reguladoras de pressão Uni-Flow novas de 68,9 kPa (10 PSI), para qual o fabricante recomenda, para seu ótimo funcionamento, pressão de entrada acima de 103,4 kPa (15 PSI).

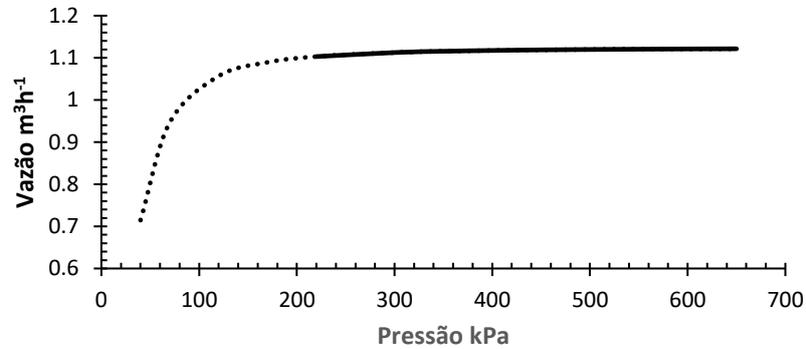
Para identificar e quantificar a magnitude da histerese, foi estabelecido o intervalo de pressão de entrada na válvula, para a coleta dos dados, entre 40 e 600 kPa para os bocais 32, 33 e 34. Coletaram-se os dados durante a pressurização e a despressurização do sistema de maneira ininterrupta a cada um minuto.

Foram gerados modelos matemáticos gerais, para as situações de pressurização e despressurização do sistema, para os dados de pressão e vazão adimensionalizados dos bocais 32, 33 e 34, sendo propostos os modelos de simplicidade numérica e com maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Da posse dos modelos gerais e dos dados de pressão, ao longo do giro da linha lateral obtido no pivô central, foi simulada a variação da vazão que poderia estar ocorrendo no campo com o caminhar da linha lateral. Para as simulações, foram considerados os seguintes cenários:

1 - Válvula com pressão de aumento gradativo, assim, a simulação se dá utilizando o modelo geral da pressurização, Figura 1.

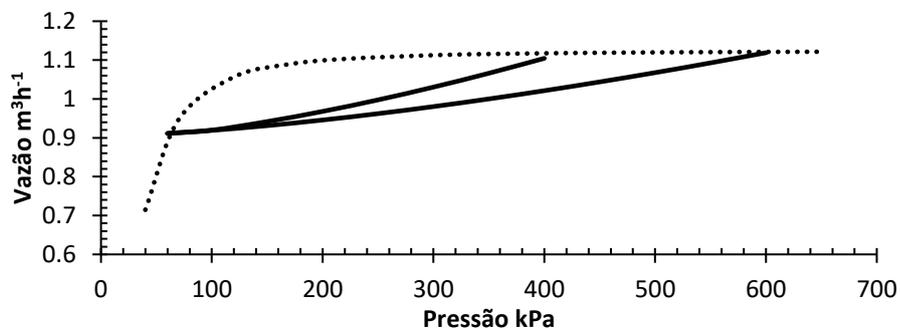
Figura 1 – Cenário 1, pressurização aumentando gradativamente um determinado valor



Fonte: Do autor (2022).

2 - Válvula que estava trabalhando com pressão acima da recomendada e foi sofrendo depressurização, assim, a simulação se deu com o modelo geral da depressurização, Figura 2.

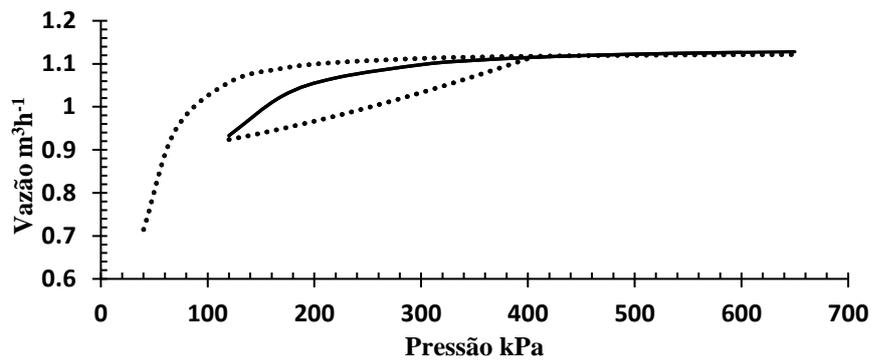
Figura 2 – Cenário 2, depressurizações do sistema sempre para a pressão 68,9 kPa



Fonte: Do autor (2022).

3 - Válvula que estava se depressurizando e volta a se pressurizar, assim, a simulação se deu com a aplicação dos modelos de depressurização, seguido de pressurização ajustada para as pressões iniciais e finais de cada situação, Figura 3.

Figura 3 – cenário 3, despressurizações seguidas de pressurização



Fonte: Do autor (2022).

Foi realizada a adimensionalização dos dados de vazão pela vazão nominal de catálogo (vazão declarada pelo fabricante para a pressão de 68,9 kPa), de acordo com a Equação 1. Utilizando-se dos dados adimensionalizados, foi possível estabelecer os modelos matemáticos que melhor descrevessem a vazão do conjunto válvula reguladora mais emissor, para a pressurização e despressurização.

$$Q_{adim} = \frac{Q_{obtida}}{Q_{Nom}} \quad \mathbf{1}$$

Sendo:  $Q_{adim}$  - Vazão adimensionalizada;  $Q_{obtida}$  - Vazão obtida,  $Q_{Nom}$  - Vazão nominal.

Para avaliar os impactos da variação da vazão com a variação da pressão, na entrada da válvula, ao longo da linha lateral e de seu giro, foram utilizados os modelos ajustados e aplicados em oito posições diferentes da linha lateral dentro da área. Também foram considerados os dois sentidos de rotação da lateral, uma vez que isso pode alterar a condição de pressurização ou despressurização, no mesmo ponto da lateral, à medida que a linha se movimenta.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Modelo da variação de vazão do conjunto em função da pressão de entrada

Foi ajustado o modelo matemático Equação 2, para os dados de vazão do conjunto emissor mais válvula, escolhendo a equação de simples equacionamento e com maior  $R^2$ . Utilizaram-se os conjuntos emissores modelos Rotator, série 3000, da marca Nelson Irrigação® mais válvula reguladoras 10 PSI, para os intervalos de pressões de 50 a 600 e 120 a 600 kPa. A modelagem, para os demais cenários de pressurização, ou seja, os modelos matemáticos na pressurização, iniciando em uma determinada pressão, no intervalo estabelecido, foi realizada, alterando os parâmetros de ajustes  $\alpha$  e  $\beta$  do modelo Geral da pressurização, da Equação 2, de forma a minimizar os resíduos, pelos pressupostos A e B:

$$Q_P = \left( \frac{1}{\alpha + \frac{\beta}{P^2}} \right) * Q_{Nom} \quad (R^2 = 0,98) \quad 2$$

$$Q_i - Q_{p(i)} = 0 \quad A$$

$$Q_{600} - Q_{p(600)} = 0 \quad B$$

P – Pressão de entrada na válvula (kPa);  $Q_{Nom}$  – Vazão nominal;  $Q_i$  – Vazão obtida a uma determinada pressão;  $Q_{p(i)}$  – Vazão estimada pelo modelo Equação 1, para pressão i;  $Q_{p(600)}$  – Vazão estimada pelo modelo Equação 1 para pressão 600 kPa;  $Q_{600}$  - Vazão obtida para a pressão 600kPa; Vazão em  $m^3h^{-1}$ , Valores de referência  $\alpha= 0,88975$  e  $\beta =815,1484$ ).

Para a condição de despressurização do sistema, foi utilizado o modelo matemático Geral, para a despressurização do sistema, Equação 3. E, para a alteração dos parâmetros  $\Psi$  e  $\varphi$ , foram utilizados os pressupostos C e D pela minimização dos resíduos.

$$Q_D = (\Psi + \varphi * P^{1,5}) * Q_{Nom} (R^2 = 0,96) \quad 3$$

$$Q_i - Q_{D(i)} = 0 \quad C$$

$$Q_{68,9} - Q_{D(68,9)} = 0 \quad D$$

$Q_i$  = Vazão obtida para a pressão  $i$ ;  $Q_{D(i)}$  – Vazão estimada considerando pressão  $i$ ;  $Q_{68,9}$  – Vazão obtida para a pressão 68,9 kPa;  $Q_{D(68,9)}$  – Vazão estimada para a pressão de 68,9kPa; e, P– Pressão reinante (kPa), (Vazão em  $m^3h^{-1}/ m^3h^{-1}$ ).

Na Tabela 1, estão os parâmetros  $\alpha, \beta, \Psi, \varphi$  dos modelos das curvas geradas, para os modelos gerais, obtidos na pressurização e despressurização do sistema.

Tabela 1 – Parâmetros de ajuste para os modelos empíricos

Modelos	Parâmetros de Ajuste				$R^2$
	$\alpha$	Erro <sup>C</sup> (%)	$\beta$	Erro <sup>C</sup> (%)	
$Q_P$ (2)	0,88975	0,00089	815,14846	4,0572	0,975
	$\Psi$		$\varphi$		
$Q_D$ (3)	0,89448	0,00063	$1,5687*10^{-5}$	$8*10^{-8}$	0,959

Fonte: Do autor (2022).

Erro<sup>C</sup> – Erros associados aos parâmetros de ajustes. a, b, c e d – constantes de ajustes; P -Pressão (kPa);  $Q_{Nom}$  – vazão nominal.

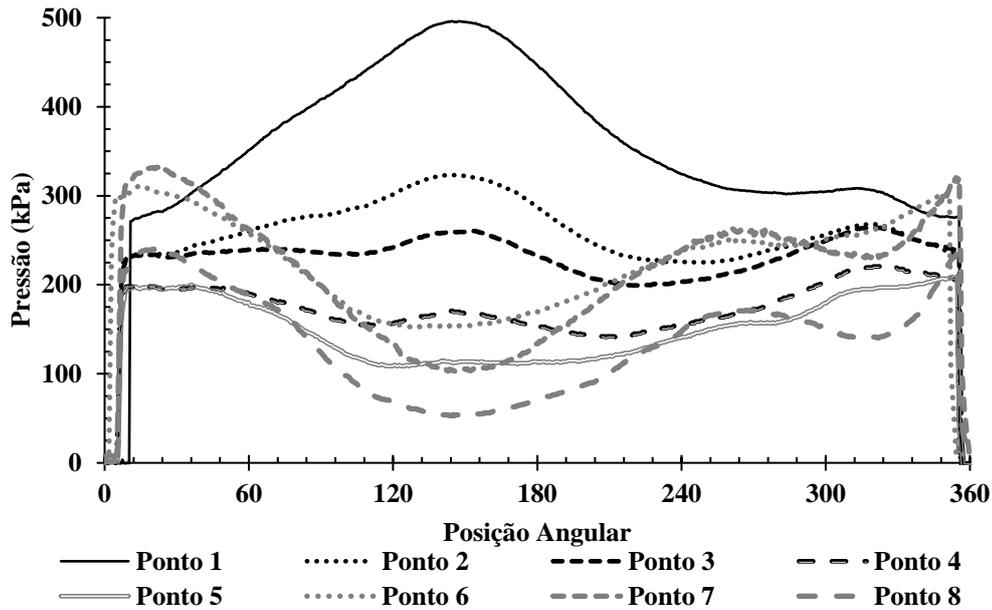
### 3.2 Perfil de distribuição de pressão na linha lateral e ao longo de sua revolução

Na Figura 1 e na Tabela 1, estão representadas as distribuições das pressões nos oito pontos de coleta, na linha lateral do pivô central, ao longo de sua revolução. Pode-se observar que a variação de pressão, para o primeiro ponto, teve amplitude de 222,82 kPa e, para o último ponto, com amplitude de 187,10 kPa. A maior amplitude de pressão ocorreu para o ponto sete com 227,66 kPa e a menor para a ponto oito de 64,88 kPa.

Pode-se observar que, no instante de início de funcionamento da irrigação, após a completa pressurização do sistema, todos os pontos estavam com pressão acima 195 kPa, o que

representa uma sobrepressão do sistema. Durante o giro da linha lateral do pivô, para as posições angulares 92 a 214°, para o último ponto coletado, houve pressão abaixo da mínima recomendada pelo fabricante (53.34 kPa), portanto, nesses pontos, as válvulas estariam trabalhando fora da faixa de regulagem.

Figura 4 – Perfil de distribuição de pressão para oito diferentes pontos na linha lateral ao longo do giro do pivô central



Fonte: Do autor (2022).

Tabela 2 – Variação da pressão nos oito pontos de monitoramento ao longo da linha lateral

	Máximo	Mínimo	Amplitude
Ponto 1	495.6929	272.8723	222.82
Ponto 2	323.3163	225.1349	98.18
Ponto 3	264.0074	199.1284	64.88
Ponto 4	220.6436	141.9964	78.65
Ponto 5	207.8953	109.0469	98.85
Ponto 6	311.0584	152.5873	158.47
Ponto 7	331.3453	103.6877	227.66
Ponto 8	240.4524	53.34671	187.10

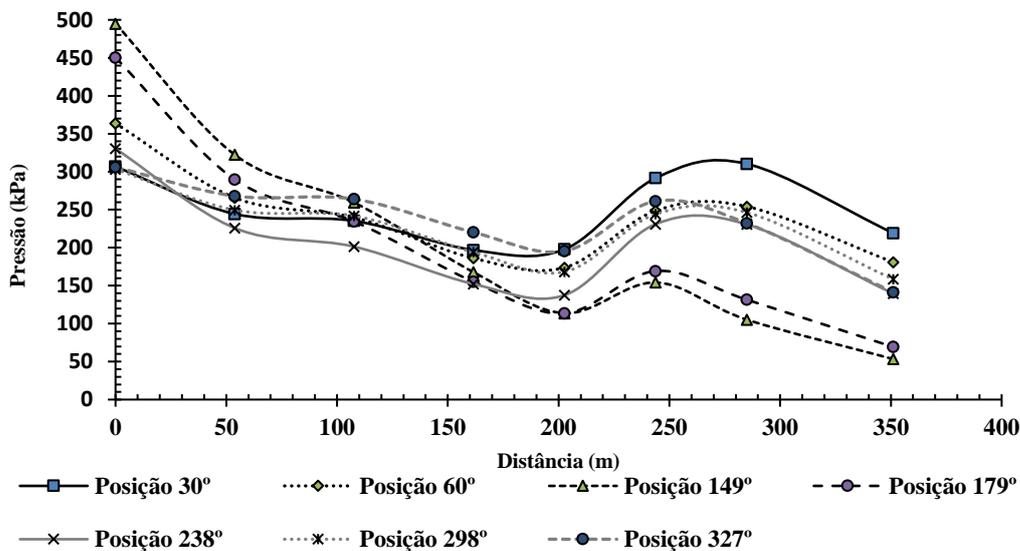
Fonte: Do autor (2022).

De acordo com Chu (1980) e Frizzone *et al.* (2018) e Kelley e Bliesner (1990), a pressão na entrada no emissor, em determinada posição da linha lateral, vai depender da declividade da linha de energia, da linha de carga de velocidade e da declividade da tubulação sobre o terreno. Essa última componente, como pode-se observar na Figura 1, pode ter variação a cada posição

angular da linha lateral, o que possibilita diversos cenários, quanto ao potencial requerido pelo motor, que pode ser ajustado pelo uso inversor de frequência, para minimizar os picos de pressão, como abordado por Barbosa *et al.* (2018) e Pereira *et al.* (2013), de forma a atender a pressão de funcionamento das válvulas reguladoras.

Na Figura 2, estão representados os perfis de distribuição de pressão da linha lateral em diferentes posições angulares do equipamento. Os perfis de distribuições encontrados diferem do perfil abordado por Frizzone *et al.* (2018), para a linha estando em nível, em que ocorrem 75% das perdas de carga na metade do comprimento da tubulação. Perreira *et al.* (2013) abordaram a dificuldade de instrumentação, para o ajuste do rotor da bomba, de acordo com o desnível topográfico, ajustando assim a potência requerida a cada posição angular, porém, atualmente, os inversores de frequência e controladores são capazes de realizar esse ajuste de forma instantânea (VALLEY COMPANY, 2022).

Figura 5 – Perfil de distribuição de pressão na linha lateral do pivô de acordo com a topografia para diferentes posições angulares



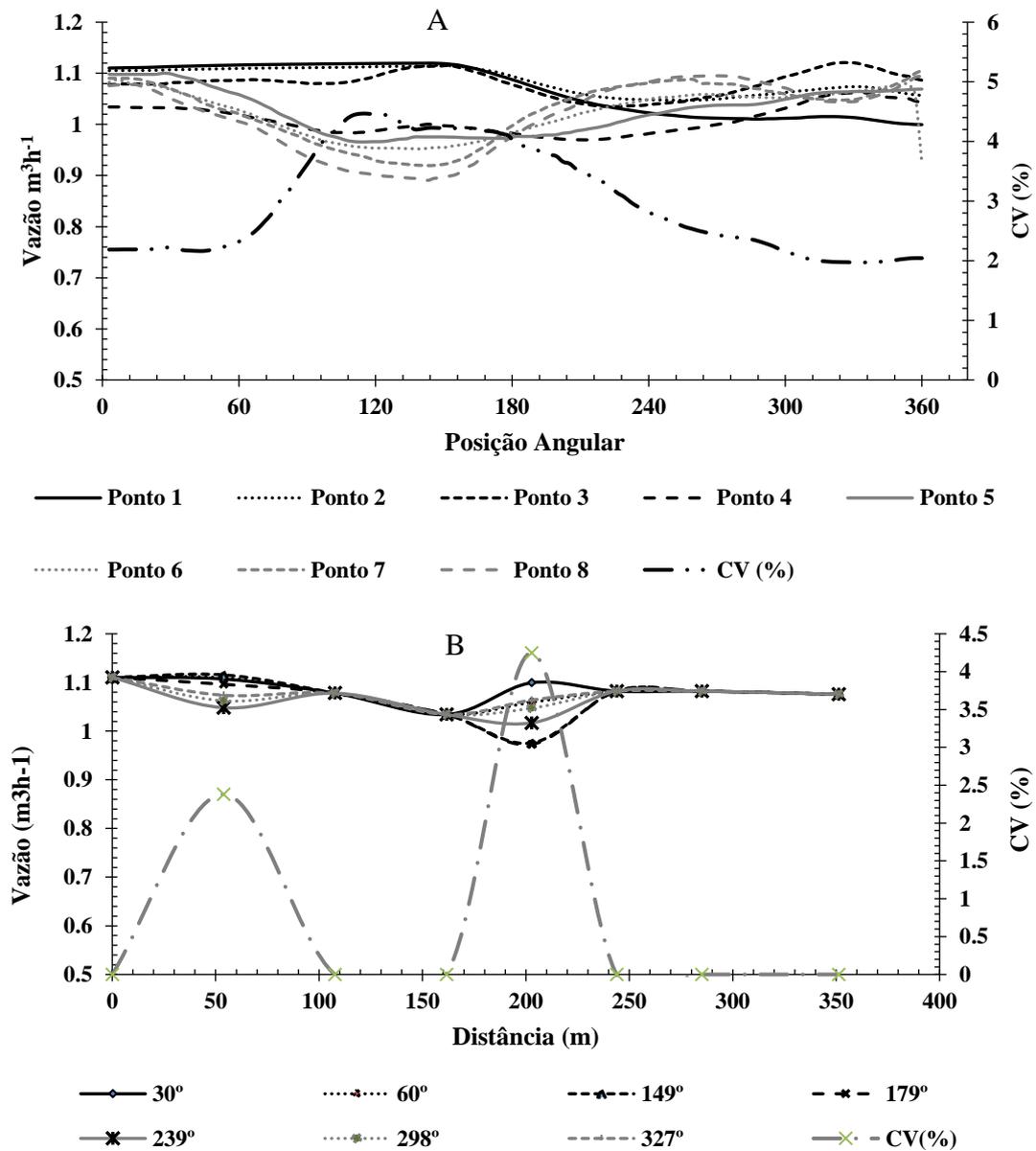
Fonte: Do autor (2022).

### 3.3 Perfil de distribuição de vazão na linha lateral e ao longo do giro da linha lateral no sentido horário

Na Figura 5, está representada a variação máxima de vazão adimensionalizada, decorrente da variação de pressão, na entrada da válvula, ao longo do giro da linha lateral, para diferentes pontos de coletas, ao longo da linha lateral (A) e, ao longo da linha (B), para diferentes posições angulares. Considerando o giro da linha lateral na área, pode-se observar

que houve maior redução da vazão, para as posições angulares 60 a 150°, para as torres 4, 5, 6, 7 e 8, alcançado, nesse intervalo, um coeficiente de variação de aproximadamente 4,5%. Essa redução está relacionada à movimentação da linha lateral em sentido do aclave, no qual vai haver a despressurização das válvulas localizadas na extremidade final da linha pela componente geométrica.

Figura 6 – Variação de vazão, em consequência variação de pressão, para cada ponto de coleta, ao longo do giro do pivô central (A) e ao longo da linha lateral (B), para diferentes posições angulares



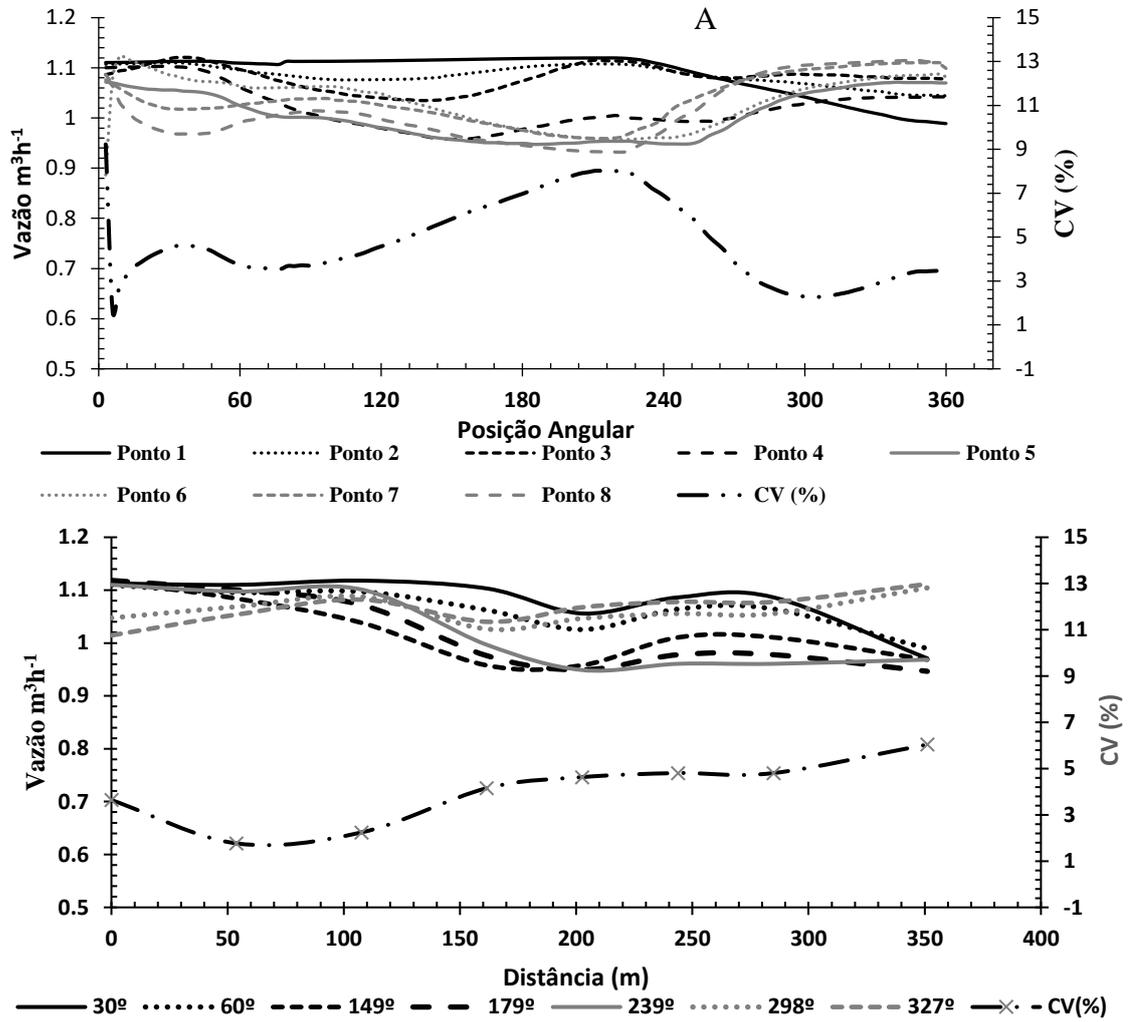
Fonte: Do autor (2022).

Considerando o perfil da vazão, ao longo da linha lateral, Figura 3 – B, para sete posições plotadas, ao longo do giro da linha lateral, pôde-se observar que houve maior variação de vazão para os pontos monitorados 2 e 5, alcançando CV de 2,4% e 4,3%, respectivamente.

### **3.4 Influência da reversão do sentido do giro da linha lateral do pivô central na variação da vazão**

Pode-se observar, na Figura 6, os efeitos na variação da vazão em virtude da reversão do sentido do movimento da linha lateral do pivô central. A variação de vazão alcançou coeficiente de variação de aproximadamente 8% entre os pontos coletados, ao longo da linha lateral, durante o giro da linha lateral do equipamento. Na Figura 5 (B), pode-se observar a variação da vazão total na linha lateral, para cada posição angular, observando maior coeficiente de variação de aproximadamente 6 % para a extremidade final da linha lateral.

Figura 7 – Variação da vazão, considerando a reversão do sentido da linha lateral, ao longo do giro da linha lateral (A) e ao longo da linha para determinada posição (B)



Fonte: Do autor (2022).

Para contornar os problemas da redução da uniformidade de aplicação, já foram abordadas alternativas como controle de velocidade das torres (KELLER; BLIESNER, 1990), mudança da posição do início das irrigações com defasagem de 4 horas (KELLER; BLIESNER, 1990) e a inversão do sentido da movimentação da linha lateral, após a análise detalhada do perfil de distribuição de pressão e vazão. Pode ser aplicada, para minimizar os efeitos decorrentes da redução da vazão pela variação da pressão, na entrada da válvula. No Anexo 1, estão as simulações da variação da vazão com a variação de pressão a montante dos emissores mais válvula reguladora de pressão, nos oito pontos, ao longo da linha lateral. Pode-se observar, nesse anexo, que cada ponto individualizado à variação de vazão tanto do sentido horário quanto no sentido anti-horário, demonstram a dinâmica da variação da vazão com a alteração do sentido de movimentação das torres.

## 4 CONCLUSÃO

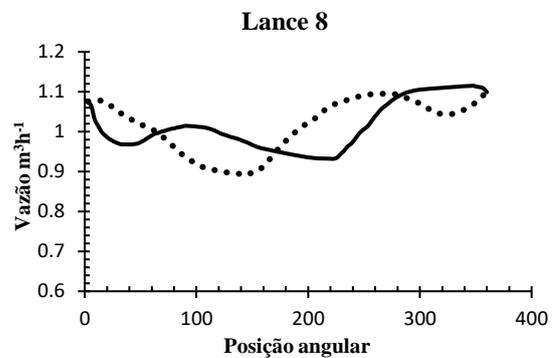
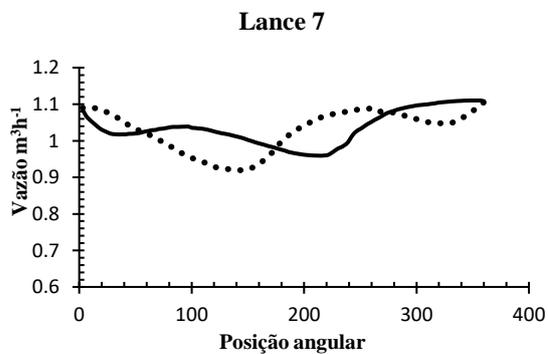
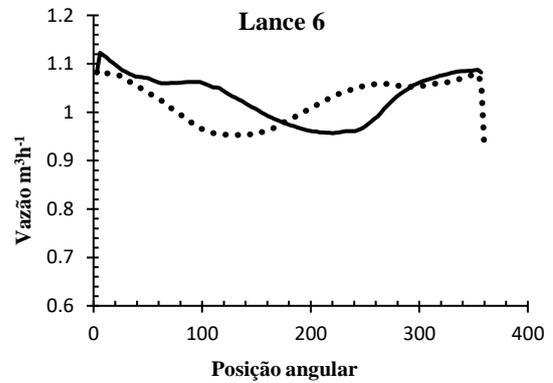
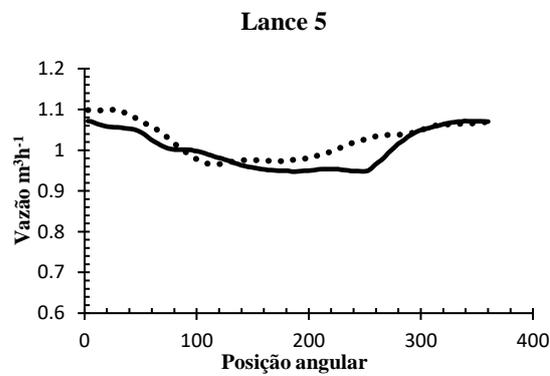
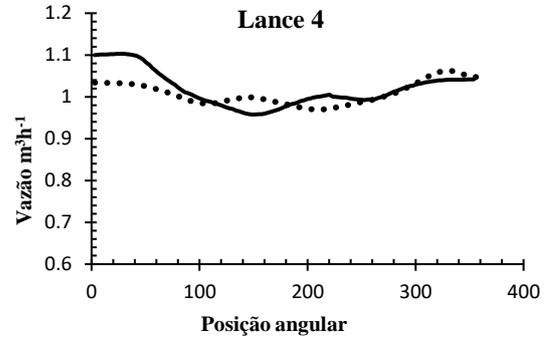
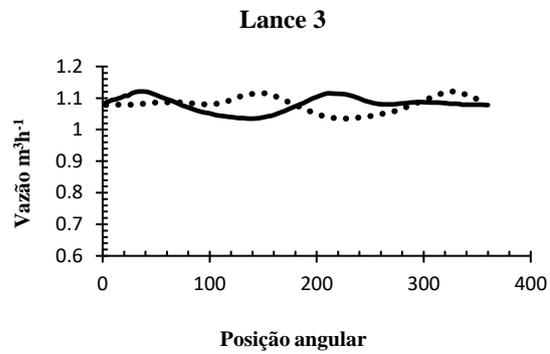
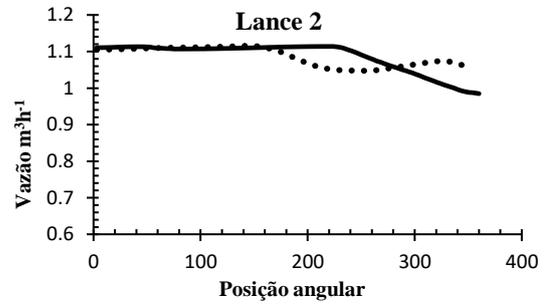
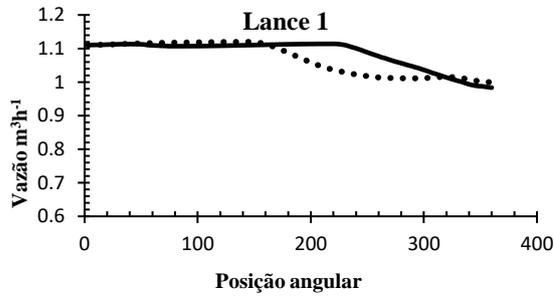
Com a aplicação do modelo de estimativa de vazão, em função da pressurização e da despressurização do sistema, foi possível quantificar a variação de vazão pela histerese da válvula reguladora, em diferentes pontos da linha lateral de um equipamento, operando em condições de topografia irregular.

O modelo gerado, para a despressurização do sistema, mostra que pode haver variação da vazão, em determinado ponto de uma lateral, mesmo que a pressão esteja acima da pressão mínima recomendada para o seu funcionamento. O mesmo não ocorre, quando o sistema está em pressurização, desde que esteja acima da pressão mínima recomendada. Por esse motivo, a mudança de sentido de movimentação da linha lateral promoveu alteração, na variação de vazão espacial, decorrente da variação da pressão.

## REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, V. B. S. *et al.* Pressure distribution on center pivot lateral lines: analytical models compared to EPANET 2.0. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 146, n. 8, p. 04020025, Aug. 2020.
- BARBOSA, B. D. S. *et al.* Energy efficiency of a center pivot irrigation system. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 2, p. 284-292, mar./abr. 2018.
- CHU, S.-T. Center pivot irrigation design. **Agricultural Experiment Station Technical Bulletins**, South Dakota, n. 61, p. 1-55, 1980.
- FRIZZONE, J. A. *et al.* **Irrigação por aspersão: sistema pivô central**. Maringá: Eduem, 2018.
- JAMES, L. G. Modeling the performance of center pivot irrigation systems operating on variable topography. **Transactions of the ASAE**, [St. Joseph], v. 25, n. 1, p. 143-0149, 1982.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: The Blackburn Press, 1990.
- MARLOW, R.; ALLEN, R.; MERKLEY, G. **Sprinkler irrigation: part 623**. Washington, DC: National Engineering Handbook, 2016. chap. 11, p. 1-236.
- PEREIRA, P. H. C. *et al.* O uso da engenharia de automação na redução do consume de energia elétrica em um sistema de irrigação por pivô central. *In: HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS*, 13., 2013, Porto. **Proceedings** [...]. Porto: Safety, 2013. p. 163-168.
- SCALOPPI, E. J.; ALLEN, R. G. Hydraulics of center-pivot laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n. 3, p. 554-567, 1993.
- TALAMINI JÚNIOR, M. V. *et al.* Operational characterization of pressure regulating valves. **The Scientific World Journal**, Boynton Beach, FL, p. 1213638, June 2018.
- VALIANTZAS, J. D.; DERCAS, N. Economic design of center-pivot sprinkler laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 130, n. 6, p. 491-498, 2004.
- VALIANTZAS, J. D.; DERCAS, N. Hydraulic analysis of multidiameter center-pivot sprinkler laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 131, n. 2, p. 137-146, 2005.
- VALLEY COMPANY. Catálogo de produtos. **Valley**, Uberaba, 2022. Disponível em: <https://www.valleyirrigation.com.br/%20literatura>. Acesso em: 23 maio 2022.
- VON BEMUTH, R. D.; BAIRD, D. Characterizing pressure regulator performance. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 1, p. 145-15.

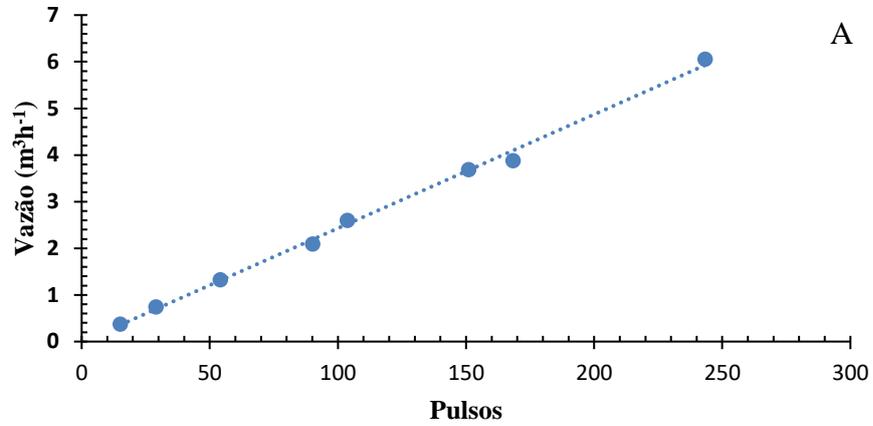
## ANEXO A – PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO AO LONGO DO GIRO DO PIVÔ CENTRAL COM A LINHA LATERAL E SENTIDO HORÁRIO E ANTI-HORÁRIO



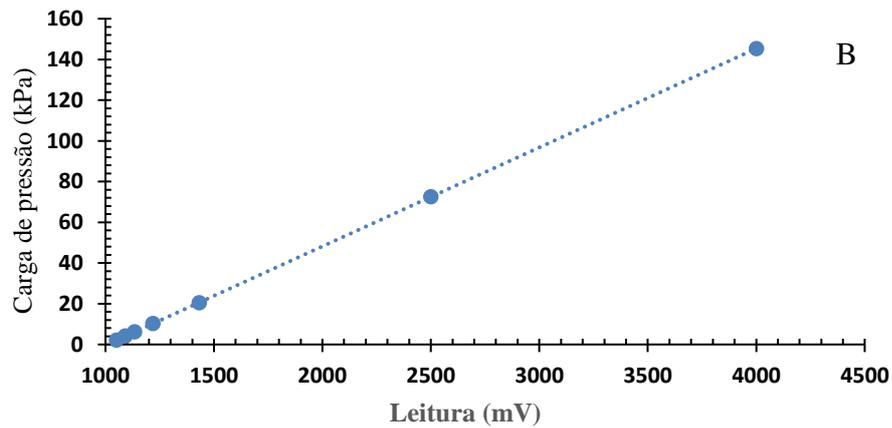
..... Sentido Horário

———— Sentido Anti-Horário

**ANEXO B – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE VAZÃO (A) E DO  
TRADUTOR DE PRESSÃO (B)**



$$Q_o = 0,0244 (Pl) - 0,0118 \quad R^2 = 0,997$$



$$P_o = 0,0486(mV) - 48,975 \quad R^2 = 1$$

Sendo  $Q_o$  – vazão obtida ( $m^3h^{-1}$ ),  $Pl$  – Pulsos elétricos obtidos,  $P_o$  – Pressão obtida (kPa) e  $mV$  – leitura em milivolts.