

INFLUÊNCIA DO CANHÃO FINAL NA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO E VAZÃO DA LINHA LATERAL DE UM PIVÔ CENTRAL

VICTOR BUONO DA SILVA BAPTISTA¹; ALBERTO COLOMBO²; THIAGO HENRIQUE BURGARELLI TEIXEIRA³; PIETROS ANDRÉ BALBINO SANTOS⁴; ADRIANO VALENTIM DIOTTO⁵ E LESSANDRO COLL FARIA⁶

¹ Professor Assistente, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, s/n, Caixa Postal 3034, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil. Email: victor.buonosb@ufla.br

² Professor Titular, Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, s/n, Caixa Postal 3034, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil. Email: acolombo@ufla.br

³ Doutorado, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, s/n, Caixa Postal 3034, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil. Email: teixeira.agricola@gmail.com

⁴ Doutorado, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, s/n, Caixa Postal 3034, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil. Email: pietros.balbino@gmail.com

⁵ Professor Adjunto, Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, s/n, Caixa Postal 3034, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil. Email: adriano.diotto@ufla.br

⁶ Professor Associado, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Rua Gomes Carneiro, Centro, CEP 96010-610, Pelotas, RS, Brasil. Email: lessandro.faria@ufpel.edu.br

1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da presença do canhão final, com diferentes vazões, na distribuição de pressão e vazão da linha lateral de um sistema de irrigação do tipo pivô central utilizando o simulador hidráulico EPANET em comparação com um modelo analítico. Foram realizadas simulações de uma linha lateral do pivô central, localizado em Lavras/MG, com a inserção de um canhão final fictício de altas vazões. Houve também a diminuição do diâmetro da linha lateral, visando provocar maior perda de carga. Os resultados obtidos pelo EPANET foram comparados com resultados determinados a partir de um método analítico. Dessa forma, este estudo demonstrou a influência do acréscimo de vazão na distribuição de pressão da linha lateral do pivô central, devido à presença do canhão final. Os resultados também demonstraram a qualidade da simulação hidráulica do EPANET, que apresentou desvio relativo máximo de 1% em relação ao método analítico.

Keywords: simulação hidráulica, distribuição de pressão, EPANET, modelagem.

**BAPTISTA, V. B. S.; COLOMBO, A.; TEIXEIRA, T. H. B.; SANTOS, P. A. B.;
DIOTTO, A. V.; FARIA, L. C.**

**INFLUENCE OF END GUN IN THE PRESSURE AND FLOW RATE
DISTRIBUTION OF A CENTER PIVOT LATERAL LINES**

2 ABSTRACT

The aim of this work was to analyze the influence of the presence of the end gun, with different flow rates, on the pressure distribution and lateral line flow of a center pivot irrigation system

using the EPANET hydraulic simulator compared to an analytical model. Simulations were performed on center pivot lateral line located in Lavras/MG. In the simulations was inserted an end gun operating under high flow. There was also decrease lateral line diameter aiming to cause greater head loss. The results obtained were compared with the use of EPANET parameters and with an analytical method. Thus, this study showed the influence from flow increase in the pressure distribution of the pivot lateral line, since there was an end gun in the end of the lateral. The results also demonstrated a satisfied estimative of EPANET's hydraulic theory.

Keywords: hydraulic simulation, pressure distribution, EPANET, modeling.

3 INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas de irrigação do tipo pivô central tem aumentado de modo significativo no Brasil. De acordo com levantamento efetuado pela Agência Nacional de Águas e Embrapa (ANA, 2019), no Brasil, no ano de 2017, foram identificados 23181 equipamentos do tipo pivô central, que ocupavam uma área total de 1 milhão e 476 mil hectares, valor este que é 47 vezes maior que a área mapeada em 1985.

Devido ao movimento de rotação da linha lateral do pivô, uma quantidade significativa (21,5%) da área do quadrado que inscreve o círculo irrigado não é aproveitada para a irrigação (SOLOMON; KODOMA, 1978). Uma estratégia adotada para aumentar a proporção de área irrigada tem sido a utilização de grandes aspersores na extremidade da linha lateral, comumente chamados de canhão final (BERNUTH, 1983), que são acionados quando a linha lateral se aproxima dos cantos do quadrado que inscreve o círculo irrigado. Além disto, os canhões finais, quando acionados durante todo o giro da lateral, permitem um aumento do raio irrigado permitindo um acréscimo de área irrigada (BERNUTH, 1983).

De acordo com Bernuth (1983), a instalação de um canhão final na linha lateral de um pivô central, requer que uma maior fração da vazão total da linha seja conduzida até o seu final, aumentando o

valor da perda de carga e a sua distribuição espacial ao longo da linha lateral. Este autor também alerta que a operação intermitente do canhão, para cobrir os cantos da área, pode afetar a uniformidade da aplicação de água e, conseqüentemente o retorno econômico esperado da irrigação. Scaloppi e Allen (1993) também alertam que a instalação de um canhão final pode causar alterações significativas nas características hidráulicas da linha lateral de um pivô central, com implicações práticas significativas para o seu dimensionamento, para a sua uniformidade de aplicação de água e para a eficiência no uso de energia.

De acordo com Sadeghi e Peters (2013), o cálculo da perda de carga em uma linha lateral dotada de inúmeras saídas de água exige o cálculo da perda de carga nos sucessivos trechos da linha delimitados por saídas adjacentes. Este processo tem início no trecho que contém a saída de jusante, prosseguindo em direção ao trecho que contém a saída de montante e a entrada de água na lateral. O simulador hidráulico EPANET (ROSSMAN, 2000) é uma excelente ferramenta numérica para acelerar o tedioso processo de cálculo da distribuição da perda de carga ao longo de uma linha lateral que apresenta trechos com diferentes vazões.

No caso da linha lateral de um pivô central, que apresenta um grande número de saídas, também é possível calcular a distribuição da perda de carga ao longo da linha lateral, assumindo a existência de um

espaçamento infinitesimal entre as saídas. Este processo permite a obtenção de soluções analíticas cujos resultados são bastante próximos dos resultados obtidos com o processo trecho a trecho (ALAZBA, 2005; ANWAR, 2000; SADEGHI; PETERS, 2013; SCALOPPI; ALLEN, 1993; TABUADA, 2011, 2014; VALIANTZAS; DERCAS, 2005).

O objetivo deste trabalho foi analisar, utilizando o simulador hidráulico EPANET (ROSSMAN, 2000) em comparação com um modelo analítico (TABUADA, 2011), o efeito da presença de canhões finais com vazões crescentes, que exigem que frações crescentes da vazão total da linha lateral seja conduzida até o seu final, sobre a distribuição espacial da perda de carga na linha lateral de um sistema de irrigação do tipo pivô central.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foi considerada a linha lateral de um pivô central instalado em área experimental da Universidade Federal de Lavras (Lavras/MG). O pivô central aplica uma vazão $13,08 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no círculo básico (Q_b) delimitado pelos 73,4 m de comprimento de sua linha lateral, que é composta por dois vãos de 34 m, com altura máxima do arqueamento de 0,7 m, e um balanço de 5,4 m, sendo sustentada por torres com altura de 4,0 m. Na linha lateral existem 34 saídas de água (15 saídas no primeiro vão, 16 saídas no segundo vão e 3 saídas no balanço), que são igualmente espaçados de, respectivamente, 2,29, 2,14 e 1,27 m, no primeiro vão, no segundo vão e no balanço. Estando a primeira saída do primeiro vão a uma distância de 1,20 m do ponto pivô, a primeira saída do segundo vão a uma distância de 2,0m da última saída do primeiro vão e a primeira saída do balanço a uma distância de 2,20 m da última saída do segundo vão. Todas estas saídas são dotadas de: (i) um pendural, com diâmetro

interno de 19,05mm e comprimento suficiente para manter os emissores a uma altura do solo de 1,8m; (ii) válvulas reguladoras de pressão (VRP) de 10 psi (69 kPa); e (iii) emissor Nelson 3000 serie 3TN. A linha lateral foi considerada em nível. O conjunto motobomba e a tubulação de adução foram substituídos por um reservatório com altura fixa de 28m acima da base do ponto pivô. A linha lateral do pivô central foi caracterizada conforme proposto por Baptista et al. (2019) e as simulações hidráulicas foram realizadas no software EPANET (ROSSMAN, 2000).

Para efeito da análise do efeito de vazões crescentes no canhão sobre a distribuição espacial da perda de carga na linha lateral foram consideradas 4 situações distintas: (i) a lateral operando sem canhão final, isto é com vazão total igual a vazão no círculo básico ($Q_t=Q_b=13,08 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$); (ii) a lateral operando com canhão final com vazão de $5,61 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, que resulta em uma vazão total de $Q_t=18,69 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; (iii) a lateral operando com canhão final com vazão de $13,08 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, que resulta em uma vazão total de $Q_t=26,16 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; (iv) a lateral operando com canhão final com vazão de $30,52 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, que resulta em uma vazão total de $Q_t=43,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Os valores selecionados de vazão do canhão final foram calculados de forma a se obter valores da razão ($gr = \text{gun ratio}$) entre a vazão do canhão final (Q_c) e a vazão total do sistema ($Q_t= Q_b+Q_c$) de respectivamente $gr=0$; $gr=0,3$, $gr=0,5$ e $gr=0,7$.

Para efeito da simulação hidráulica no EPANET foi inserido antes do canhão final uma válvula reguladora de pressão de 20 psi (138 kPa). As vazões dos emissores foram calculadas pelo EPANET através dos valores dos coeficientes de descarga (k , em $\text{m}^{2,5} \text{ s}^{-1}$) de cada emissor (FRIZZONE et al., 2018), conforme descrito na Equação 1.

$$k = \frac{q_s}{\sqrt{h_{v_{rp}}}} \quad (1)$$

Em que,
 q_s – vazão de cada saída de água (emissores), $m^3 h^{-1}$;

h_{vrp} – carga de pressão regulada pela válvula VRP, m.

Para que a perda de carga na linha lateral fosse substancial, foi considerado um valor de 75 mm para o diâmetro interno da linha lateral. Nas simulações hidráulicas foi utilizada a equação de perda de carga de Hazen-Williams, com valores do coeficiente de rugosidade (C_{HW}) igual a 140 para os pendurais e 135 para a linha lateral. Os valores da perda de carga ao longo da linha lateral, obtidos no EPANET, entre o ponto pivô e a última saída de água, foram comparados com valores obtidos através do método analítico proposto por Tabuada (2011) (Equação 2); onde, a função hipergeométrica (CHANDRUPATLA; OSLER, 2010) (Figura 1) foi utilizada para resolução da integral numérica que calcula o fator de correção da perda de carga.

$$hf_x = \left[K_{HW} \times \left(\frac{Qt}{C_{HW}} \right)^{ev} \times \frac{Lt}{D^{ed}} \right] \times \left[\frac{x}{Lt} \right] F_{hipergeométrica} \left[0,5; -ev; 1,5; (1-gr) \left(\frac{x}{Lt} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Em que,

hf_x – perda de carga na linha lateral até o ponto x (m);

$K_{HW} = 10,67 s^{1,852} m^{-0,685}$;

Qt – vazão total do sistema de irrigação ($Qt=Qb+Qc$) ($m^3 s^{-1}$);

C_{HW} – coeficiente de rugosidade do material da tubulação (adimensional);

Lt – comprimento total da linha lateral (m);

D – diâmetro interno da linha lateral (m);

ev, ed – expoentes da vazão (1,852) e do diâmetro (4,87), respectivamente;

gr – razão entre vazão do canhão e vazão total (Qc/Qt);

x – ponto qualquer ao longo da linha lateral ($0 \leq x \leq Lt$).

Figura 1. Rotina do VBA de cálculo da função Hipergeométrica ($F_{hyper} []$).

```
Function hgs(a, b, c, z)
    t = a * b / c * z
    s = 1 + t
    n = 1
Do
    a = a + 1: b = b + 1: c = c + 1: n = n + 1
    t = t * a / c * b / n * z
    s1 = s
    s = s + t
    If s <> 0 Then Delta = Abs(s - s1) / s
    If s = 0 Then Delta = Abs(s - s1)
Loop While Delta > 0.00001
hgs = s
End Function
```

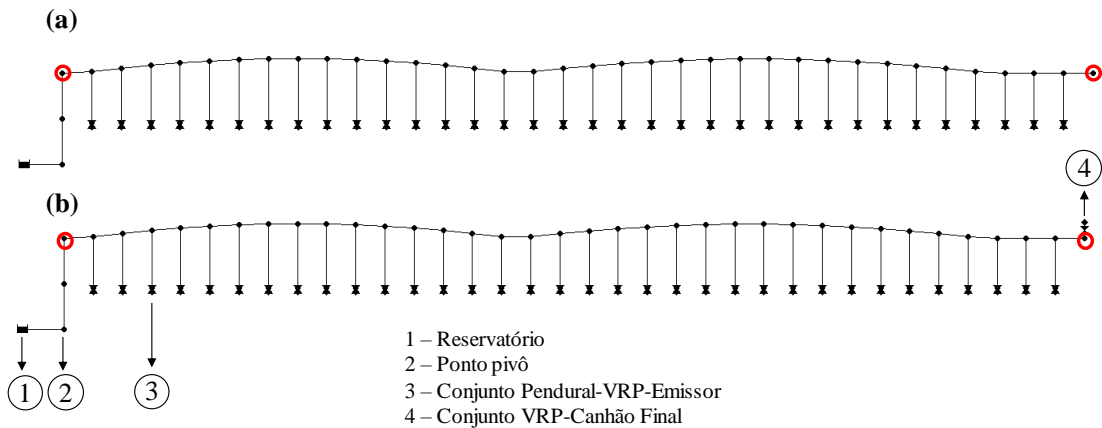
Frações da perda de carga foram calculadas através do método analítico proposto por Tabuada (2011) (Equação 3), para valores de x/Lt de 0,28, 0,5, 0,6, 0,8 e 0,9. Estes resultados foram comparados com valores obtidos com o software EPANET.

$$\frac{hf_x}{hf_{x=Lt}} = \frac{\left[\frac{x}{Lt} \right] F_{hipergeométrica} \left[0,5; -ev; 1,5; (1-gr) \left(\frac{x}{Lt} \right)^2 \right]}{F_{hipergeométrica} \left[0,5; -ev; 1,5; (1-gr) \right]} \quad (3)$$

A utilização do software EPANET para a simulação hidráulica permitiu uma caracterização mais precisa da rede hidráulica. Na Figura 2, são apresentados os mapas da rede hidráulica do EPANET para as duas configurações analisadas neste estudo, linha lateral com e sem canhão final.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 2. Mapa da rede hidráulica do sistema de irrigação do tipo pivô central no EPANET para as duas configurações analisadas. **(a)** Linha lateral sem canhão final. **(b)** Linha lateral com canhão final.

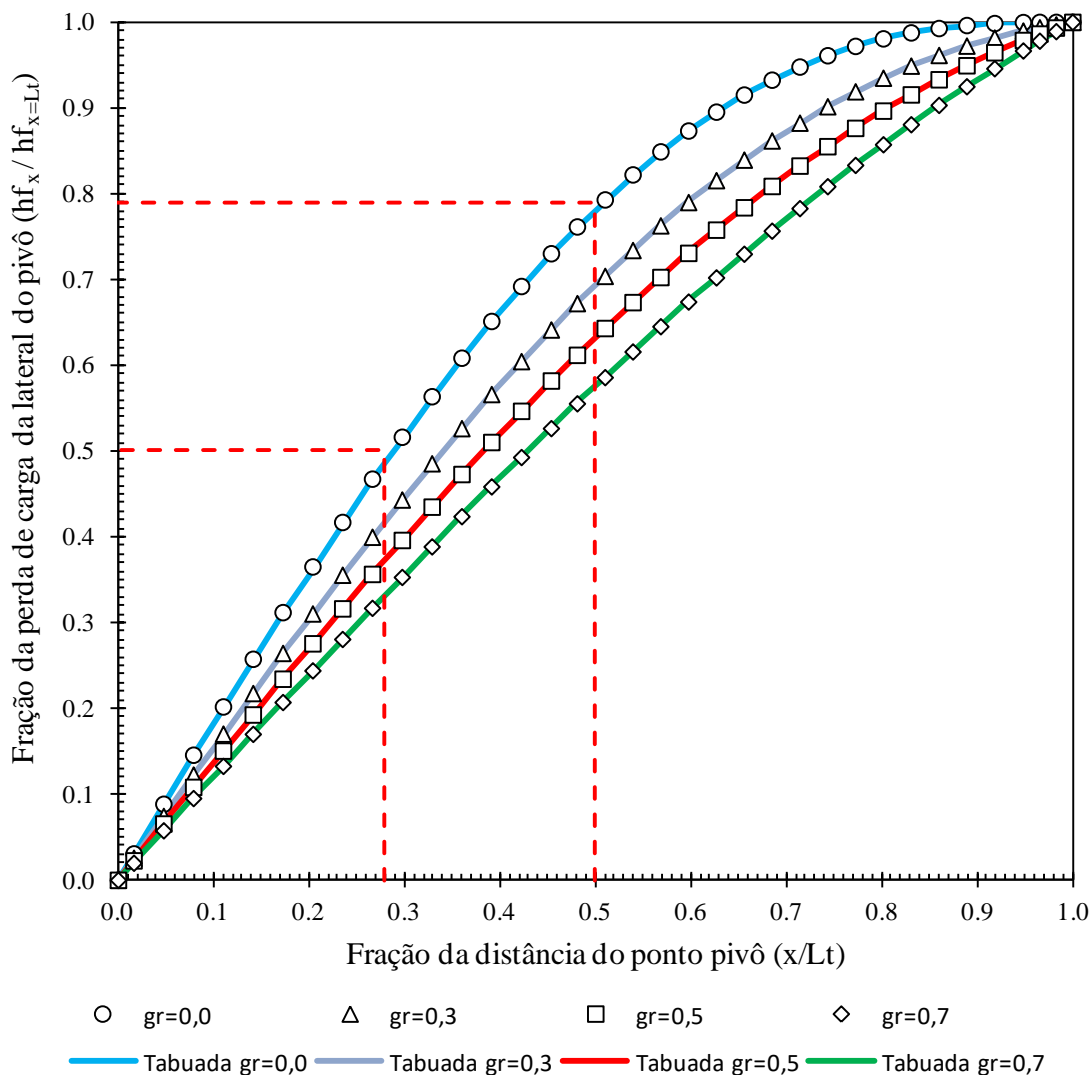


Nesta figura, é possível observar os componentes hidráulicos utilizados nas simulações (reservatório, tubos, nós, válvulas e emissores). A perda de carga obtida no EPANET foi contabilizada a partir da diferença dos valores de energia (Head, em m) entre o ponto do topo do ponto pivô e o último nó da linha lateral (nós destacados na Figura 2).

Na Figura 3, são apresentadas as frações das distribuições de perda de carga

ao longo da linha lateral do pivô central obtidas nas simulações hidráulicas do EPANET e através do modelo analítico proposto por Tabuada (2011). Nesta figura, são apresentadas as distribuições da fração da perda de carga ($hf_x / hf_{x=Lt}$), em relação a fração do comprimento (x / Lt), para a linha lateral operando sem canhão final ($gr=0$) e com o canhão final ($gr=0,3$, $gr=0,5$ e $gr=0,7$).

Figura 3. Distribuição da fração perda de carga ao longo da linha lateral do pivô central para diferentes vazões do canhão final.

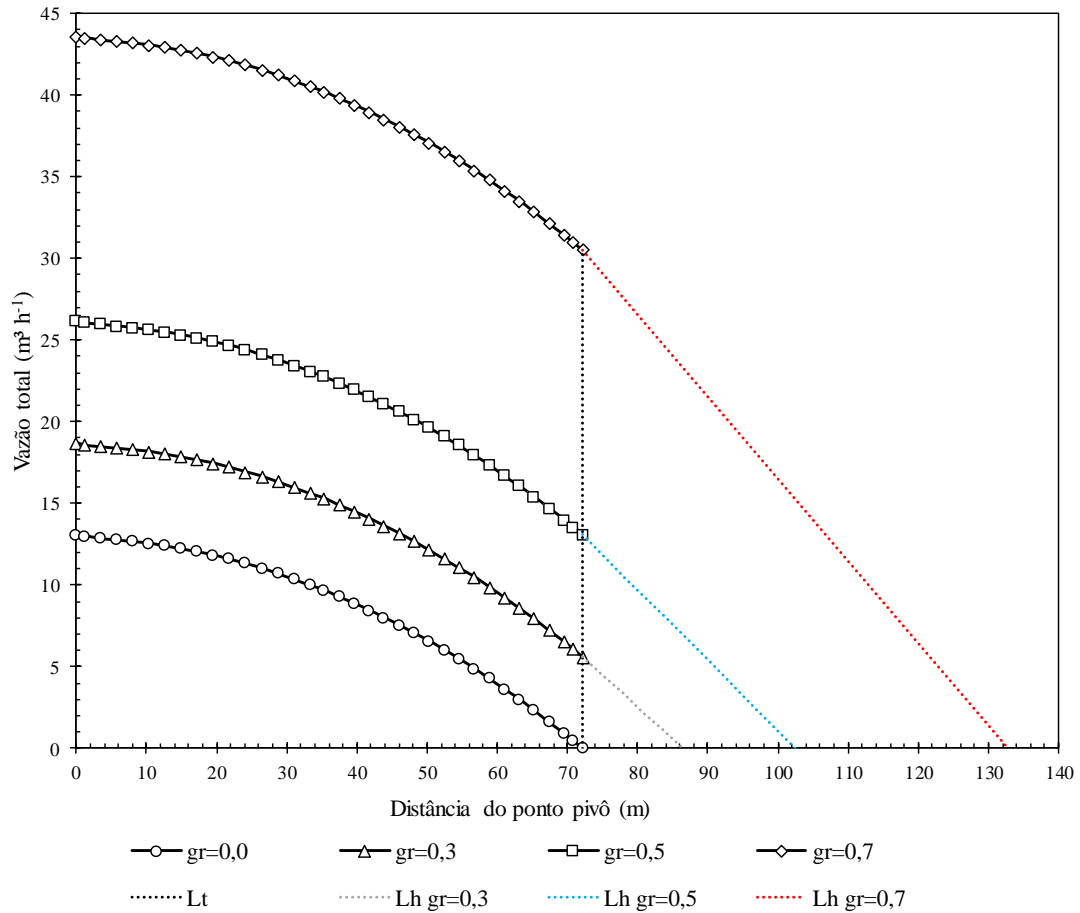


Na Figura 3, é possível observar que para a configuração sem canhão final, 50% da perda de carga ocorrem em 28% da linha lateral (L_t), e que 79% da perda de carga ocorrem em 50% da linha lateral (L_t). Esse mesmo resultado foi apresentado por Allen et al. (2011), em um estudo sobre o comportamento da perda de carga em linhas laterais de pivô central. Porém, estes valores são notados apenas quando não há a presença de canhão final ($gr=0$). Para $gr>0$, foi observado que 50% da perda de carga ocorrem próximo a 28% da linha lateral (L_t), e esse valor diminui conforme o valor de gr aumenta.

Além disso, com o aumento da razão entre a vazão do canhão final e a vazão total do sistema (gr), a curva da distribuição da fração da perda de carga ao longo da linha lateral do pivô central tende a linearidade, confirmando o estudo de Bernuth (1983). Este último afirma que a distribuição de pressão ao longo de uma lateral diminui a uma taxa maior devido a uma maior porcentagem de vazão que chega à extremidade da linha lateral.

As distribuições de vazão para as quatro configurações do pivô central e os respectivos comprimentos hidráulicos são apresentadas na Figura 4.

Figura 4. Distribuições da vazão ao longo da linha lateral do pivô central para diferentes configurações do pivô central.



Conforme apresenta na Figura 4, comprimento hidráulico ($L_h = L/\sqrt{1-gr}$), são figuras matemáticas determinadas quando há presença de canhão final na linha lateral. De acordo com Colombo (2003), para um pivô central sem um canhão final ($Q_c=0$), o comprimento hidráulico equivalente (L_h) é igual ao comprimento da lateral móvel do pivô (L_t); e para o caso de um pivô com canhão final, o comprimento hidráulico equivalente (L_h) é maior que comprimento da lateral móvel. Dessa forma, a vazão de entrada nestas configurações é a soma da vazão do círculo básico (Q_b , fixo) e as vazões do canhão final (Q_c).

Na Figura 4, é possível observar que para a configuração sem canhão final, a vazão zero é localizada exatamente na extremidade da linha lateral (L_t), ou seja, a vazão de entrada no pivô central é a vazão do círculo básico (Q_b). Para as configurações em que há a presença de canhão final, a vazão zero é localizada a $L_{h_{gr=0,3}}=87,7\text{m}$, $L_{h_{gr=0,5}}=103,8\text{m}$ e $L_{h_{gr=0,7}}=134,0\text{m}$ em relação ao ponto pivô.

Na Tabela 1, são apresentados os desvios relativos entre os valores de perda de carga obtidos no EPANET e através do método analítico proposto por Tabuada (2011).

Tabela 1. Valores de perda de carga obtidos no EPANET e pelo método analítico para diferentes valores de gr.

gr	hf Tabuada (2011) Eq. 2 (m)	hf EPANET (m)	DR (%)
0	0,43641	0,43200	-1,011
0,3	0,99858	0,99560	-0,298
0,5	2,10283	2,10240	-0,020
0,7	6,13833	6,14690	0,140

Na Tabela 1, é possível observar que os valores de perda de carga obtidos nas simulações hidráulicas no EPANET são muito próximos aos obtidos através do método analítico proposto por Tabuada (2011), apresentando desvio relativo máximo de aproximadamente 1% para $gr=0$. Desta forma, os resultados apresentados demonstram que o EPANET é uma excelente ferramenta para simulação

hidráulica de sistemas de irrigação do tipo pivô central com a presença de canhão final.

Para analisar a qualidade da simulação hidráulica do EPANET para linhas laterais de pivô central com a presença de canhão final, na Tabela 2 são apresentados valores da fração da perda de carga para diferentes pontos ao longo da linha lateral (0,28Lt, 0,5Lt, 0,6Lt, 0,8Lt e 0,9Lt).

Tabela 2. Valores da fração da perda de carga obtidos no EPANET e pelo método analítico para diferentes valores de gr e x/Lt .

		hf_x / hf_{x=Lt}				
x / Lt		0.28	0.5	0.6	0.8	0.9
$gr=0$	EPANET	0,489	0,782	0,875	0,980	0,997
	Eq. 3	0,487	0,780	0,874	0,980	0,997
	DR (%)	-0,551	-0,249	-0,146	-0,066	-0,030
$gr=0,3$	EPANET	0,419	0,693	0,792	0,934	0,976
	Eq. 3	0,418	0,693	0,792	0,934	0,976
	DR (%)	-0,266	-0,087	-0,042	-0,045	-0,048
$gr=0,5$	EPANET	0,374	0,632	0,733	0,895	0,955
	Eq. 3	0,374	0,632	0,733	0,895	0,955
	DR (%)	-0,130	-0,010	0,021	-0,008	-0,028
$gr=0,7$	EPANET	0,333	0,575	0,676	0,856	0,933
	Eq. 3	0,333	0,576	0,677	0,856	0,933
	DR (%)	-0,029	0,039	0,047	0,013	-0,008

Na Tabela 2, é possível observar que, para $gr=0$, 98% da perda de carga ocorrem em 80% da linha lateral, conforme afirmado por Allen et. al. (2011). Conforme aumento do valor de gr , as porcentagens de perda de carga tendem a diminuir para um mesmo ponto na linha lateral, pois há um deslocamento da curva, conforme

apresentado na Figura 3. Além disso, na Tabela 2, a comparação entre resultados do EPANET e do método analítico proposto por Tabuada (2011) apresentam um desvio relativo máximo de 0,55%, comprovando a qualidade das simulações hidráulicas do EPANET.

Os resultados apresentados demonstram que a presença do canhão final na linha lateral de um pivô central influencia consideravelmente na

6 CONCLUSÃO

distribuição de vazão e pressão. Desta forma, especialmente nas aplicações que exigem o uso intermitente do canhão final, é preciso adotar estratégias para otimizar a uniformidade de aplicação de água e o uso de energia.

Os resultados obtidos como modelo analítico mostram-se compatíveis com os resultados obtidos com o processo numérico do EPANET, que exige uma descrição bastante detalhada das características da linha lateral.

Demonstrando-se que o EPANET é uma ferramenta bastante útil para a análise de modelos analíticos.

7 AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa de estudos PDSE processo nº 88881.190146/2018-01. Ao CNPq e FAPEMIG pelas bolsas concedidas.

8 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA); EMBRAPA. Levantamento Da Agricultura Irrigada Por Pivôs Centrais No Brasil (1985-2017). **Agência Nacional de Águas Embrapa Milho e Sorgo**, [s. l.], p. 47, 2019.
- ALLEN, R. G.; KELLER, J.; MARTIN, D. **Irrigation association: center pivot design**. 2. ed. Saint Joseph: ASAE, 2011. 304 p.
- ALAZBA, A. A. Calculating F factor for center-pivots using simplified formula and modified Christiansen equation. **Journal of King Saud University - Science**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 85–99, 2005.
- ANWAR, Arif A. Correction Factors for Center Pivots with End Guns. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 126, n. 2, p. 113–118, 2000.
- BAPTISTA, V. B. S.; CÓRCOLES, J. I.; COLOMBO, A.; MORENO, M. A. Feasibility of the Use of Variable Speed Drives in Center Pivot Systems Installed in Plots with Variable Topography. **Water**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 1–19, 2019.
- BERNUTH, R. D. Von. Nozzling Considerations for Center Pivots with End Guns. **Transactions of the ASAE**, [s. l.], p. 419–422, 1983.
- CHANDRUPATLA, R. T.; OSLER, J. T. The perimeter of an ellipse. **Math Scientist**, Oxford, v. 35, p. 122-131, 2010.
- COLOMBO, A. Pivô Central. In: MIRANDA, J. H. de; PIRES, R. C. de M. (Org.). **Irrigação: volume 2**. Piracicaba: Funep, 2003. p. 209-258.
- FRIZZONE, J.A., REZENDE, R., CAMARGO, A.P., COLOMBO, A. **Irrigação por aspersão: sistema pivô central**, 1a. ed. Editora UEM, Maringá, 2018.
- ROSSMAN, L. A. EPANET 2: User Manual. **Cincinnati US Environmental Protection Agency National Risk Management Research Laboratory**, n. September, p. 104, 2000.

- SADEGHI, S. H., AND PETERS, T. (2013). "Adjusted friction correction factors for center-pivots with an end-gun." **Irrigation Science**, 31(3), 351–358.
- SCALOPPI, E. J.; ALLEN, R. G. Hydraulics of Center Pivot Laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 119, n. 3, p. 554–567, 1993.
- SOLOMON, K., AND KODOMA, M. (1978). "Center pivot end sprinkler pattern analysis and selection." **Trans. Amer. Soc. Agric. Engrs.**, 21(4), 706-712.
- TABUADA, M. A. Hydraulics of center-pivot laterals: a complete analysis of friction head loss. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Elmsford, v. 137, n. 8, p. 513- 523, Aug. 2011.
- TABUADA, Manuel A. Friction Head Loss in Center-Pivot Laterals with the Lateral Divided into Several Reaches. **Irrigation & Drainage Systems Engineering**, [s. l.], v. 2, n. 1, 2014.
- VALIANTZAS, John D.; DERCAS, Nicholas. Hydraulic Analysis of Multidiameter Center-Pivot Sprinkler Laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 131, n. 2, p. 137–146, 2005.