

MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO ECONÔMICO DE TUBULAÇÕES DE RECALQUE

BRUNA DALCIN PIMENTA¹; ADROALDO DIAS ROBAINA¹; MARCIA XAVIER PEITER¹; JHOSEFE BRUNING¹; MIGUEL CHAIBEN NETO¹ E YESICA RAMIREZ FLORES¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria/RS, Av. Roraima, nº 1000, Bairro Camobi, Santa Maria/RS, Brasil, CEP 97105-900, brunadpimenta@gmail.com, diasrobaina@gmail.com, mpeiter@gmail.com, jhosefe.b@gmail.com, miguelchaiben@gmail.com, yeyiramiflo@gmail.com.

1 RESUMO

O conhecimento do diâmetro econômico de tubulações é de grande importância em dimensionamentos de sistemas de recalque, pois, assim, é possível otimizar os custos de sistemas de irrigação. O objetivo deste trabalho foi propor um modelo matemático para o cálculo do diâmetro econômico de tubulações de recalque utilizadas em sistemas de bombeamento de água para irrigação. Na modelagem matemática do cálculo do diâmetro econômico foi utilizada, para mensurar a perda de carga, a equação de Hazen-Williams, levando em consideração o custo das tubulações, o custo do conjunto motobomba, o custo da energia consumida e o fator de recuperação do capital. Nas simulações foram utilizadas vazões de 25 a 500 l s⁻¹, em intervalos de 25 l s⁻¹, fator de recuperação do capital de 10, 15 e 20%, e preço da energia consumida de US\$0,09, US\$0,10 e US\$0,11 kWh⁻¹, para tubos de aço com espessura de 2,00mm, 2,65mm e 3,00mm. Para validação do modelo proposto, por meio da comparação com um modelo que utiliza a formulação de Darcy-Weisbach, foram utilizadas a raiz média do desvio quadrático, a raiz média do desvio quadrático normalizado, a eficiência do modelo e o índice geral de desempenho do modelo. Os resultados indicam que o modelo proposto apresenta índice geral de desempenho próximos a 1,00 em todos os cenários, podendo, dessa forma, ser utilizado com precisão para determinação do diâmetro econômico de tubulações de recalque sem necessidade do uso de equações que necessitam de processos iterativos para sua solução.

Palavras-chave: modelagem, irrigação, consumo de energia, Hazen-Williams.

PIMENTA, B. D.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; BRUNING, J.; CHAIBEN NETO, M. E FLORES, Y. R.
MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE ECONOMIC DIAMETER OF PRESSURIZED PIPES

2 ABSTRACT

The knowledge of the economic diameter of pipelines is of great importance in the design of water pumping systems because it makes possible to optimize costs of irrigation systems. The objective of this work was to propose a mathematical model for the calculation of the economic diameter of pressurized pipes used in water pumping systems for irrigation. In the economic

diameter calculation mathematical modeling Hazen-Williams equation was used to measure loss of load, taking into account the pipes' cost, the cost of the motor pump, the cost of the energy consumed and the recovery factor of the capital. In the simulations, flow rates of 25 to 500 l s⁻¹ were used, in intervals of 25 l s⁻¹, capital recovery factor of 10, 15 and 20%, and energy price of US\$0.09, US\$0.10 and US\$0.11 kWh⁻¹, for steel pipes with thickness of 2.00mm, 2.65mm and 3.00mm. For validation of the proposed model, through comparison with a model using Darcy-Weisbach formulation, the mean root of the quadratic deviation, the mean root of the normalized quadratic deviation, the model efficiency and the overall performance index of the model were used. The results indicate that the proposed model presents a general index of performance close to 1.00 in all scenarios and can therefore be used with precision to determine the economic diameter of pressurized pipes without the use of equations that require processes solutions.

Keywords: modeling, irrigation, energy consumption, Hazen-Williams.

3 INTRODUÇÃO

Várias estudos (FERNANDES et al., 2014; CALDAS; CARVALHO; REZENDE, 2016; ALVES et al., 2017; CHAMBA; ZUBELZU; JUANA, 2019) vem sendo realizados com o propósito de maximizar a eficiência de projetos de irrigação, principalmente quando relacionados à parte hidráulica do sistema (ZOCOLER et al., 2011), no aprimoramento do manejo de irrigação e nas relações de custo dos sistemas (SONOWAL; SENAPATI; ADAMALA, 2016). Perroni et al. (2015) ressaltam que no uso da irrigação como acréscimo tecnológico é de suma importância a utilização dos recursos hídricos e energéticos disponíveis de forma racional, para a própria sustentabilidade da agricultura irrigada.

Alazba et al. (2012) e Sonowal, Senapati e Adamala (2016) destacam que a equação empírica de Hazen-Williams (1903) (HW) é a mais empregada na determinação do diâmetro de tubulações de recalque utilizado em sistemas de bombeamento e, conseqüentemente, no cálculo da perda de carga do sistema. De acordo com os autores, este fato pode ser atribuído à simplicidade na utilização da formulação de HW quando comparada com

o equacionamento teórico de Darcy-Weisbach (DW).

De acordo com Brkić (2016) e Brkić e Čojbašić (2017), a formulação teórica de DW é implícita para a determinação do coeficiente de atrito, necessitando, segundo Pimenta et al. (2018), a utilização de processos iterativos ou o diagrama de Moody para sua solução.

Diversas pesquisas (VALIANTZAS; DERCAS; KARANTOUNIAS, 2007; CALEJO et al., 2008; VALIANTZAS, 2008; PEDRAS et al., 2009; AKINTOLA; GIWA, 2009; CABRERA; GÓMEZ; SORIANO, 2018) foram realizadas no sentido de determinar o diâmetro econômico para tubulações em sistemas pressurizados, contudo, a maioria dos estudos supracitados foram realizados utilizando a formulação empírica de DW, o que torna mais complexo e demorado a estimativa do coeficiente de atrito. Além disso, muitas fórmulas não levam em consideração o fator de recuperação do capital investido na aquisição da tubulação e na motobomba.

Devido a isso, o objetivo desse trabalho foi determinar um modelo matemático para o cálculo do diâmetro econômico de tubulações de recalque utilizadas em sistemas de bombeamento de água para irrigação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do presente trabalho foi realizado utilizando planilhas eletrônicas no Ms Excel® para simulação de diferentes cenários, variando a vazão de 25 a 500 l s⁻¹, em intervalos de 25 l s⁻¹. Foram utilizados tubos de aço soldado com espessuras de 2,00mm, 2,65mm e 3,00mm. O peso dos tubos foi obtido junto às empresas fabricantes da região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Os preços dos tubos de aço soldado e dos

conjuntos motobombas elétricos foram obtidos em diversos estabelecimentos comerciais de diversas regiões do Brasil, sendo considerados para o ano de 2018. O dólar comercial nesse período foi comercializado a R\$3,85.

Na Tabela 1 está apresentado os preços de conjuntos motobomba e preços por unidade de potência, considerando acionamento com motores elétricos. Os valores utilizados nesse estudo são referentes a cotação do dólar no período.

Tabela 1. Preços de conjuntos motobomba (US\$) de acordo com a potência (cv)

Potência (cv)	Conjunto Motobomba (US\$)
15	1425,71
20	1828,37
25	2189,00
30	2831,15
40	4924,32
50	5751,83
100	15174,20
125	21375,82
200	33807,77
250	36722,34
300	38660,26

A metodologia utilizada para a determinação do diâmetro econômico da tubulação de recalque foi proposta por Robaina, Calgaro e Peiter (2004), e se

baseia na otimização do custo total anual (CT) do sistema de bombeamento, conforme expresso na Eq. 1.

$$C_T = C_{tr} + C_{Mb} + C_{Op} \quad (1)$$

Em que: C_T - custo total anual; C_{tr} - custo anual da tubulação de recalque (amortização e juros); C_{Mb} - custo anual do conjunto motobomba (amortização e juros); C_{Op} - custo anual de operação do sistema (consumo de energia).

Derivando a Eq. 1 em relação ao diâmetro, obtém-se:

$$\frac{\partial C_T}{\partial D} = \frac{\partial C_{tr}}{\partial D} + \frac{\partial C_{Mb}}{\partial D} + \frac{\partial C_{Op}}{\partial D} \quad (2)$$

Estabelecendo-se a condição de custo total mínimo do sistema, que é $\frac{\partial C_T}{\partial D} = 0$ sujeita à condição $\frac{\partial^2 C_T}{\partial D^2} > 0$.

Sendo o peso dos tubos estimados por:

$$P_{Tr} = \gamma_m \cdot \pi \cdot D \cdot e \cdot L \quad (3)$$

O custo anual da tubulação de recalque pode ser expresso por:

$$C_{Tr} = W_1 \cdot \gamma_m \cdot \pi \cdot D \cdot e \cdot L \cdot FRC \quad (4)$$

Em que: W_1 - preço da tubulação por unidade de peso e por metro de tudo (R\$ kgf⁻¹ m⁻¹); γ_m - peso específico do material da tubulação (kgf m⁻³); D - diâmetro do tubo (m); e - espessura do tubo (m); L - comprimento total da tubulação (m); FRC - fator de recuperação do capital empregado na aquisição da tubulação.

O custo anual do conjunto motobomba pode ser expresso por:

$$C_{Mb} = W_2 \cdot 0,736 \cdot FRC \cdot P \quad (5)$$

Em que: W_2 - preço do conjunto motobomba por unidade de potência (R\$ cv⁻¹); P - potência do conjunto motobomba (cv) e 0,736 é o fator de conversão de cv para kW.

O custo anual de operação (energia consumida) do sistema de bombeamento pode ser expresso por:

$$C_{Op} = W_3 \cdot 0,736 \cdot Nh \cdot P \quad (6)$$

Em que: W_3 - preço por unidade de energia consumida (R\$ kWh⁻¹), considerando-se acionamento por motor elétrico; Nh - número de horas de operação por ano.

De acordo com Sonowal, Senapati e Adamala (2016) e Skar e Gooda (2018), o custo operacional depende de vários fatores, como a perda de carga devido ao atrito, horas de operação da bomba em um ano, custo de eletricidade por kWh⁻¹ e eficiência da unidade de energia.

Utilizando a equação de Hazen-Williams, expressa por $hf = \frac{10,643}{C^{1,85}} \cdot \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} \cdot L$, e a potência de um sistema de bombeamento identificada como:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{75 \cdot \eta} \quad (7)$$

E sendo $H_m = H_g + hf$, tem-se:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot \left[Hg + \left(\frac{10,643 \cdot Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \cdot L \right) \right]}{75 \cdot \eta} \quad (8)$$

Em que: γ - peso específico do líquido bombeado (kgf m^{-3}); Q - vazão do sistema ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); H_m - altura manométrica do sistema (m); H_g - altura geométrica do sistema (m); η - rendimento do conjunto motobomba (decimal); C - coeficiente de Hazen-Williams (adimensional).

Derivando-se as Eqs. 4, 5 e 6 tem-se, respectivamente:

$$\frac{\partial C_{Tr}}{\partial D} = W_1 \cdot \gamma_m \cdot \pi \cdot e \cdot L \cdot FRC \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_{Mb}}{\partial D} = W_2 \cdot 0,736 \cdot FRC \cdot \frac{\partial P}{\partial D} \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_{Op}}{\partial D} = W_3 \cdot 0,736 \cdot Nh \cdot \frac{\partial P}{\partial D} \quad (11)$$

Derivando-se a Eq. 8, tem-se:

$$\frac{\partial P}{\partial D} = \frac{-51,82 \cdot \gamma \cdot L \cdot Q^{2,85}}{75 \cdot Rg \cdot C^{1,85} \cdot D^{5,87}} \quad (12)$$

E, sendo $J = \frac{10,643}{C^{1,85}} \cdot \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}}$, obtém-se:

$$\frac{\partial P}{\partial D} = \frac{-4,87 \cdot \gamma \cdot J \cdot Q \cdot L}{75 \cdot Rg \cdot D} \quad (13)$$

Na sequência, foi substituído o valor de $\frac{\partial P}{\partial D}$ da Eq. 13 nas Eqs. 10 e 11 e, também foram substituídas as Eqs. 9, 10 e 11 na Eq.

2, obtendo, assim, a perda de carga unitária J (m m^{-1}):

$$J = \frac{15,4 \cdot Rg \cdot W_1 \cdot \gamma_m \cdot \pi \cdot e \cdot FRC}{0,736 \cdot \gamma \cdot (W_2 \cdot FRC + W_3 + Nh)} \cdot \frac{D}{Q} \quad (14)$$

Isolando-se o diâmetro e substituindo a perda de carga unitária na Eq. 14, obtém-se:

$$D = \frac{10,643 \cdot Q^{2,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87} \cdot \left[\frac{15,4 \cdot Rg \cdot W_1 \cdot \gamma_m \cdot \pi \cdot e \cdot FRC}{0,736 \cdot \gamma \cdot (W_2 \cdot FRC + W_3 + Nh)} \right]} \quad (15)$$

Após simplificações algébricas, o valor do diâmetro econômico de uma

tubulação de recalque em sistemas de bombeamento de água pode ser obtido por:

$$D^{5,87} = \frac{0,1619 \cdot \gamma \cdot Q^{2,85} \cdot (W_2 \cdot FRC + W_3 \cdot Nh)}{Rg \cdot C^{1,85} \cdot W_1 \cdot \gamma_m \cdot e \cdot FRC} \quad (16)$$

A fim de comparar com o modelo proposto por Robaina, Calgaro e Peiter (2004), Eq. 17, que utiliza a formulação de Darcy-Weisbach para determinar a perda de carga nas tubulações de recalque, foram utilizados parâmetros estatísticos como a

$$D_{i+1} = \frac{0,5238.Q^{0,5}}{\left[W_4 \cdot \log^2 \left(\frac{0,27 \cdot \varepsilon}{D_i} + \frac{0,57 \cdot v \cdot Q^{0,5} / W_4^{0,5}}{D_i^2} \right) \right]^{1/6}} \quad (17)$$

$$\text{Em que } W_4 = \frac{15 \cdot R_g \cdot W_1 \cdot \gamma_m \cdot \pi \cdot e \cdot \text{FRC}}{0,736 \cdot \gamma \cdot (W_2 \cdot \text{FRC} + W_3 \cdot \text{Nh})}$$

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{o,i} - x_{c,i})^2}{n}} \quad (18)$$

$$\text{NRMSD} = \frac{\text{RMSD}}{x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}} \quad (19)$$

$$\text{ME} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{o,i} - x_{c,i})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{o,i} - \bar{x}_o)^2} \quad (20)$$

$$\text{OI} = \frac{1}{2} (1 - \text{NRMSD} + \text{ME}) \quad (21)$$

Em que: ε - rugosidade absoluta do tubo (mm); v - viscosidade cinemática do fluido ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); $x_{o,i}$ - valor observado; $x_{c,i}$ - valor calculado; n - número de observações; $x_{\text{máx}}$ - valor máximo observado; $x_{\text{mín}}$ - valor mínimo observado; \bar{x}_o - valores médios observados.

A RMSD tem a vantagem de expressar o erro nas mesmas unidades que a variável, fornecendo assim mais informações sobre a eficiência do modelo (LEGATES; MCCABE, 1999). Além disso, tem sido utilizado por diversos autores para comparar os parâmetros previstos e medidos (ARBAT et al., 2008). Quanto menor os valores da RMSD ou NRMSD, mais precisa é a simulação.

De acordo com Alazba et al. (2012), quanto mais próximo de 1 (um) o valor da ME mais perfeito é o ajuste entre dados medidos e previstos, podendo esse valor pode ser negativo. O OI combina os indicadores NRMSD e ME para verificar o desempenho de modelos matemáticos, e, quando o valor é 1 (um), o ajuste é excelente entre os parâmetros avaliados.

raiz média do desvio quadrático (RMSD), Eq. 18, raiz média do desvio quadrático normalizado (NRMSD), Eq. 19, eficiência do modelo (ME), Eq. 20, e índice geral de desempenho do modelo (OI), Eq. 21.

Para o cálculo do diâmetro econômico da tubulação de recalque, tanto para a Eq. 16 como a Eq. 17, foram utilizados os valores de: $W_1 = \text{US\$}1,31$, $W_2 = \text{US\$}124,91$, $\text{Nh} = 2000\text{h}$, $v = 0,000001 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $\gamma_m = 8400 \text{ kgf m}^{-3}$, $\eta = 0,70$, $\varepsilon = 0,25\text{mm}$ e $C = 130$. Foram simulados, para cada espessura de tubo de aço analisada, valores do diâmetro econômico variando o FRC em 10, 15 e 20% (utilizando W_3 fixo de $0,10\text{US\$ kWh}^{-1}$), e o W_3 em 0,09, 0,10 e $0,11\text{US\$ kWh}^{-1}$ (utilizando FRC fixo de 15%), tendo, assim, diferentes cenários para análise.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados, na Tabela 2, o peso dos tubos de aço, em três espessuras de

parede (2,00, 2,65 e 3,00mm), e os preços por peso de tubo, assim como, a comparação entre os pesos estimados pela Eq. 3 e os fornecidos pelo fabricante.

Tabela 2. Pesos fornecidos pelo fabricante e estimados dos tubos de aço nas espessuras de 2,00, 2,65 e 3,00mm e preços praticados por unidade de peso dos tubos para as três espessuras respectivamente (US\$ kgf⁻¹)

e (mm)	Peso tubos de aço (kgf m ⁻¹)						Preço (US\$ kgf ⁻¹)		
	2,00		2,65		3,00		2,00	2,65	3,00
D (mm)	F	E	F	E	F	E	F	F	F
150	9,04	7,92	11,98	10,49	nd	nd	1,89	1,64	nd
200	12,06	10,56	15,98	13,99	18,09	15,83	1,64	1,45	1,39
250	15,07	13,19	19,97	17,48	22,61	19,79	1,49	1,34	1,29
300	18,09	15,83	23,96	20,98	27,13	23,75	1,39	1,26	1,22
320	19,29	16,89	25,56	22,38	28,94	25,33	1,35	1,24	1,20
350	21,10	18,47	27,96	24,48	31,65	27,71	1,31	1,21	1,17
380	22,91	20,06	30,36	26,57	34,36	30,08	1,28	1,18	1,15
400	24,12	21,11	31,95	27,97	36,17	31,67	1,26	1,17	1,13
450	27,13	23,75	35,95	31,47	40,69	35,63	1,22	1,14	1,11
480	28,94	25,33	38,34	33,57	43,41	38,00	1,20	1,12	1,09
500	30,14	26,39	39,94	34,97	45,22	39,58	1,27	1,11	1,08
550	33,16	29,03	43,93	38,46	49,74	43,54	1,16	1,09	1,07
600	36,17	31,67	47,93	41,96	54,26	47,50	1,13	1,07	1,05
Média							1,35	1,23	1,16

F=Fabricante; E=Estimado; nd=não disponível.

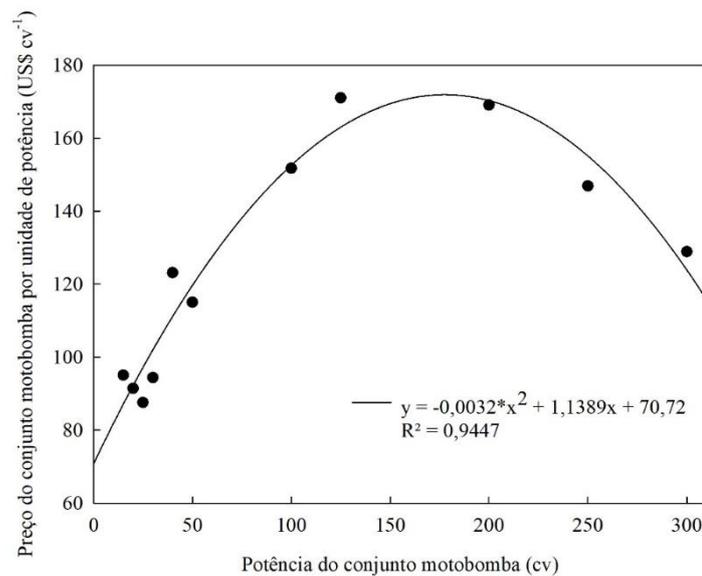
Os valores mostrados na Tabela 2 permitem observar que a função utilizada para estimar os pesos dos tubos quando comparada aos valores fornecidos pelos fabricantes apresenta, utilizando-se a Eq. 18, RMSD de 3,01, 3,99 e 4,49%, para as espessuras de 2,00, 2,65 e 3,00mm, respectivamente. De acordo com Arbat et al. (2008), quanto menor os valores de RMSD mais precisa é a simulação.

Adotando-se como preço médio o valor de US\$ 1,25, obtido pela média dos valores das três espessuras consideradas (US\$1,35 para e = 2,00mm, US\$1,23 para e = 2,65mm e US\$1,16 para e = 3,00mm) e considerando um acréscimo de 5% atribuído ao IPI, de acordo com Tabela de Imposto sobre os Produtos Industrializados, para o ano de 2018, pode-se estimar um valor de US\$1,31 para o preço por unidade

de peso dos tubos de aço (W_1). Essa variável é importante ser analisada pois ela influi diretamente no custo anual da tubulação de recalque.

Nota-se que a metodologia proposta nesse estudo pode ser adaptada para qualquer tipo de tubulação, bastando, apenas, determinar o valor comercial dos diferentes tipos de tubos.

Na Figura 1, pode-se observar a variação de preços dos conjuntos motobombas elétricos por unidade de potência, sendo utilizados onze diferentes conjuntos motobombas, variando de 15 a 300cv, com preço médio por unidade de potência (W_2) de US\$124,91. Nesse estudo, não foram considerados o preço dos equipamentos de manobra e proteção.

Figura 1. Variação de preços dos conjuntos motobombas elétricos por unidade de potência

* Significativo a 0,05 pelo teste F.

Observa-se, na Figura 1, que até 176cv de potência, aproximadamente, o preço do conjunto motobomba por unidade de potência aumenta. Depois disso os valores decrescem, diminuindo o custo de aquisição dos equipamentos.

A equação da regressão, fornecida através da Figura 1, pode ser utilizada para outras situações em que, sabendo o valor da potência desejada, pode-se determinar o preço de diversos conjuntos motobombas elétricos.

Foram analisados, para cada espessura de tubo de aço, valores do diâmetro econômico variando o FRC e W_3 , e, após, utilizadas as Eqs. 18, 19, 20 e 21 a fim de comparar os valores de diâmetro econômico através do modelo proposto (Eq. 16) e dos valores encontrados pelo modelo da Eq. 17, os quais estão representados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores dos parâmetros estatísticos raiz média do desvio quadrático (RMSD), raiz média do desvio quadrático normalizado (NRMSD), eficiência do modelo (ME) e índice geral de desempenho do modelo (OI) estipulados através da comparação dos valores de diâmetro econômico encontrados pelo modelo proposto e o de Robaina, Calgaro e Peiter (2004)

Parâmetros Estatísticos	FRC%			W ₃ (US\$ kWh ⁻¹)		
	10	15	20	0,09	0,10	0,11
e = 2,00mm						
RMSD	0,0037	0,0035	0,0016	0,0035	0,0035	0,0017
NRMSD	0,0057	0,0059	0,0028	0,0059	0,0059	0,0027
ME	0,9996	0,9996	0,9999	0,9996	0,9996	0,9999
OI	0,9970	0,9969	0,9985	0,9969	0,9969	0,9986
e = 2,65mm						
RMSD	0,0027	0,0025	0,0013	0,0025	0,0025	0,0014
NRMSD	0,0043	0,0044	0,0023	0,0044	0,0044	0,0023
ME	0,9998	0,9998	0,9999	0,9998	0,9998	0,9999
OI	0,9977	0,9977	0,9988	0,9977	0,9977	0,9988
e = 3,00mm						
RMSD	0,0023	0,0021	0,0013	0,0021	0,0021	0,0014
NRMSD	0,0037	0,0038	0,0024	0,0038	0,0038	0,0025
ME	0,9998	0,9998	0,9999	0,9998	0,9998	0,9999
OI	0,9980	0,9980	0,9987	0,9980	0,9980	0,9987

Na Tabela 3 pode-se observar a influência do FRC na determinação do diâmetro de uma tubulação de recalque e da energia consumida para um mesmo FRC, mostrando que os valores dos parâmetros estatísticos variam de acordo com cada simulação, com exceção do ME que se mantém praticamente constante em todos os cenários.

Sakr e Gooda (2018), trabalhando com tubos de ferro dúctil e de polietileno, em três diferentes regiões do mundo, constataram que o FRC é um dos fatores que mais influenciam na velocidade econômica dessas tubulações. Semelhante a esse estudo, Sonowal, Senapati e Adamala (2016), trabalhando com seis diferentes materiais de tubulações, e Perroni, Carvalho e Faria (2011), analisando tubos de aço galvanizado e de PVC, ambos afirmam que o FRC e o custo da energia consumida influenciam na escolha do diâmetro econômico das mesmas.

Ainda na Tabela 3, nota-se que, o modelo proposto na Eq. 16, apresenta elevados valores ME em todas as simulações, o que, segundo Alazba et al. (2012) demonstra um ajuste perfeito entre os dados medidos e previstos. Os valores de OI (todos próximos de 1,00) em todas as simulações, apresentaram ajuste excelente entre os parâmetros avaliados, podendo, dessa forma, ser utilizado o modelo proposto nesse estudo com precisão para determinação do diâmetro econômico de tubulações de recalque sem a necessidade do uso de equações extensas e com processos iterativos.

6 CONCLUSÕES

O modelo matemático proposto permite obter, de maneira simples e rápida, o diâmetro econômico da tubulação de

recalque em sistema de bombeamento de água para irrigação, com a vantagem de não necessitar de processos iterativos para sua solução.

7 REFERÊNCIAS

- ALVES, É. S.; SAAD, J. C. C.; SCHIMIDT, A. P. R. A.; ARAÚJO, L. M.; GOMES, M. D. A.; SANTOS, J. É. O. Caracterização de sistema de irrigação por aspersão convencional dimensionado com vazão econômica e prática e diferentes configurações hidráulicas. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 8, p. 2172-2182, 2017. DOI: <https://doi.org/10.7127/rbai.v11n800706>
- AKINTOLA, T. A.; GIWA, S. O. Optimum pipe size selection for turbulent flow. **Leonardo Journal of Sciences**, Cluj-Napoca, v. 14, p. 112-123, 2009.
- ALAZBA, A. A.; MATTAR, M. A.; ELNESR, M. N.; AMIN, M. T. Field assessment of friction head loss and friction correction factor equations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 138, p. 166-176, 2012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000387](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000387).
- ARBAT, G.; PUIG-BARGUES, J.; BARRAGEN, J.; BONANY, J.; CARTAGENA, F. R. Monitoring soil water status for micro-irrigation management versus modelling approach. **Biosystems Engineering**, Amsterdã, v. 100, n. 2, p. 286-296, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.008>.
- BRKIĆ, D. A note on explicit approximations to Colebrook's friction factor in rough pipes under highly turbulent cases. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Amsterdã, v. 93, p. 513-515, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.109>.
- BRKIĆ, D.; ČOJBAŠIĆ, Ž. Evolutionary optimization of Colebrook's turbulent flow friction approximations. **Fluids**, Switzerland, v. 2, p. 1-27, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids2020015>.
- CABRERA, E.; GÓMEZ, E.; SORIANO, J. Calculating the economic level of friction in pressurized water systems. **Water**, Switzerland, v. 10, n. 6, p. 763, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10060763>.
- CALDAS, A. L. D.; CARVALHO, J. A.; REZENDE, F. C. Determinação da velocidade econômica em adutoras sob diferentes condições de custo e funcionamento. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, n. 6, p. 503-516, 2016. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v23i6.594>.
- CALEJO, M. J.; LAMADDALENA, N.; TEIXEIRA, J. L.; PEREIRA, L. S. Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on-demand using flow driven simulation

models. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v. 95, n. 2, p. 154-162, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.09.011>.

CHAMBA, D.; ZUBELZU, S.; JUANA, L. Energy, cost and uniformity in the design of drip irrigation systems. **Biosystems Engineering**, Amsterdã, v. 178, p. 200-218, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.012>.

FERNANDES, C. N. V.; DE AZEVEDO, B. M.; NASCIMENTO NETO, J. R. do; VIANA, T. V. A.; CAMPÊLO, A. R. Desempenho produtivo e econômico da cultura da melancia submetida a diferentes turnos de rega. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 1, p. 149-159, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2014v19n1p149>.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>.

PEDRAS, C. M. G.; PEREIRA, L. S.; GONÇALVES, J. M. MIRRIG: a decision support system for design and evaluation of microirrigation systems. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v. 96, n. 4, p. 691-701, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.10.006>.

PERRONI, B. L. T.; CARVALHO, J. A.; FARIA, L. C. Velocidade econômica de escoamento e custos de energia de bombeamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 487-496, 2011.

PERRONI, B. L. T.; FARIA, L. C.; CARVALHO, J. D. A.; OLIVEIRA, H. F. E. Influência do custo de energia elétrica e do material da tubulação na velocidade econômica de bombeamentos. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 1, p. 13-20, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000300009>.

PIMENTA, B. D.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X., MEZZOMO, W.; KIRCHNER, J. H.; BEN, L. H. B. Performance of explicit approximations of the coefficient of head loss for pressurized conduits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 5, p. 301-307, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p301-307>.

ROBAINA, A. D.; CALGARO, M.; PEITER, M. X. Methodology for determination of the economic diameter tube in impulsion line system. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 4, p. 1065-1068, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000400015>.

SONOWAL, A.; SENAPATI, S. C.; ADAMALA, S. A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems. **African Journal of Agricultural Research**, Sapele, v. 11, n. 8, p. 683-692, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10648>.

SAKR, M. R.; GOODA, E. A. Economical velocity through pipeline networks “Case Studies of Several Different Markets”. **Alexandria Engineering Journal**, Amsterdã, v. 57, n. 4, p. 2999-3007, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.05.001>.

VALIANTZAS, J. D. Explicit power formula for the Darcy–Weisbach pipe flow equation: application in optimal pipeline design. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 134, n. 4, p. 454-461, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:4\(454\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:4(454)).

VALIANTZAS, J. D.; DERCAS, N.; KARANTOUNIAS, G. Explicit optimum design of a simple irrigation delivery system. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 50, n. 2, p. 429-438, 2007. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.22634>.

WILLIAMS, G. S. A the Hazen-Williams Hydraulic Slide Rule. **Engineering Record**, New York, v. 47, n. 13, 1903.

ZOCOLER, J. L.; HERNANDEZ, F. B. T.; SAAD, J. C. C.; CRUZ, R. L. Período de recuperação do investimento em bomba hidráulica de melhor rendimento em sistemas de bombeamento na tarifa horossazonal verde. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, p. 290-302, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000200009>.