

Estimação de Rugosidade em Sistemas de Abastecimento de Água Utilizando Gêmeo Digital

Anne L. M. B. Oliveira*, Heber P. Gomes**, Juan M. M. Villanueva***, Robson P. G. Lima*, Thommas K. S. Flores***

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, (e-mail: annelf14@gmail.com, robsonpacifico@gmail.com)*

***Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, (e-mail: heberp@uol.com.br)*

****Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, (e-mail: jmauricio@cear.ufpb.br, thommas.flores@cear.ufpb.br)*

Abstract: The roughness in water supply pipes is an important parameter in hydraulic sizing and over time due to friction with the fluid passing through its interior ends up changing significantly. Hydraulic dimensioning requires the designer to know the pressure drop of the pipeline, which depends on the roughness. Incorrect load loss estimates can occur due to the inaccuracy of the roughness value. The calibration and modeling of water supply systems is usually a laborious process, which often uses trial and error methods, however, there are currently optimization programs, software that facilitate this work. The present article consists of the creation of a digital twin applied to a pilot water supply system to estimate pipe roughness. The digital twin was modeled from the characteristics of the electric motor, pump and frequency inverter, valve and connecting hydraulic components. To achieve the objective of this work, twenty-four possible scenarios were performed with speed and pressure control of the system. The results obtained show the maximum tracking error of 5%, demonstrating the effectiveness of the methodology and its applicability in larger scenarios.

Keywords: roughness, digital twin, reflective algorithm, water supply systems, estimation.

Resumo: A rugosidade em tubos de abastecimento de água é um parâmetro importante no dimensionamento hidráulico e que com o passar do tempo devido ao atrito com o fluido escoando pelo seu interior acaba se alterando significativamente. O dimensionamento hidráulico requer que o projetista saiba qual a perda de carga da tubulação, a mesma depende da rugosidade. Estimativas de perda de cargas incorretas podem acontecer devido à imprecisão do valor de rugosidade. A calibração e modelagem de sistemas de abastecimento de água geralmente é um processo trabalhoso, que muitas vezes se utiliza de métodos de tentativa e erro, porém, existem atualmente programas de otimização, softwares que facilitam este trabalho. O presente artigo consiste na criação de um gêmeo digital aplicado a um sistema piloto de abastecimento de água para estimação da rugosidade em tubulação. O gêmeo digital foi modelado a partir das características do motor elétrico, da bomba e do inversor de frequência, válvula e componentes hidráulicos de conexão. Para alcançar o objetivo deste trabalho, foram realizados vinte e quatro cenários possíveis com controle de velocidade e pressão do sistema. Os resultados obtidos mostram o erro de rastreamento máximo de 5%, demonstrando a eficácia da metodologia e sua aplicabilidade em cenários de maiores dimensões.

Palavras-chaves: rugosidade, gêmeo digital, algoritmo reflexivo, sistemas de abastecimento de água, estimação.

1. INTRODUÇÃO

Um dos primeiros problemas encontrados pelos projetistas é a obtenção do valor de rugosidade absoluta da tubulação, pois, possui amplas faixas de valores na literatura, se alteram com o passar do tempo e não é oferecido pelos fabricantes com muita frequência. Um método de mensuração em campo

se utiliza do rugosímetro, um instrumento utilizado para medição da rugosidade. É um método de caráter invasivo onde, a mensuração em campo é dispendiosa em termos de tempo, esforço e também pelo impacto de interromper o abastecimento.

Guo. X et al. (2019) afirmam que muitos métodos têm sido propostos para estimar a rugosidade ou fricção da superfície,

que a pesquisa de (Colebrook, 1939); (Nikuradse, 1950); (Moody, 1944) e outros forneceram técnicas para incorporar pelo menos uma estimativa de primeira ordem dos efeitos da rugosidade.

Baseando em uma revisão da literatura, contextualizando para este tema, foram encontrados alguns métodos de calibração, tais como o (Lansey *et al* (2001); Kapelan *et al* (2007); Koppel *et al* (2009); Alvisi *et al* (2010)). Esses estudos obtiveram coeficientes de rugosidade utilizando algoritmos de otimização como: algoritmo genético, evolução diferencial e otimização de colônia de formigas. Ormsbee (1989) desenvolveu um algoritmo de otimização não linear para ajustar a rugosidade de uma tubulação, considerando o grau da fonte e a demanda nodal em condições de funcionamento em regime permanente ou dinâmico. O estudo mostrou que os valores de rugosidade são mais importantes quando uma rede é calibrada com alta perda de carga (Tiejun Gao, 2017). O algoritmo utilizado neste artigo não possui referências para aplicação em sistemas de abastecimento de água, foram encontrados artigos utilizando o algoritmo da região de confiança em aplicações de robótica, placas fotovoltaicas, resistência de materiais, biomedicina, controle.

A maioria das definições sobre gêmeo digital tende a concordar com o conceito de que é uma representação virtual de uma entidade física ou sistema. De acordo com Mykoniatis e Harris, (2021) o gêmeo é um modelo de simulação em tempo real de um sistema físico ou um sistema ciber-físico, ativo, produto, processo ou serviço conectado com dados em tempo quase real em um ciclo fechado de feedback.

Este artigo tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para estimação da rugosidade em tubulações de redes de abastecimento de água baseado em Gêmeos Digitais, por meio da aquisição de grandezas hidráulicas e elétricas, acompanhando a dinâmica do sistema proposto, que contribui para os projetistas com uma nova perspectiva na calibração de tubulações, utilizando uma técnica para estimação da rugosidade dispensando a utilização de instrumentos invasivos de medição.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados os experimentos na bancada experimental localizada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Conforme ilustrado através da Fig.1.



Fig. 1 Planta experimental LENHS.

2.1. Metodologia para Desenvolvimento do Gêmeo Digital

O sistema utilizando no artigo integra o gêmeo digital com Control-in-the-Loop (CIL), é possível testar e validar algoritmos de controle em um modelo virtual de alta fidelidade do sistema físico. O motor é controlado pelo inversor de frequência, para isso utiliza-se o modo de partida remota no qual é possível inserir valores de frequência desejados. A comunicação do gêmeo com o ativo real se dá através dos dados de entrada do sistema (Frequência, ângulo de válvulas, sensores de pressão e vazão), a modelagem matemática dos blocos faz-se necessária para estimação da rugosidade. Na fig. 2 está ilustrado o fluxograma para elaboração do gêmeo digital.

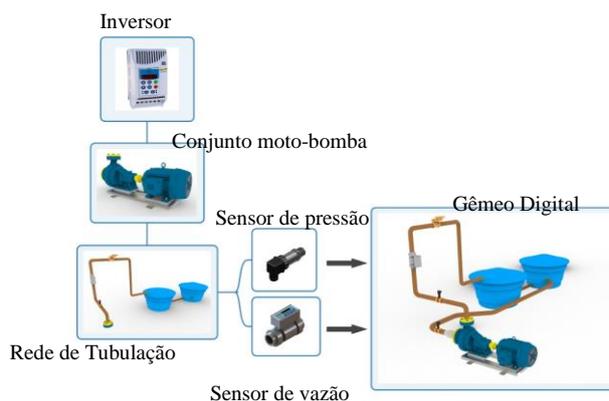


Fig. 2 Fluxograma de construção do gêmeo digital.

Serão apresentadas as principais equações de cada bloco utilizado e conceitos para construção do modelo. O processo de construção de cada modelo teve início com a lógica de controle do inversor. Diretamente ligado ao inversor, está o motor de indução trifásico. Para estimar os parâmetros do motor, será utilizado o circuito monofásico da máquina, representado pela Fig.3, em que esse modelo representará um dos ramos da máquina trifásica que possui um terço da potência dela. O circuito equivalente é composto pelos seguintes elementos: R_1 (resistência do estator); R_2 (resistência do rotor); X_1 (Reatância de dispersão do estator); L_2 (Reatância de dispersão do rotor); R_C (resistência que representa a perda do núcleo); X_m (Reatância de magnetização da máquina) e, por último, a potência eletromecânica por fase do estator que é igual à potência entregue à resistência representada por: $\frac{R_2(1-s)}{s}$, onde s é o escorregamento.

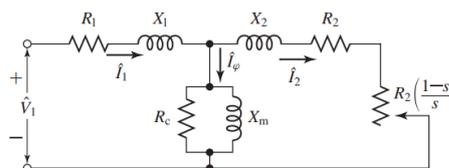
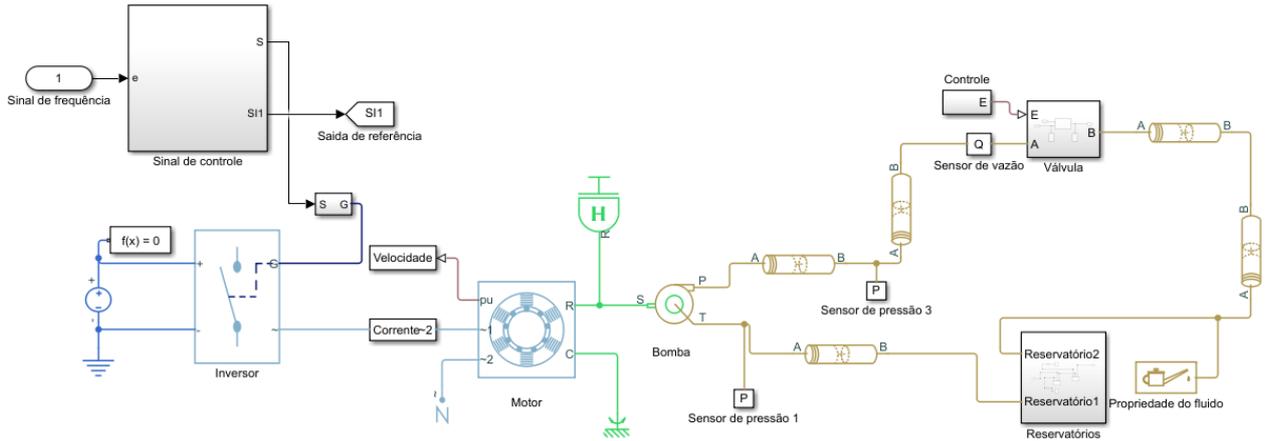


Fig. 3 Circuito equivalente (Úmans, 2014).

Para essa estimação, utiliza-se à semelhança do ensaio de curto-circuito, onde se tem o escorregamento unitário ($s = 1$) e impedância de carga igual a zero. Assim, a impedância do rotor bloqueado será a soma de R_1 , R_2 , X_1 e X_2 , segundo (1).



$$Z = R_1 + R_2 + X_1 + X_2 = \frac{V_N}{I_p} \quad (1)$$

Figura 4. Interface do gêmeo digital.

Em que: V_N é a tensão nominal de fase, I_p é a corrente de partida I_N é a corrente nominal e P_N é a potência nominal. No caso de R_1 , faz-se necessário uma consideração: a perda da máquina quando está a vazio é a soma da potência do núcleo (P_C) com a potência dissipada na resistência do estator (P_E) é o produto entre fator de potência na máquina a vazio (F_{s0}), a potência aparente a vazio (S_0) representado por (2) onde o fator de potência também é encontrado no catálogo da Weg de seleção de motores na curva de rendimento.

$$P_C + P_E = F_{s0} \cdot S_0 \quad (2)$$

Para determinar R_2 será utilizada a curva de torque do motor de acordo com (3). Assim:

$$T = \frac{V_{th}^2 s_N}{W_s R_2} \quad (3)$$

Em que: V_{th} é a tensão de fonte equivalente de acordo com o teorema de Thévenin (V) e W_s é a velocidade síncrona (rad/s) do motor T é o torque (N.m) e o escorregamento nominal (s_N). Por último, a estimação de X_m , representado por (4) considera-se que o circuito em análise está operando a vazio obtendo assim a maior parte da corrente passando pela reatância de magnetização considerando que X_1, R_1, R_c são desprezíveis.

$$X_m = \frac{V_N}{I_\phi} \quad (4)$$

Referente ao subsistema subsequente, que está diretamente conectado com o motor, está localizada a bomba. Neste caso a orientação foi à parametrização da bomba pela pressão, potência *versus* vazão com valores obtidos através de parâmetros da curva da bomba no catálogo do fabricante. A relação da vazão é linearmente proporcional à velocidade da bomba. A relação de pressão é proporcional com o quadrado da relação de velocidade. E a relação de potência é proporcional com o cubo da relação de velocidade Salih et al (2016).

A modelagem do tubo foi feita através da perda de pressão devido ao atrito calculada com a equação de Darcy, na qual as perdas são proporcionais ao fator de atrito dependente do regime de fluxo e ao quadrado da vazão (White, 1991). O

fator de atrito durante a transição de regimes laminar para turbulento é determinado com a interpolação linear entre os pontos extremos dos regimes. Como resultado dessas suposições, o tubo é simulado de acordo com (5).

$$p = f \frac{(L+L_{eq})}{D_H} \frac{\rho}{2A^2} q \cdot |q| + \rho \cdot g(z_A - z_B) \quad (5)$$

Em que: p é a perda de pressão ao longo do tubo devido ao atrito, q é a taxa de fluxo através do tubo, f é o fator de atrito calculado através do número de Reynolds e o fator de atrito de borda laminar e turbulenta. L é o comprimento geométrico do tubo, L_{eq} é o comprimento equivalente agregado de resistências locais, D_H é o diâmetro hidráulico do tubo, A é a área da seção transversal do tubo, $z_A - z_B$ são as elevações das extremidades dos canos, g é a aceleração da gravidade. A Fig. 4 representa o gêmeo digital implementado através do software *Simulink*.

2.2. Estimador de Parâmetros

A estimação de parâmetros é um método utilizado para aproximação de curva de pressão e vazão mensuradas das simuladas. O algoritmo de otimização compara o real e virtual através da função custo, que nesse estudo é a função de mínimos quadrados, alterando os parâmetros escolhidos (Perdas de carga e rugosidades). É feita uma orientação por dados de entrada obtidos através da pressão e vazão mensurados, ajustando as curvas e possibilitando a minimização do erro entre o sistema real e a saída do gêmeo digital.

O método de otimização utilizado foi: “Mínimos Quadrados não Lineares” e o algoritmo escolhido foi: “Refletiva da Região de Confiança” (*Trust Region Reflective*).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Valores Utilizados para a Construção do Modelo

Na construção do motor, os parâmetros necessários para entrada são: Resistência do estator (0,26 Ω), Reatância de dispersão do estator (1,12 Ω), Resistência do rotor (0,72 Ω), Reatância de dispersão do rotor (1,12 Ω), Reatância de magnetização (23 Ω), Potência aparente nominal (2200 W), Tensão nominal (220 V) e Frequência elétrica nominal (60 Hz). A Construção desse modelo do motor de indução trifásico foi realizada a partir de estimação de parâmetros

utilizando os dados do fabricante sobre o motor utilizado na bancada. A Tabela 1 reúne as demais características do motor utilizadas para construção da simulação.

Tabela 1. Características do motor utilizado.

Potência	3 HP/2,2 KW
Número de pólos	2
Rotação Nominal	3450 RPM
Escorregamento	4,17%
Tensão nominal	220/380 V
Corrente nominal	8,04/4,65 A
Corrente a vazio	4/2,32 A
Conjugado nominal	6,09 N.m
Momento de inércia	0,00198 Kg.m ²

Para a bomba, utilizou-se uma velocidade angular de 3450 RPM e densidade de 998 Kg/m³. O vetor de vazão utilizado foi: [0,0048 0,0058 0,0071 0,0081 0,0090 0,01152] m³/s; o vetor de pressão utilizado foi: [22,94 21,92 19,98 17,94 15,90 1,93] m.c.a; o vetor de potência utilizado foi: [1096 1258 1400 1441 1425 226] W. O próximo passo foi a construção do percurso da água. Cada tubulação foi representada a partir dos parâmetros de rugosidade, perdas locais, diâmetro (52,4 mm), pressão (0,75 m.c.a), vazões iniciais (1 m³/s) e elevação vertical. Os canos (dutos) foram modelados de acordo com sua elevação priorizando a separação do circuito em pequenos tubos em posições verticais onde pudessem ser percebidas as elevações das cargas de água através da tubulação.

3.2. Controle de Velocidade do Motor

As aquisições foram realizadas utilizando a válvula proporcional no sentido: semiaberta (em 45°) e totalmente aberta (em 0°), com intuito de simular a demanda do sistema. Foi utilizado o sensor de pressão, para realizar a comparação entre sistema real e virtual (simulado). As simulações ocorreram em passo variável ODE 3 (baseado no algoritmo de solução utilizado no *Simulink*) com o passo de simulação de 10⁻⁴. A Fig. 5 representa a variação da frequência de 0 a 35 Hz (Velocidade que se deseja atingir) em válvula semiaberta. Inicialmente as curvas divergiram entre si, mas após a utilização do estimador de parâmetros (alterando as perdas locais e a rugosidade da tubulação) foi obtido um resultado próximo ao real. A pressão estimada versus mensurada pode ser visualizada através da Fig. 5.

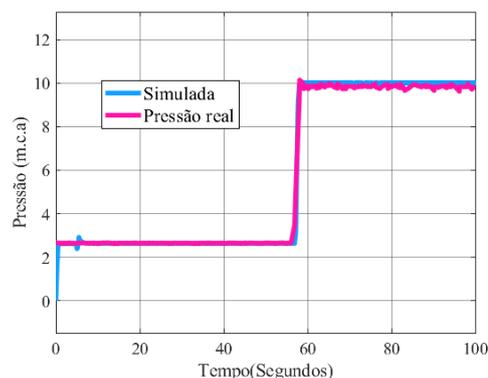


Fig. 5 Pressão: Digital versus real – Com controle de velocidade.

Os valores encontrados pelo estimador de parâmetros para a válvula totalmente aberta foi uma rugosidade de 0.0015 mm e perdas locais de Pr₁ = 0,62 m, Pr₂ = 0,54367 m, Pr₃ = 7,8221 m, Pr₄ = 0,01626 m, Pr₅ = 1,2479 m e para demanda de metade da válvula aberta foram uma rugosidade de 0,0015 mm e perdas de: Pr₁ = 0,001 m, Pr₂ = 0,00774 m, Pr₃ = 5,075 m, Pr₄ = 15,214 m, Pr₅ = 59,966 m. A fim de verificar se os valores obtidos descrevem realmente o sistema, faz-se necessário a realização de mais testes, considerando diferentes frequências e diferentes valores de pressão, a fim de alterar o comportamento do sistema. O objetivo desses ajustes é a obtenção de erros, mediante a comparação entre valores reais e simulados, próximos ou iguais à zero.

As Tabelas 2 e 3 representam os valores relativos à média e desvio padrão do erro absoluto considerando os cenários com a atuação apenas do controle de velocidade do inversor em regime. A métrica utilizada foi o erro médio percentual absoluto onde se utilizou das pressões e vazões em regime como referência. Através da equação 8 encontra-se o erro relativo absoluto:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \bar{y}_i}{y_i} \right| 100\% \quad (8)$$

Onde: \bar{y}_i é o valor de referência, no caso da figura 5 são os valores de pressão real e y_i são os valores de pressão simulada em regime. Foi obtido um erro médio absoluto percentual de todos os cenários para o sensor de pressão de 3% e 0,98%, com a válvula totalmente aberta (0°) e a válvula parcialmente aberta (45°) respectivamente.

Tabela 2. Erro médio absoluto da pressão na condição de válvula aberta.

Frequência (0°)	Erro de Pressão	
	Média	Desvio padrão
0 a 30 Hz	0,0543	0,0398
0 a 35 Hz	0,1148	0,0495
0 a 40 Hz	0,1817	0,0812
0 a 45 Hz	0,2364	0,0807
Média	0,1468	0,0628

Tabela 3. Erro médio absoluto de pressão na condição de válvula semiaberta

Frequência (45°)	Erro de Pressão	
	Média	Desvio padrão
0 a 30 Hz	0,034	0,0753
0 a 35 Hz	0,0803	0,1325
0 a 40 Hz	0,0594	0,3649
0 a 45 Hz	0,1969	0,5858
Média	0,09625	0,2896

3.3. Controle da Pressão

Além do controle de velocidade realizado pelo inversor, também foram realizados testes utilizando o controle de pressão do sistema. O controlador utilizado nesta etapa de experimentos foi desenvolvido por Flores, 2021 e desta vez os avos eram as pressões desejadas.

Foram realizadas 20 aquisições, todas sob as mesmas condições, com o controle de pressão. Foram configurados os valores de referências do controle para as pressões de 8, 10, 12 e 15 mca (setpoints). A Fig. 6 ilustra os resultados obtidos e a Tabela 4 contém o erro médio absoluto dos cenários descritos, onde utilizou o controle de pressão.

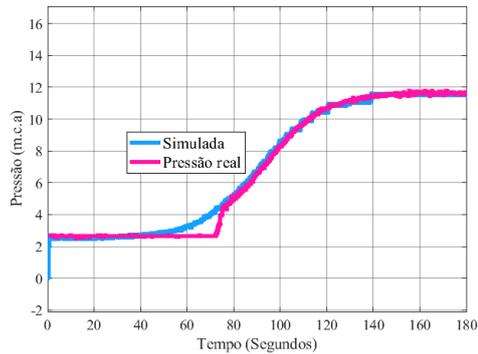


Fig. 6 Pressão: Digital versus real - Com controle de pressão do sistema.

Tabela 4. Erro médio absoluto da pressão na condição de controle de pressão do sistema.

Pressão	Erro de pressão	
	Cenários	Desvio padrão
8 mca	0,0603	0,1492
10 mca	0,0781	0,0599
12 mca	0,0892	0,2825
15 mca	0,0425	0,5571
Média	0,067525	0,262175

Os valores encontrados para o sistema controlado foram os mesmos para o sistema de válvula semiaberta: uma rugosidade de 0.0015 mm e perdas de: $Pr_1 = 0,058$ m, $Pr_2 = 0,007747$ m, $Pr_3 = 5,0754$ m, $Pr_4 = 15,214$ m, $Pr_5 = 59,966$ m. Em relação ao erro promovido entre a comparação das curvas estimadas e real, os resultados foram de média igual a 0,67% para pressão.

3.4. Acréscimo de um Sensor de Pressão ao Sistema

Neste experimento, foi adicionado um sensor de pressão à montante da bomba. Foram utilizados os valores encontrados pelo estimador de parâmetros obtidos no teste anterior. No entanto, não houve convergência dos dois sensores ao mesmo instante de tempo, com os valores de perda de carga e rugosidade utilizadas anteriormente. Fazendo uma convergência separadamente para o caso da válvula totalmente aberta a Fig. 7 ilustra a curva comparativa entre a

pressão obtida pelo gêmeo digital versus obtida através do sensor físico e a Fig. 8 representa a estrutura associada ao teste em questão.

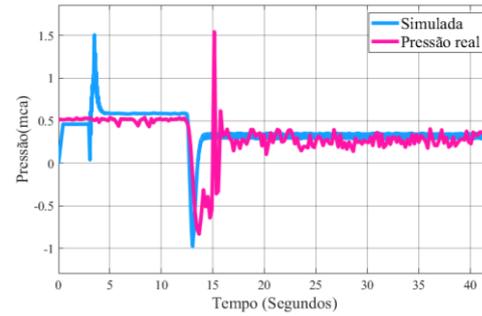


Fig. 7 Pressão de aspiração - Real versus Digital.

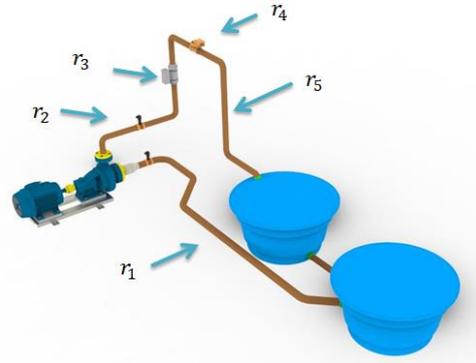


Fig. 8 Representação dos canos (tubulações).

Foram realizados ajustes nas perdas de carga e a utilização de dois sensores para obtenção dos valores estimados. Entretanto, em um sistema de tubulação, a rugosidade não é a mesma em toda a sua extensão. A fim de solucionar essa problemática, foi implementada uma estratégia de estimação de rugosidade à parte. Assim, foram utilizadas cinco rugosidades $r_1 = 0,0011096$ mm; $r_2 = 0,053826$ mm; $r_3 =$; $r_4 = 0,00147$ mm; $r_4 = 0,0014812$ mm e $r_5 = 0,0049323$ mm, todas associadas a Fig. 8.

Os ajustes de perda de carga estão sendo obtidos ajustando as rugosidades de cada encaiação. A convergência dos valores de perda de carga foi de: $Pr_1 = 4,768$ m, $Pr_2 = 5,87746$ m, $Pr_3 = 3,0827$ m, $Pr_4 = 3,0847$ m, $Pr_5 = 0,035$ m. O erro médio relativo obtido para os sensores com a válvula totalmente aberta foi de 2% e de 0,93% para pressões de aspiração e recalque respectivamente. A Tabela 5 contém todos os valores de erro obtidos a partir de considerações pertinentes.

Tabela 5. Erro médio absoluto de pressão na condição de válvula aberta, com adição do sensor na aspiração.

Frequência a (0°)	Erro de pressão na aspiração		Frequência (0°)	Erro de pressão	
	Média	Desvio padrão		Cenários	Média
0 a 30 Hz	0,0153	0,0781	0 a 30 Hz	0,0326	0,0856
0 a 35 Hz	0,00078	0,0813	0 a 35 Hz	0,0053	0,0935
0 a 40 Hz	0,0206	0,111	0 a 40 Hz	0,0974	0,1724
0 a 45 Hz	0,0223	0,0248	0 a 45 Hz	0,0186	0,0752
Média	0,01474	0,073	Média	0,0385	0,1067

Na válvula semiaberta obteve-se o mesmo comportamento do padrão anterior, obtendo-se valores de perda de carga de: $Pr_1 = 0,001077$ m, $Pr_2 = 0,002265$ m, $Pr_3 = 51,387$ m, $Pr_4 = 37,98$ m, $Pr_5 = 99,708$ m. O erro médio relativo para pressão de recalque, aspiração foi de respectivamente 0,47%, 0,9%. A Tabela 6 contém os dados de erro relativos aos testes,

Tabela 6. Erro médio absoluto de pressão na condição de válvula semiaberta, com adição do sensor na aspiração.

Frequência (45°)	Erro de pressão na aspiração		Frequência (45°)	Erro de pressão	
	Cenários	Média		Desvio padrão	Cenários
0 a 30 Hz	0,0045	0,0417	0 a 30 Hz	0,0163	0,0641
0 a 35 Hz	0,0093	0,0483	0 a 35 Hz	0,022	0,0717
0 a 40 Hz	0,0027	0,2903	0 a 40 Hz	0,0791	0,0894
0 a 45 Hz	0,0078	0,3009	0 a 45 Hz	0,0627	0,907
Média	0,0060	0,1703	Média	0,0450	0,28305

Fig. 9 e Fig. 10 ilustram a situação de controle de pressão com o acréscimo do sensor na aspiração, com referência em 8 mca.

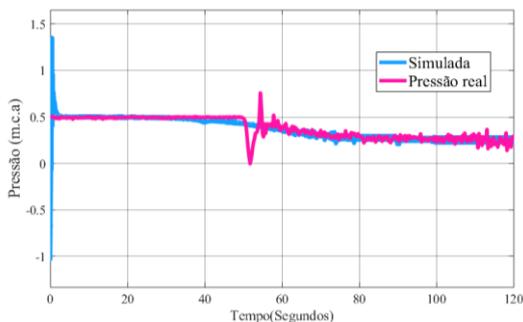


Fig. 9 Pressão de aspiração: Digital versus real.

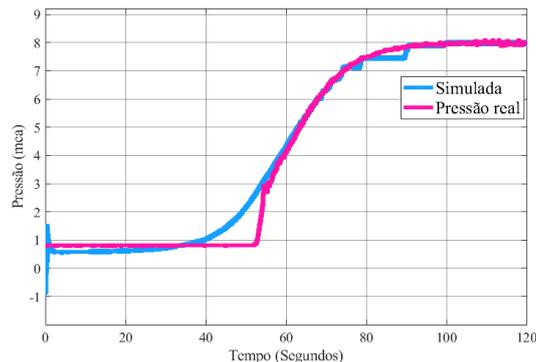


Fig. 10 Pressão de recalque: Digital versus Real

Os valores obtidos foram de: $Pr_1 = 0,001077$ m, $Pr_2 = 0,002265$ m, $Pr_3 = 51,387$ m, $Pr_4 = 37,98$ m, $Pr_5 = 99,708$ m. O erro médio relativo obtido foi de 1,21% para pressão de aspiração; 0,232% para pressão no recalque. A Tabela 7 contém os dados relativos aos testes.

Tabela 7. Erro médio absoluto de pressão na condição de controle de pressão do sistema, com adição do sensor na aspiração.

Pressão	Erro absoluto de pressão na aspiração		Pressão	Erro absoluto de pressão	
	Cenários	Média		Desvio padrão	Cenários
8 mca	0,0041	0,0376	8 mca	0,0239	0,0488
10 mca	0,0053	0,0516	10 mca	0,0395	0,0671
12 mca	0,0069	0,0695	12 mca	0,0187	0,0584
15 mca	0,0032	0,0605	15 mca	0,0233	0,0566
Média	0,004875	0,0548	Média	0,02635	0,057725

Para finalização do estudo, foi realizada uma calibração do sistema mediante a utilização do software EPANET. O EPANET é um software que permite realizar simulações quali-quantitativas, estáticas e dinâmicas, de sistemas de distribuição de água (Rossman, 2000). Uma simulação estática no EPANET do sistema considerando os dados de entrada de dois sensores de pressão e um sensor de vazão como referência, um programa de calibração utilizando algoritmo genético foi desenvolvido para otimização dos valores de perda de carga e rugosidade a Tabela 8 está demonstrado um comparativo dos valores de rugosidade nos mesmos locais representados pela Fig. 8.

A Tabela 8 contém os dados referentes à diferença de valores de rugosidades obtidos na comparação entre o EPANET e o Gêmeo Digital implementado nesta pesquisa.

Tabela 8. Comparativo de rugosidade com o EPANET.

Comparativo	Rugosidade (mm)	
	EPANET	Gêmeo Digital
r_1	0,0012	0,0011
r_2	0,05	0,05
r_3	0,0014	0,0015
r_4	0,002	0,0015
r_5	0,005	0,005

4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que a metodologia proposta foi capaz de modelar a pressão no cenário de controle de pressão com um sensor de pressão, obteve-se um erro médio de 0,6%, com o acréscimo do sensor de pressão na aspiração, foi verificado que o erro associado à pressão foi reduzido para 0,2%. Para o cenário de controle de velocidade com a válvula proporcional totalmente aberta o erro médio de pressão obtido foi de 3,6%. Quando foi adicionado o sensor de pressão na aspiração, o erro de pressão no recalque foi reduzido para 0,9%. No contexto do cenário de válvula semiaberta com perda de carga bem superior em comparação ao teste anterior, foi observado o mesmo resultado no tocante ao erro: valor obtido para erro de pressão de 0,9%. Foi observado que o acréscimo de um

sensor de pressão na montante (aspiração) reduziu o erro para o sensor de pressão do recalque. Em relação ao comparativo entre o EPANET e o Gêmeo digital tem-se uma média de erro de 5,24% entre os valores de rugosidade dos tubos. O que demonstra uma eficiência em estimar os valores de rugosidade.

Os resultados obtidos ratificam com a teoria apresentada nos artigos analisados na parte inicial desta pesquisa, em que o sistema com a maior perda de carga apresenta uma maior convergência, demonstrando a influência da perda de carga na simulação. Ao adicionar o sensor de aspiração ao cenário, esperava-se obter uma modelagem mais robusta do sistema e erros menores e o erro de pressão no recalque foi reduzido. Também foi observado que o ajuste de perda de carga facilitou à estimação de rugosidade quando foi adotada a análise em cada tubulação separadamente. Assim, com o método utilizado neste artigo, conseguiu-se estimar a rugosidade dos canos utilizando gêmeo digital com erros menores que 5%.

REFERÊNCIAS

- Alvisi, S., and Franchini, M. (2010). Pipe roughness calibration in water distribution systems using grey numbers. *J. Hydroinf.*, 12(4), 424–445.
- Berghen, F. V. (2004). Levenberg-Marquardt algorithms vs Trust Region algorithms. IRIDIA, Université Libre de Bruxelles. Disponível em: <http://www.applied-mathematics.net/LMvsTR/LMvsTR.pdf>. Acesso em 23 de dezembro de 2021 as 19:33.
- Colebrook, C. F. (1939). Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. *J. Inst. Civil Eng.* 11 (4): 133–156. <https://doi.org/10.1680/ijoti.1939.13150>.
- Flores, T. K. S. (2021). Controle adaptativo utilizando o critério da máxima correntropia aplicado a um sistema de bombeamento de água. Dissertação de M.sc, Programa de pós-graduação em engenharia elétrica. Universidade Federal da Paraíba – João Pessoa.
- Gomes, H. P. (2009). Sistemas de bombeamento. João Pessoa, Ed. Universitária UFPB; ISBN 978-85-7745-390-0.
- Guo, X, Tao Wang, Kailin Yang, Hui Fu, Yongxin Guo, Jiazhen Li. (2019). Estimation of Equivalent Sand–Grain Roughness for Coated Water Supply Pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, © ASCE, ISSN 1949-1190.
- Haaland, S. E. (1983). Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent flow. *J. Fluids Eng.* 105 (1): 89–90. <https://doi.org/10.1115/1.3240948>.
- Petrova J, H., Rohde, L. A., Pomianowski, M. Z. (2021). Digital Twins of Building Physics Experimental Laboratory Setups for Effective E-learning. In *Proceedings of the 8th international building physics conference IBPC 2021*.
- Kapelan, Z. S., Savic, D. A., and Walters, G. A. (2007). “Calibration of water distribution hydraulic models using a Bayesian-Type procedure.” *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(927), 927–936.
- Koppel, T., and Vassiljev, A. (2009). Calibration of a model of an operational water distribution system containing pipes of different age. *Adv. Eng. Software*, 40(8), 659–664
- Lansley, K., El-Shorbagy, W., Ahmed, I., Araujo, J., and Haan, C. T. (2001). “Calibration assessment and data collection for water distribution networks.” *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2001) 127:4(270), 270–279
- Mykoniatis, K; Harris, G. A. (2021) A digital twin emulator of a modular production system using a data-driven hybrid modeling and simulation approach . *Journal of Intelligent Manufacturing* <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01724-5>.
- Moody, L. F. (1944). Friction factors for pipe flow. *Trans. ASME* 66:671–684.
- Nikuradse, J. (1950). Laws of flow in rough pipes.”*VDI Forschungsheft* 361, NACA TM 1292. Washington, DC: National Advisory Committee for Aeronautics.
- Ormsbee, L. E. (1989). Implicit network calibration. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)0733-9496(1989)115:2(243), 243–257.
- Rossman, L.A. (2000). EPANET 2 – User’s Manual. Ohio: U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati.
- Salih H. R., Abdulrazzaq A. A., Guzun B. D., (2016), Dynamic Modeling of Pump Drive System utilizing Simulink/MATLAB. *Program. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* e-ISSN: 2395 -0056. p-ISSN: 2395-0072.
- Tiejun G. (2017). Roughness and Demand Estimation in Water Distribution Networks Using Head Loss Adjustment. *Journal of Water Resources Planning and Management*, © ASCE, ISSN 0733-9496. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000845.
- Úmans, S. D. (2014). Máquinas elétricas de fitzgerald e kingsley. AMGH. 7º Ed. ISBN-10 8580553733.
- White, F.M. (1991). *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill.