

ESTIMAÇÃO DE RUGOSIDADE EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO O ALGORÍTMO REFLETIVA DA REGIÃO DE CONFIANÇA E GÊMEO DIGITAL

Anne Louise Matos Barão Oliveira, annelf14@gmail.com¹
Heber Pimentel Gomes, heberp@uol.com.br¹
Juan Mauricio Villanueva, jmauricio@cear.ufpb.br¹
Robson Pacífico Guimarães Lima, robsonpacifico@gmail.com¹
Thommas Kevin Sales Flores, thommas.flores@cear.ufpb.br¹

¹Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Campus I, Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58051-900.

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 passando pelo seu interior acaba se alterando significativamente. A literatura assume amplas faixas de valores para a rugosidade absoluta, dificultando a tomada de decisão dos projetistas. 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. Métodos de estimação em campo utilizando microscópio eletrônico de varredura e rugosímetros de bancada são técnicas invasivas que pode comprometer a integridade física da tubulação. 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 do sistema real. Utilizou-se de um estimador de parâmetros, que por meio do algoritmo de otimização Refletiva da Região de Confiança (trust region reflective) altera os valores de rugosidade e perdas locais do encanamento, buscando assim a minimização de erro entre os sensores de pressão e vazão real e virtual. Para alcançar o objetivo deste trabalho, foram realizados experimentos em vinte e quatro cenários possíveis com controle de velocidade e pressão do sistema. Os resultados obtidos mostram o erro de rastreamento máximo de cinco por cento, demonstrando a eficácia da metodologia e sua aplicabilidade em cenários de maiores dimensões.

Palavras-chave: rugosidade, gêmeo digital, otimização, sistemas de abastecimento de água, estimação de parâmetros.

1. INTRODUÇÃO

A rugosidade é um parâmetro de tubulações que geralmente não é fornecido pelo fabricante, ele se altera ao longo do tempo e que possui uma vasta faixa de valores na literatura. O rugosímetro, um instrumento utilizado para medição da rugosidade, possui um alto valor de mercado, com dispêndio médio em torno de R\$ 2000,00 (dois mil reais) podendo chegar até R\$ 70000,00 (setenta mil reais), possui como estrutura de mensuração um método de caráter invasivo onde, por exemplo, caso fosse necessário digitalizar uma determinada rede de um sistema de abastecimento de água já existente, o projetista, de posse do instrumento de medição, deveria interromper o abastecimento da rede que se almeja mensurar, extrair um trecho da tubulação e promover a medição da rugosidade para obtenção do valor nesse trecho.

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.

Métodos de estimação em campo utilizando de equipamentos microscópicos e rugosímetros também podem ser realizados. Entretanto, na ausência desses equipamentos, é possível realizar a modelagem do sistema, utilizando sensores que mensuram pressão e vazão na rede como referencial para calibração. 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 e quando é utilizada a técnica de Mínimos Quadrados Ponderados (Tiejun Gao, 2017).

Esta pesquisa objetivou 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. Foram realizados ensaios em uma bancada experimental localizada na UFPB, com a finalidade de calibrar modelos de projetos de abastecimento, principalmente, em redes já existentes, onde não é possível retirar as tubulações a fim de realizar as medições pertinentes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A bancada experimental onde foram realizados os experimentos está localizada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). A estrutura pode ser visualizada através da Fig.1. A bancada experimental supracitada possui como objetivo promover a emulação de um sistema típico de abastecimento de água. Seus principais elementos, utilizados neste trabalho, são: uma bomba centrífuga conectada a um motor de indução trifásico e um inversor de frequência utilizado para controle de velocidade de rotação do motor. Esses dois elementos podem ser visualizados através das Fig. 2 e Fig.3, respectivamente.



Figura 1. Planta experimental LENHS. Figura 2. Conjunto motor-bomba. Figura 3. Inversor de frequência.

2.1 Metodologia para Desenvolvimento do Gêmeo Digital

Na fig. 4 está ilustrado o fluxograma para elaboração do gêmeo digital, onde cada componente do sistema real é modelado através de métodos matemáticos que representem o comportamento do objeto de estudo, por meio da comparação entre curvas (real *versus* digital); ajuste de parâmetros dos modelos matemáticos para adequar o ativo digital ao resultado real e, por fim, a conexão de todos os blocos construindo um sistema dinâmico digital que represente o ativo real.

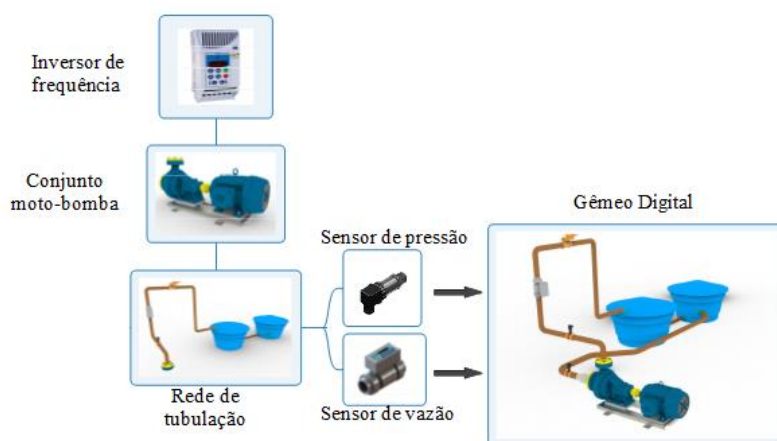


Figura 4. Fluxograma de construção do gêmeo digital.

O processo de construção de cada modelo teve início com a lógica de controle do inversor. Portanto, para reproduzir o controle de velocidade que ocorre no sistema real, fez-se necessário utilizar um sinal de tensão para controlar a velocidade do motor, ou seja, promover o controle da frequência, que é o parâmetro adotado nesta fase. O que ocorre no sistema real (físico) é o operador do sistema ou controle inserir um valor de frequência (por exemplo, 30 Hz) e o inversor, mediante esse estímulo, acionar o motor e ele responder à velocidade correspondente a esta frequência, em

alguns segundos. Em seguida, há a coleta dos valores de frequência aplicados durante o experimento como sinal de entrada do controle. Algumas considerações importantes devem ser consideradas: não se deve inserir uma frequência alta com amplitude baixa e vice-versa, tendo o cuidado de manter o fluxo magnético constante, deixando a amplitude proporcional à frequência aplicada. O sinal resultante se conecta ao PWM, *Pulse Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso) de modo a controlar o ciclo ativo do sinal aplicado a uma frequência e, assim, a potência aplicada a ela. Este sinal de controle é enviado para o inversor de frequência de seis pulsos, que consiste em uma ponte trifásica, onde são selecionados os dispositivos de comutação. A configuração escolhida para esta etapa foi composição de IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) com um diodo de proteção integral, priorizando a fidelidade do modelo de simulação. O inversor é alimentado por uma fonte de tensão (*Voltage source inverter*) indicada para aplicações de potências baixas ou médias.

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.5, 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); X_2 (Reatância de dispersão do rotor); R_c (resistência que representa a perda do núcleo); L_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.

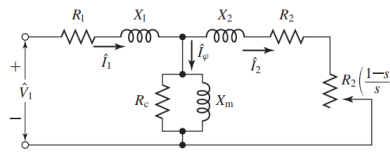


Figura 5. Circuito equivalente (Úmans, 2014).

Inicialmente serão estimados X_1 e X_2 utilizando a corrente de partida da máquina como critério. Nesta situação, a máquina está conectada e sua chave será fechada no instante zero. Ao fechar circuito, a corrente trifásica estará com valor muito maior que a corrente nominal, apenas neste instante de partida. Para essa estimativa, utiliza-se a semelhança do ensaio de curto-circuito, onde se tem o escorregamento unitário ($s = 1$) e impedância de carga igual a 0. Assim, a impedância do rotor bloqueado será a soma de R_1 , R_2 , X_1 e X_2 . A Eq. (1) representa esta estimativa.

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

onde: 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) e o produto entre fator de potência na máquina a vazio (F_{s0}), a potência aparente a vazio (S_0) representado pela Eq. (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 com Eq. (3). Assim:

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

onde; 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 estimativa de X_m , representado pela Eq. (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.

A modelagem do tubo foi realizada através da perda de pressão devido ao atrito calculada com a equação de Darcy, na qual as perdas são proporcionais ao fator de atrito (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

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

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 da porta A e porta B do tubo, respectivamente, g é a aceleração da gravidade. A Figura 6 representa o gêmeo digital implementado através do programa computacional MATLAB/Simulink.

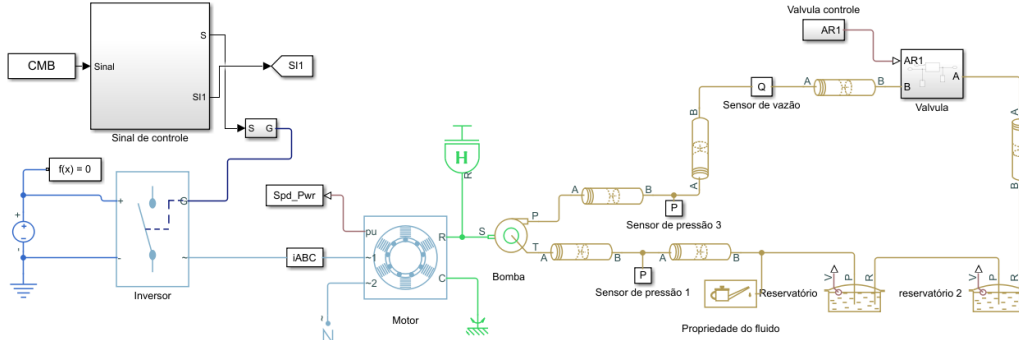


Figura 6. Interface do Gêmeo digital.

2.2 Estimador de Parâmetros

O estimador de parâmetros é um método de estimação onde é possível a criação de um experimento através do qual o valor mensurado e o simulado podem ser dispostos na mesma saída. No caso do gêmeo digital implementado nesta pesquisa, o experimento será baseado nos dados obtidos a partir dos sensores de pressão e vazão. Mediante as curvas de respostas obtidas através de dados mensurados através desses instrumentos, é possível promover uma comparação entre o sistema real e a saída do gêmeo digital. Através da alteração de parâmetros do sistema é possível reduzir o erro entre as curvas dos sensores. Os métodos de otimização utilizado neste artigo foram os Mínimos Quadrados não Lineares e o algoritmo escolhido foi da Refletiva da Região de Confiança (*Trust Region Reflective*). Assumindo que se deseja obter x^* , o mínimo da função objetivo é dado por $f(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Então, o método de Newton para encontrar o x^* mínimo de $\mathcal{F}(x)$ utiliza o desenvolvimento de Taylor em 2º grau de $\mathcal{F}$ em torno de x_k conforme observado através da Eq. (6).

$$\mathcal{F}(x_k + \delta) = \mathcal{Q}_k(\delta) = \mathcal{F}(x_k) + g_k^t \delta + \frac{1}{2} \delta^t B_k \delta \quad (6)$$

Em que: $\mathcal{Q}_k(\delta)$, a aproximação quadrática de $\mathcal{F}(x)$ em torno de x_k ; g_k , O gradiente de $\mathcal{F}(x)$ calculado em x_k ; B_k , uma aproximação da matriz hessiana real H_k de $\mathcal{F}(x)$ em x_k ; H_k e a matriz hessiana real de $\mathcal{F}(x)$ em x_k .

Assumindo que $B_k := H_k$, o mínimo irrestrito δ_k de $\mathcal{Q}(\delta)$ é dado pela Eq. (10).

$$\nabla \mathcal{Q}(\delta_k) = g_k + B_k \delta_k = 0 \Leftrightarrow B_k \delta_k = -g_k \quad (7)$$

A Equação 7 é denominada de Equação do Passo de Newton δ_k . Assim, o método de Newton para encontrar o x^* mínimo de $\mathcal{F}(x)$ é dado por:

1. Defina $k = 0$. Defina $x_0 = x_{inicio}$.
2. Resolva $B_k \delta_k = -g_k$ (vá para o mínimo da aproximação quadrática atual de $\mathcal{F}$).
3. Defina $x_{k+1} = x_k + \delta_k$.
4. Incrementar k . Pare se $g_k \approx 0$ caso contrário, vá para a etapa 2.

Algoritmos de Levenberg-Marquardt (LM) e refletiva da região de confiança são baseados em *Newton Step* (são chamados de “métodos de passo de Newton restritos”). Assim, ambos exibem velocidade quadrática de convergência perto de x^* . Quando a solução está distante (x_k longe de x^*), podemos encontrar uma curvatura negativa (H_k negativo definido). Caso isso ocorra, os algoritmos de LM tenderão a serem mais lentos dramaticamente. Em oposição, a refletiva de Região de Confiança realizará uma etapa muito longa δ_k e convergindo rapidamente para região de menor erro. As etapas δ_k permanecem, portanto, de baixa qualidade em comparação com o algoritmo refletiva da região de confiança (Berghen, 2004).

3 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 ($0,26 \Omega$), Reatância de dispersão do estator ($1,12 \Omega$), Resistência do rotor ($0,72 \Omega$), Reatância de dispersão do rotor ($1,12 \Omega$), Reatância de magnetização (23Ω), 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 em bancada. A Tabela 1 reúne as demais características do motor utilizadas para construção da simulação.

Tabela 1. Características do motor utilizado.

Potência	Número de polos	Rotação Nominal	Escorregamento	Tensão nominal	Corrente nominal	Corrente a vazio	Conjugado nominal	Momento de inércia
3 HP/2.2 KW	2	3450 RPM	4.17%	220/380 V	4.65 a 8.04 A	2.32 a 4 A	6.09 N.m	0.00198 Kg.m ²

Para a bomba, utilizou-se uma velocidade angular de 3450 RPM e densidade de 998 Kg/m^3 . O vetor de vazão utilizado foi: $[0,0048 \ 0,0058 \ 0,0071 \ 0,0081 \ 0,0090 \ 0,01152] \text{ m}^3/\text{s}$; o vetor de pressão utilizado foi: $[22,94 \ 21,92 \ 19,98 \ 17,94 \ 15,90 \ 1,93] \text{ m.c.a.}$; o vetor de potência utilizado foi: $[1096 \ 1258 \ 1400 \ 1441 \ 1425 \ 226] \text{ W}$. O próximo passo foi à 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 ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) 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. Por exemplo: foi considerada uma altura de 0,2 m, utilizando o nível do solo em que se encontrava a instalação como referência, o encanamento na saída da água do reservatório após o sensor de pressão 1 até a bomba. Outro exemplo é a consideração realizada imediatamente após o sensor de pressão 3 e antes do sensor de vazão nesse tubo: houve a adoção de uma altura de 0,35 m do solo em no início da tubulação e finalizou-se com 1,8 m na sua extremidade final.

3.2 Controle de Velocidade do Motor

As primeiras aquisições foram realizadas utilizando a válvula proporcional aberta pela metade (em 45°) e totalmente aberta (em 0°) para verificar a demanda do sistema e, inicialmente, foi utilizado apenas o sensor de pressão no recalque e o sensor de vazão associado. As simulações ocorreram em passo variável ODE 3 (baseado no algoritmo de solução utilizado no *Simulink*) com o passo de simulação de 10^{-4} . O procedimento experimental pode ser representado através das Fig. 7 e Fig. 8, respectivamente. Houve a variação da frequência de 0 a 35 Hz utilizando apenas o inversor de frequência como controle da velocidade do motor. 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. 7 e a vazão estimada *versus* mensurada pode ser visualizada através da Fig. 8.

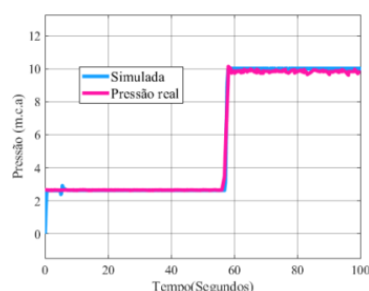


Figura 7. Pressão: Digital *versus* real – Com controle de velocidade

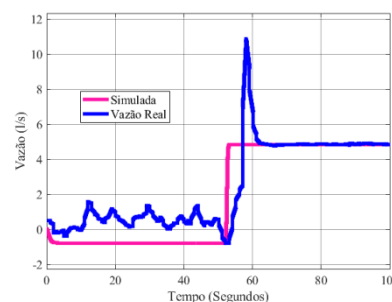


Figura 8. Vazão: Digital *versus* real – Com controle de velocidade

Em relação à vazão associada à Fig. 8, mesmo realizando uma média de 20 aquisições a fim de estabilizar o transiente, não houve uma aproximação da curva de vazão antes da estabilização. A discrepância de 11 L/s antes da estabilidade é devida à mudança brusca de velocidade, ocasionada pela inserção de água em excesso para a região da seção transversal do sensor. O instrumento de vazão é do tipo eletromagnético e bastante sensível, e ele utiliza a força eletromotriz gerada quando a água atravessa sua seção transversal. A consequência dessa passagem abrupta de água foi

o surgimento de um valor mensurado discrepante (*outlier*). Os valores encontrados pelo estimador de parâmetros para a válvula totalmente aberta foi uma rugosidade de 0.0015 mm e perdas locais de: $Pr_1 = 0,62$ m, $Pr_2 = 0,54367$ m, $Pr_3 = 7,8221$ m, $Pr_4 = 0,01626$ m, $Pr_5 = 1,2479$ m e para demanda de metade da válvula aberta foram uma rugosidade de 0,0015 mm e para as perdas de cargas em cada tubulação foi de: $Pr_1 = 0,001$ m, $Pr_2 = 0,00774$ m, $Pr_3 = 5,075$ m, $Pr_4 = 15,214$ m, $Pr_5 = 59,966$ m. A fim de verificar se esses valores obtidos possam descrever 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 a zero. As Tabelas 2 e 3 apresentam, respectivamente, os valores relativos à média e desvio padrão do erro considerando os cenários com a atuação apenas do controle de velocidade do inversor. Isso significa que foram inseridos valores de frequência que se desejava atingir. Obteve-se um erro médio de todos os cenários de 3% e 0,98% para o sensor pressão, 1,7% e 1,32% para o sensor vazão, com a válvula totalmente aberta (0°) e a válvula parcialmente aberta (45°) respectivamente.

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

Frequência (0°)	Erro absoluto de pressão		Frequência (0°)	Erro absoluto de vazão	
Cenários	Média	Desvio padrão	Cenários	Média	Desvio padrão
0 a 30 Hz	0.0543	0.0398	0 a 30 Hz	0.222	0.0284
0 a 35 Hz	0.1148	0.0495	0 a 35 Hz	0.2013	0.0604
0 a 40 Hz	0.1817	0.0812	0 a 40 Hz	0.1886	0.0264
0 a 45 Hz	0.2364	0.0807	0 a 45 Hz	0.1587	0.0328
Erro médio	0.1468	0.0628	Erro médio	0.19265	0.037

Tabela 3. Erro médio de pressão e vazão na condição de válvula semiaberta

Frequência (45°)	Erro absoluto de pressão		Frequência (45°)	Erro absoluto de vazão	
Cenários	Média	Desvio padrão	Cenários	Média	Desvio padrão
0 a 30 Hz	0.034	0.0753	0 a 30 Hz	0.1307	0.0231
0 a 35 Hz	0.0803	0.1325	0 a 35 Hz	0.0683	0.0212
0 a 40 Hz	0.0594	0.3649	0 a 40 Hz	0.0715	0.0524
0 a 45 Hz	0.1969	0.5858	0 a 45 Hz	0.0201	0.0174
Erro médio	0.09625	0.2896	Erro médio	0.072	0.028

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). O procedimento experimental para aquisição dos dados de pressão teve como objetivo a redução de possíveis dados discrepantes. Foram realizadas 20 aquisições, todas sob as mesmas condições, com o controle de pressão. O controle deveria atingir as pressões de 8, 10, 12 e 15 mca (*setpoints*). As Figuras 9 e 10 ilustram os resultados obtidos.

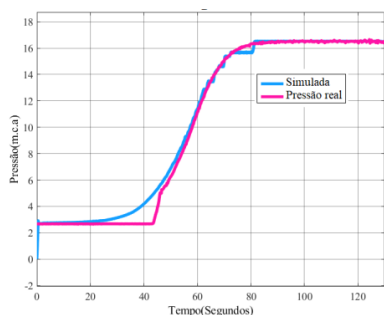


Figura 9. Pressão: Digital versus real - Com controle de pressão do sistema

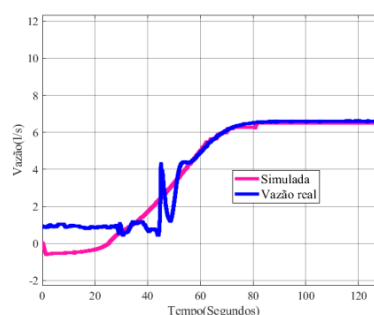


Figura 10. Vazão: Digital versus real - Com controle de pressão do sistema

Os valores encontrados para o sistema controlado foram: uma rugosidade de 0,0015 mm; $Pr_1 = 0,058$ m, $Pr_2 = 0,007747$ m, $Pr_3 = 5,0754$ m, $Pr_4 = 15,214$ m, $Pr_5 = 59,966$ m. A Tabela 4 contém os quatro cenários descritos, onde

utilizou o controle de pressão. Em relação ao erro promovido entre a comparação das curvas estimadas e real, os resultados foram de média igual a 0,67% para pressão e de 1,28% para vazão.

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

Pressão	Erro absoluto de pressão		Pressão	Erro absoluto de vazão	
	Média	Desvio padrão		Média	Desvio padrão
Rampas			Rampas		
8 mca	0.0603	0.1492	8	0.0966	0.0307
10 mca	0.0781	0.0599	10	0.0475	0.0378
12 mca	0.0892	0.2825	12	0.0877	0.017
15 mca	0.0425	0.5571	15	0.0692	0.6379
Média	0.067525	0.262175	Média	0.07525	0.18085

3.4 Acréscimo de um Sensor de Pressão ao Sistema

Neste experimento, foi acrescentando um sensor de pressão à montante (aspiração) da bomba. Foram utilizados os valores encontrados pelo estimador de parâmetros obtidos no teste anterior. No entanto, não houve convergência dos três 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. 11 ilustra a curva comparativa entre a pressão obtida pelo gêmeo digital *versus* obtida através do sensor físico e a Fig. 12 representa a estrutura associada ao teste em questão.

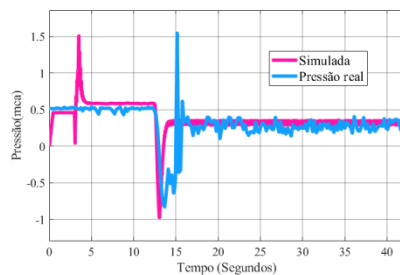


Figura 11. Pressão de aspiração: Digital Versus real

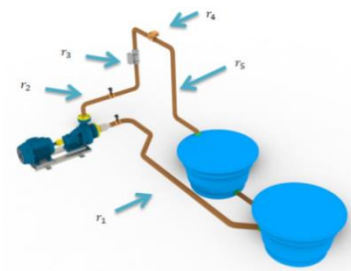


Figura 12. Representação da tubulação

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 a parte. Assim, foram utilizadas cinco rugosidades $r_1 = 0.0011096$ mm; $r_2 = 0.053826$ mm; $r_3 = 0.00147$ mm; $r_4 = 0.0014812$ mm e $r_5 = 0.0049323$ mm, todas associadas a Fig. 12. Os ajustes de perda de carga estão sendo obtidos ajustando as rugosidades de cada encanação para obtenção de convergência entre os 3 sensores. 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 obtido para os sensores com a válvula totalmente aberta foi de 2% e de 0,93% para pressões de aspiração e recalque respectivamente. Para a vazão foi obtido um erro médio de 3%. A Tabela 5 contém todos os valores obtidos a partir de considerações pertinentes.

Tabela 5. Erro médio de pressão e vazão na condição de controle de velocidade, adição do sensor de pressão na aspiração e válvula aberta.

Frequência (0°)	Erro absoluto de pressão na aspiração		Pressão recalque (0°)	Erro absoluto de pressão		Frequência (0°)	Erro absoluto de vazão	
	Média	Desvio padrão		Média	Desvio padrão		Média	Desvio padrão
Rampas			Rampas			Rampas		
0 a 30 Hz	0.0153	0.0781	0 a 30 Hz	0.0326	0.0856	0 a 30 Hz	0.3781	0.616
0 a 35 Hz	0.00078	0.0813	0 a 35 Hz	0.0053	0.0935	0 a 35 Hz	0.3856	0.0383
0 a 40 Hz	0.0206	0.111	0.40 Hz	0.0974	0.1724	0 a 40 Hz	0.3898	0.0214
0 a 45 Hz	0.0223	0.0248	0 a 45 Hz	0.0186	0.0752	0 a 45 Hz	0.4365	0.0264
Média	0.014745	0.0738	Média	0.038475	0.106675	Média	0.3975	0.175525

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 para pressão de recalque, aspiração foi de respectivamente 0,47%, 0,9% e 3,5% para vazão. A Tabela 6 contém os dados relativos aos testes e a Fig. 13, Fig. 14 e Fig.15 ilustram as situações de controle obtidas com os testes.

Tabela 6. Erro médio de pressão e vazão na condição de controle de velocidade, adição do sensor de pressão na aspiração e válvula semiaberta.

Frequência (45°)	Erro absoluto de pressão na aspiração		Pressão recalque (45°)	Erro absoluto de pressão		Frequência (45°)	Erro absoluto de vazão	
	Média	Desvio padrão		Média	Desvio padrão		Média	Desvio padrão
Rampas			Rampas			Rampas		
0 a 30 Hz	0.0045	0.0417	0 a 30 Hz	0.0163	0.0641	0 a 30 Hz	0.2006	0.0231
0 a 35 Hz	0.0093	0.0483	0 a 35 Hz	0.022	0.0717	0 a 35 Hz	0.2113	0.0183
0 a 40 Hz	0.0027	0.2903	0.40 Hz	0.0791	0.0894	0 a 40 Hz	0.1372	0.0174
0 a 45 Hz	0.0078	0.3009	0 a 45 Hz	0.0627	0.907	0 a 45 Hz	0.2202	0.0316
Média	0.006075	0.1703	Média	0.04503	0.28305	Média	0.192325	0.0226

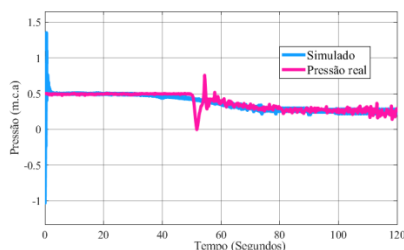


Figura 13. Pressão de aspiração: Digital versus real.

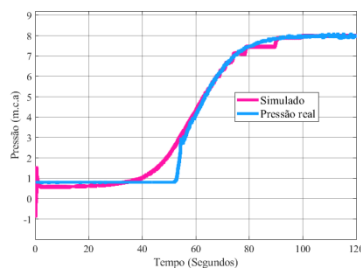


Figura 14. Pressão: Digital versus Real

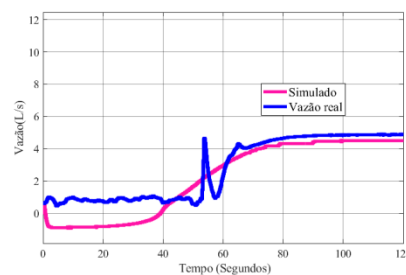


Figura 15. Vazão: Digital versus real

Foram utilizados os mesmos valores de perda de carga de quando se foram considerados apenas dois sensores. Entretanto, a convergência foi superior com a adoção dos três sensores. Os valores obtidos para perda de carga 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. Em relação ao erro obtido, a média foi de 1,21% para pressão de aspiração; 0,232% para pressão no recalque e de 3,5% para a vazão. A Tabela 7 contém os dados relativos aos testes.

Tabela 7. Erro médio de pressão e vazão na condição de controle de pressão do sistema e adição do sensor e pressão na aspiração

Pressão	Erro absoluto de pressão na aspiração		Pressão	Erro absoluto de pressão		Pressão	Erro absoluto de vazão	
	Média	Desvio padrão		Média	Desvio padrão		Média	Desvio padrão
Rampas			Rampas			Rampas		
8 mca	0.0041	0.0376	8 mca	0.0239	0.0488	8 mca	0.1991	0.0145
10 mca	0.0053	0.0516	10 mca	0.0395	0.0671	10 mca	0.1984	0.0412
12 mca	0.0069	0.0695	12 mca	0.0187	0.0584	12 mca	0.2652	0.016
15 mca	0.0032	0.0605	15 mca	0.0233	0.0566	15 mca	0.107	0.0092
Média	0.004875	0.0548	Média	0.02635	0.057725	Média	0.192425	0.020225

Para finalização do estudo, foi realizada uma calibração do sistema analisado 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). Para fins de efeitos comparativos, foi utilizada a simulação estática considerando três sensores de pressão e um de vazão em três cenários (Bomba desligada, ligada a velocidade de 30 Hz e válvula semi-aberta). Como referência utilizou-se um algoritmo de otimização genética para calibração dos valores de rugosidade, comparando as técnicas de mensuração indireta via EPANET e Gêmeo Digital. Os resultados obtidos estão contidos na Tabela 8 e evidenciou que o Gêmeo Digital é mais uma opção eficiente para mensuração indireta da rugosidade.

Tabela 8. Comparativo de rugosidade com o EPANET.

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

4 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi estimar a rugosidade em tubulações que compuseram um sistema típico de abastecimento de água utilizando a técnica de algoritmo reflexivo da região de confiança associado ao gêmeo digital (tecnologia vertente da Indústria 4.0) como alternativa aos tradicionais meios de mensuração atuais. Foram realizados diversos experimentos e diversos resultados que corroboraram com a eficiência das técnicas apresentadas. No cenário de controle de pressão com dois sensores, obteve-se um erro médio de 0,6% e 1,3% para pressão e vazão respectivamente e, com o acréscimo do terceiro sensor, foi verificado que o erro associado à pressão foi reduzido para 0,2% e o de vazão elevado para 3,5%. Para o cenário com a válvula proporcional totalmente aberta e com apenas dois sensores, o erro médio de pressão obtido foi de 3,6% e de 1,7% para vazão. Quando foi adicionado o terceiro sensor, o erro médio de vazão elevou-se para 3,53% e 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 o erro de pressão de 0,9% e de vazão em 1,32%. Para a condição de apenas dois sensores, os valores obtidos foram de 0,47% e 3,5% para a pressão e vazão respectivamente. Foi observado que o acréscimo de um sensor de pressão na montante (aspiração) reduziu o erro para o sensor de pressão do recalque. No entanto, houve um aumento do erro em relação à vazão. 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 dos dois métodos.

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 terceiro sensor ao cenário, esperava-se obter uma modelagem mais robusta do sistema e erros menores e, de certa forma, o erro de pressão no recalque foi reduzido. Observou-se que a perda de carga mais baixa não favorece a calibração em sensores de vazão e isso se deve a um maior erro relativo à vazão. Também foi observado que o ajuste de perda de carga facilitou a estimação de rugosidade quando foi adotada a análise em cada tubulação (cano) separadamente. Com a média das aquisições o sinal de vazão ficou mais estável, e com isso observou-se que o sistema possuiu uma maior robustez em regime estacionário. A previsibilidade antes no transiente da velocidade na variável vazão não é eficiente apenas quando se adota o sensor de vazão. Mesmo assim, com o método utilizado neste artigo conseguiu-se estimar a rugosidade dos canos utilizando gêmeo digital com erros menores que 5%, o que contribui para os projetistas uma nova perspectiva na calibração de tubulações. Abre-se a oportunidade de obtenção de técnicas para estimação da rugosidade dispensando a utilização de instrumentos invasivos de medição.

Como sugestão de trabalho futuro, existe a possibilidade de testes no sistema a fim de verificar se as técnicas descritas neste trabalho sejam capazes de detectar furtos de água. Outra possibilidade é a otimização da técnica visando eficiência energética. Também é possível a utilização de outros tipos de algoritmos (redes neurais artificiais, por exemplo) para solução de estimação das rugosidades promovendo comparações com as técnicas aqui apresentadas.

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>.*
- 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>.

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

Lansey, 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

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. Volume: 03 Issue: 01 | Jan-2016. 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.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores Oliveira. A. L. M. B., S. Gomes. H.P., Villanueva, J. M.M., Lima. R.P.G e Flores. T. K. S. são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

RUGOSITY ESTIMATION N WATER SUPPLY SYSTEMS USING THE DIGITAL TWIN AND TRUST REGION REFLECTIVE ALGORITHM.

Anne Louise Matos Barão Oliveira, annelf14@gmail.com¹

Heber Pimentel Gomes, heberp@uol.com.br¹

Juan Mauricio Villanueva, jmauricio@cear.ufpb.br¹

Robson Pacífico Guimarães Lima, robsonpacifico@gmail.com¹

Thommas Kevin Sales Flores, thommas.flores@cear.ufpb.br¹

¹Federal university of Paraíba - UFPB, Campus I, Technology Center, Cidade Universitaria, João Pessoa - PB, 58051-900.

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. The literature assumes wide ranges of values for absolute roughness, making it difficult for designers to make a decision. Hydraulic sizing 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. Field estimation methods using scanning electron microscopes and benchtop rugosimeters are invasive techniques that can compromise the physical integrity of the pipeline. The present article consists in the creation of a digital twin applied to a pilot water supply system to estimate the roughness in pipes. The digital twin was modeled from the characteristics of the electric motor, pump and frequency inverter, valve and connecting hydraulic components of the real system. A parameter estimator was used, which, through the trust region reflective optimization algorithm, changes the roughness values and local losses of the pipeline, thus seeking to minimize the error between the pressure and flow sensors. real and virtual. To achieve the objective of this work, experiments were carried out in twenty-four possible scenarios with speed and pressure control of the system. The results obtained show the maximum tracking error of five percent, demonstrating the effectiveness of the methodology and its applicability in larger scenarios.

Keywords: roughness, digital twin, optimization, water supply systems, parameter operation.