

Modelação Hidráulica de um Sistema de Adução para Apoio à Tomada de Decisão. Estudo de Caso: Sistema de Adução da Vila de Songo em Moçambique

Hélder René Eduardo Francisco¹ & Jaime Palalane²

Resumo: O sistema de abastecimento de água à Songo em Moçambique, construído na década de 70, beneficiou de um estudo entre 2011 e 2012, que resultou na proposta de ampliação da captação de 500 m³/h para 720 m³/h, para satisfazer 63.000 habitantes no horizonte do projeto, ano 2051. A definição das soluções não foi acompanhada da modelação hidrodinâmica do sistema de adução, para auxiliar nas operações da entidade gestora. Para suprir esse défice, desenvolveu-se o presente estudo que visou avaliar o comportamento hidráulico da operação do sistema de adução face ao incremento da demanda, usando o Epanet 2.2. A calibração do modelo foi satisfatória em 100% para o caudal e pressão, e a simulação da exploração futura indicou necessidade de garantir-se reserva inicial mínima de 25% da capacidade útil no centro distribuidor Norte e de 42% no centro distribuidor Sul durante meses de maior demanda. Na eventualidade de interrupção do sistema por 12 horas, o modelo indicou não ser possível satisfazer integralmente a demanda de projeto, independentemente da reserva inicial.

Palavras-Chave: Vila de Songo; Abastecimento de Água; Adução; Modelação Hidráulica; Epanet.

Abstract: The Songo water supply system in Mozambique, built in the 1970s, benefited from a study between 2011 and 2012, which proposed the expansion of the intake from 500 m³/h to 720 m³/h, to meet the needs of 63,000 inhabitants by the project's timeframe in 2051. The proposed solutions were not followed by the hydrodynamic modelling of the water transmission mains, to assist the management entity in its operations. To overcome this deficit, the present study was developed to evaluate the hydraulic behaviour of the operations due to increase in demand, using Epanet 2.2. The calibration of the model was 100% satisfactory for flow and pressure, and the simulation for the future scenario indicated the need of safeguard a minimum initial storage of 25% of the useful volume in the North distribution center and 42% in the South distribution center for months of higher demand. In the event of a 12-hour system interruption, the model indicated the impossibility to fully satisfy the project demand, regardless of the initial storage.

Keywords: Songo Village, Water Supply; Water Transmission Main; Hydraulic Modelling; Epanet.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água têm como uma das suas principais finalidades a satisfação da demanda de consumo da população, em quantidade e qualidade, contribuindo para a salvaguarda das condições de saúde pública e desenvolvimento industrial (Tsutiya, 2006). Estes sistemas são concebidos para horizonte temporal de 20 a 50 anos (Ravelo, 1997; Tsutiya, 2006; Sá Marques e Sousa, 2009), sendo comum adotar períodos de 20 anos (Ravelo, 1997; Tsutiya, 2006). Alguns dos seus componentes podem ser concebidos para implementação faseada, acompanhando o aumento da demanda (Ravelo, 1997). Concorre também para o faseamento o fato de que após alguns anos de funcionamento ou no fim da vida útil, comecem a identificar-se algumas deficiências, sendo maiores as associadas a rotura e fugas de água devido a deterioração da tubagem ou falta de abastecimento de áreas urbanas com rápido e desordenado crescimento (Tsutiya, 2006).

1) Hidroeléctrica de Cahora Bassa, S.A.; Universidade de Coimbra – FCT, Dep^{to} de Eng. Civil_ (+258) 84 616 7150 (helder.francisco@hcb.co.mz)

2) Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Engenharia - Av. Moçambique, Km 1.5 (ipalalane@gmail.com)

Para aglomerados populacionais com esta natureza de deficiência, Tsutiya (2006) remete para a necessidade de reabilitar as redes de transporte e distribuição de água mais antigas, assim como construir e ampliar os sistemas de abastecimento de água para satisfazer as novas demandas. Seguindo esta abordagem, o sistema de abastecimento de água à Vila de Songo (15°36'43.51"S; 32°46'21.99"E) foi objeto de estudo entre 2011 e 2012, para atender a novas demandas de água devido ao crescimento populacional e urbano. Este sistema foi implementado na década de 70 e é constituído (Figura 1) por uma captação na albufeira de Cahora Bassa; adução de água bruta; tratamento; adução de água tratada em dois estágios e dois centros distribuidores (Norte e Sul). As intervenções de ampliação da capacidade de adução obedeceram a cronologia da Figura 2, até um máximo de 17.280 m³/d, para abastecer cerca de 63.000 habitantes no horizonte do projeto, ano 2051. Durante os trabalhos de campo em 2020, apurou-se as seguintes características operativas:

- (i) Captação entre os níveis 295 m e 329 m, por 3 bombas submersíveis (bomba 1: KSB UPA 250-120/4c; bomba 2: KSB UPA 250B-120/4b, e bomba 3: KSB UPA 300-94/4a, com variador de velocidade). Combinação operacional: bomba 3 + 1 ou 2, e adutora até a ETA repartida em dois trechos: (1) trecho 1 de 60 m em aço com DN400, e (2) trecho 2 em duas tubagens paralelas de ferro fundido dútil (FFd), DN350, e extensão de 680 m cada. Descarga na ETA a cota 410 m.
- (ii) Elevação da ETA (EET1) à estação elevatória intermédia (EET2) através de duas condutas paralelas FFd-DN300, e extensão de 2,2km cada, por meio de 3 bombas em paralelo [KSB MTC-D 125-4 (bomba 1, com variador de velocidade), KSB WL 100/5 (bomba 2), e KSB WKF 100/5 (bomba 3)], com aspiração na cota 405,15m (reservatório: 400m³) e descarga na EET2 a cota 681,45m. Combinação operacional na EET1: bomba 1 + 2 ou 3. A EET2 também possuía 3 bombas em paralelo, de características iguais (KSB WL 100/5), para elevar água aos centros distribuidores Norte e Sul na cota 932m, através de duas condutas FFd-DN300, e extensão de 4,46km e 5,82km, respetivamente. A aspiração na EET2 está na cota 679 m (reservatório: 400m³), e a descarga nos centros distribuidores nas cotas 936 m (Norte) e 937 m (Sul).
- (iii) Centro distribuidor de água da zona Norte constituído por dois reservatórios metálicos e circulares de célula única de 1.000 m³ cada, totalizando um volume de 2.000 m³, e centro distribuidor da zona Sul constituído por dois reservatórios circulares de célula única, sendo um em betão armado com capacidade de 2.000 m³ e outro metálico com capacidade de 2.500 m³, totalizando um volume de 4.500 m³.

O projeto propôs a reformulação do circuito hidráulico da EET2, com bomba 1 dedicada ao centro distribuidor Norte; a bomba 3 dedicada ao centro distribuidor Sul, e bomba 2 em reserva de emergência que poderá alimentar alternadamente os dois centros distribuidores. Adicionalmente, propôs-se a construção de mais um reservatório de duas células com capacidade unitária de 2.500 m³ no centro distribuidor Norte e construção de mais um reservatório de célula única com capacidade de 2.500 m³ na zona Sul, passando cada centro distribuidor para a capacidade de 7.000 m³.

Após a análise do projeto, constatou-se que a definição das soluções para o sistema de adução não foi acompanhada da modelação dinâmica do comportamento hidráulico, quer para a situação atual, quer para a situação futura, por forma a auxiliar a entidade gestora nas suas operações através de uma rápida e eficaz análise de sensibilidade, sem interferir com o sistema em causa ou sujeitá-lo a modos de operação desconhecidos. Neste sentido, o presente trabalho visou desenvolver, calibrar e validar um modelo hidráulico do sistema de adução, para avaliar o seu comportamento dinâmico face a diferentes cenários futuros de exploração, como ferramenta de auxílio na tomada de decisão.

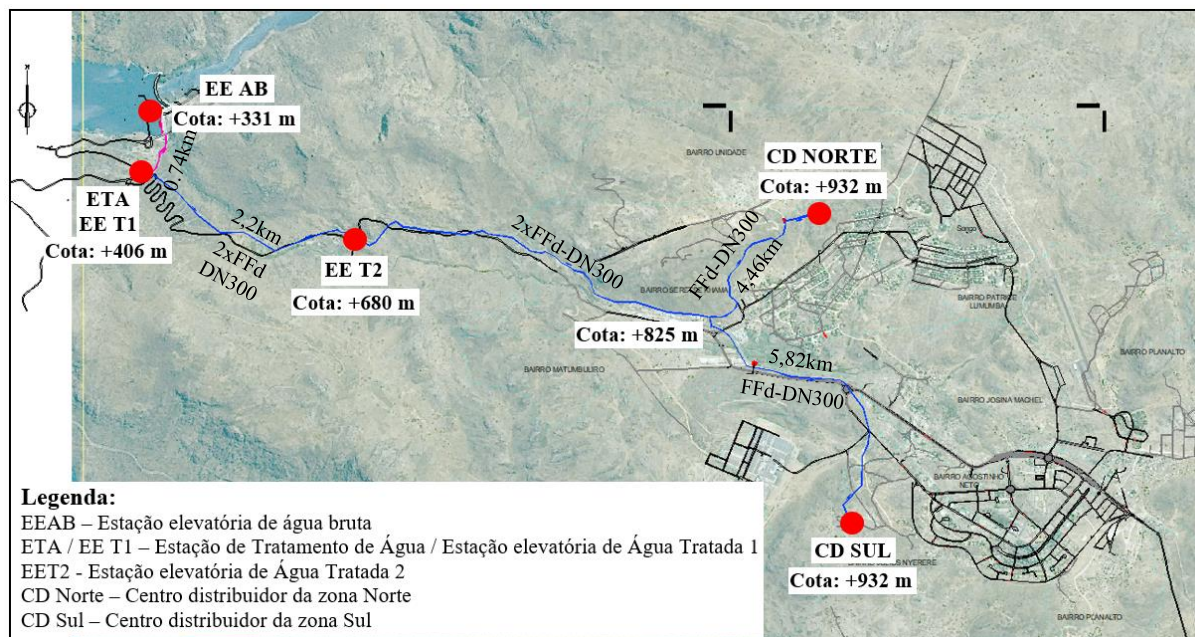


Figura 1 – Implantação do sistema de adução. Fonte: Hidroprojecto e Ingeróp Moçambique (2012)

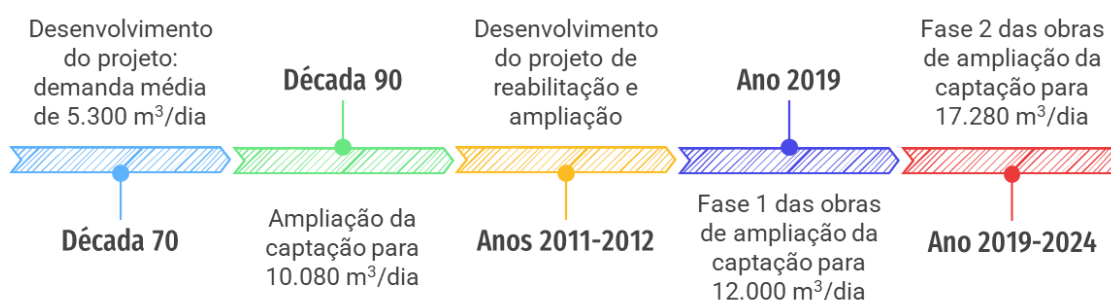


Figura 2 – Cronologia da ampliação do sistema de captação de água

2. MÉTODOS

2.1. Desenvolvimento do modelo

O modelo foi desenvolvido em Epanet 2.2 e seguiu as sete fases (Figura 3) propostas por Coelho *et al.* (2006). A informação para a caracterização física foi obtida das telas finais do sistema implantado e dos desenhos do projeto de ampliação de 2011-2012, com validação em campo. As características não-físicas foram obtidas do sistema de telegestão, e os dados operacionais (caudal, pressão, níveis nos reservatórios e consumo na rede de distribuição) foram recolhidos no dia 15 de Setembro de 2020, pelas 11 horas e 43 minutos, permitindo apenas uma calibração estática dos parâmetros caudal e pressão.

A simulação da exploração futura do sistema de adução foi analisada para dois cenários distintos: (i) consumo na rede de distribuição seguindo o padrão adotado para o projeto de ampliação, com fator de ponta horário de 2,2; e (ii) interrupção de 12 horas na adução (7 às 19 horas, período de maior consumo) devido a rotura da tubagem adutora por queda de rochas (situação já ocorrida).

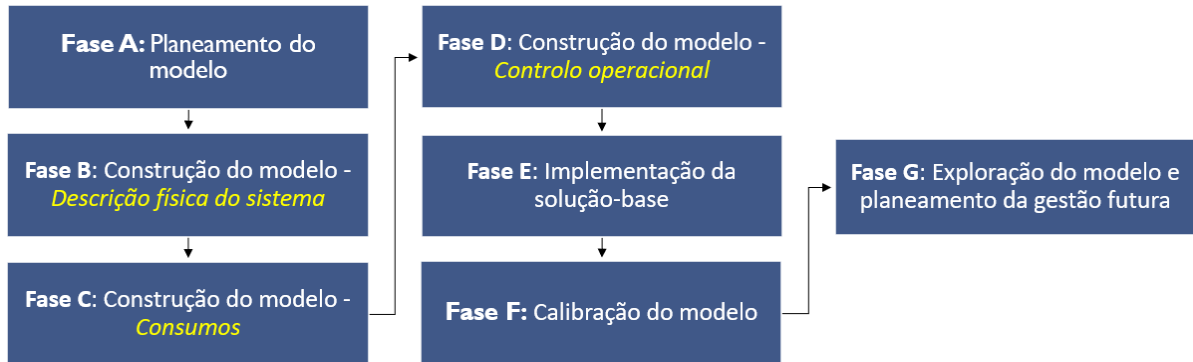


Figura 3 – Fases de desenvolvimento do modelo. Fonte: Coelho *et al.* (2006)

2.2. Técnica de modelação hidráulica

A modelação hidráulica no Epanet 2.2 foi baseada na resolução das equações de conservação de energia hidráulica, aplicada a um sistema elevatório, e de continuidade (equações 1 a 4), pelo “Método do Gradiente” (Rossman *et al.*, 2020).

Os nós de saída dos centros distribuidores, na simulação estática para calibração, foram modelados como dispositivos emissores de caudal (equação 5) e dependentes da demanda (*Demand Driven Analysis*). Nos cenários futuros, para melhor avaliar a capacidade do sistema atender a demanda, o caudal fornecido aos nós de consumo foi definido como dependente da pressão (*Pressure Driven Analysis*), através da equação 6.

$$H_m = H_2 - H_1 + \Delta H_c = H_2 - H_1 + J \cdot L \quad (1)$$

$$Q = U_1 \cdot A_1 = U_2 \cdot A_2 \quad (2)$$

$$J = 10,643 \cdot Q^{1,85} / (C_{HW}^{1,85} \cdot D^{4,87}) \quad (3)$$

$$Pot. = \gamma \cdot Q \cdot H_m / \eta \quad (4)$$

Onde: H_m - altura manométrica (m); H_1 e H_2 - energia hidráulica de montante e jusante (m); ΔH_c - perda de carga contínua (m); Q - caudal (m^3/s); U - velocidade média (m/s); A - área da secção (m^2); J - perda de carga unitária (m/m); L - comprimento da tubagem (m); C_{HW} - coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams ($m^{3/8}/s$); D - diâmetro interno do tubo (m); $Pot.$ - Potência da bomba (kW); γ - peso volúmico da água (kN/m^3), e η - rendimento da bomba (%).

$$Q = C_d \cdot P^\beta \quad (5)$$

Onde: Q - caudal (m^3/h); C_d - coeficiente de descarga ($m^3/h / m^{0,5}$), de acordo com Cobacho *et al.* (2014); P - pressão no nó (m.c.a), e β - expoente de emissão (-), que toma o valor de 0,5 para tubos metálicos (Cobacho *et al.*, 2014; Sebbagh *et al.*, 2018).

$$Q_i = \begin{cases} Q; & P \geq P_{req} \\ Q \cdot \left(\frac{P - P_{min}}{P_{req} - P_{min}} \right)^\omega; & P_{min} < P < P_{req} \\ 0; & P \leq P_{min} \end{cases} \quad (6)$$

Onde: Q - Demanda (m^3/h); Q_i - caudal fornecido (m^3/h); P - pressão disponível (m.c.a); P_{min} - pressão mínima para liberação de caudal (m.c.a); P_{req} - pressão requerida para a satisfação da demanda (m.c.a), e ω - expoente de pressão que toma o valor de 0,5.

2.3. Parâmetros de verificação na modelação e calibração

A perda de carga unitária foi limitada a 5 m/km (Smet e Van Wijk, 2002), e as perdas de carga localizadas não foram consideradas, segundo Dacach (1975) *apud* Sá Marques e Sousa (2009) para condutas longas ($L > 4000 \cdot DN$). O limite de velocidades de escoamento atendeu a legislação moçambicana (Decreto nº 30/2003), entre 0,7 m/s e $0,127 \cdot D^{0,4}$, D [mm].

A calibração seguiu o método iterativo, que é recomendado para sistemas simplificados, com poucos parâmetros de calibração (Walski *et al.*, 2003). O erro absoluto foi avaliado através da equação 7 (Rossman *et al.*, 2020) e os critérios de aceitação obedeceram as recomendações de Walski *et al.* (2003).

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=N} (E_i - O_i)^2} \quad (7)$$

Onde: ε - erro absoluto; E_i - valor simulado; O_i - valor observado, e i - número de observações. O erro absoluto aceitável é (Walski *et al.*, 2003): (i) cota piezométrica ou pressão: < 1,5 m; (ii) nível de água no reservatório: < 1,0 m; (iii) diferença volumétrica nos reservatórios em dois intervalos consecutivos: < 5% do volume útil, e (iv) caudal: < 10%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Calibração do modelo para o cenário-base

Os resultados do cenário-base, $C_{HW} = 120 \text{ m}^{3/8}/\text{s}$, apresentaram significativos desvios em relação as observações (caudal: até 52%, e pressão: até 30,7 m.c.a). Os parâmetros sensíveis na calibração foram: (i) EEAB-EET1: velocidade de rotação da bomba 2 na EEAB (102%); (ii) EET1-EET2: C_{HW} ($90 \text{ m}^{3/8}/\text{s}$) e velocidade de rotação da bomba 2 na EET1 (90%); (iii) EET2-CD Norte: velocidade de rotação das 3 bombas (96%); (iv) C_d : $53,335 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^{0,5}$ (Norte) e $67,71 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^{0,5}$ (Sul).

O modelo calibrado (Figura 4) apresentou velocidade de escoamento nas principais tubagens (EEAB-EET1, EET1-EET2 e EET2-CD Norte/Sul) entre 0,6 e 0,99 m/s. Velocidades baixas foram verificadas na alimentação aos centros distribuidores, entre 0,6 e 0,68 m/s, ligeiramente abaixo da mínima recomendada de 0,7 m/s, e a velocidade máxima de 0,99 m/s foi registada na tubagem comum da EEAB, mas ainda abaixo da máxima recomendada de 1,32 m/s, para DN350. Perdas de carga unitárias variaram de 1,47 m/km (saindo da EEAB) à 5,15 m/km (+3%), saindo da EET1.

3.2. Análise e discussão do cenário 1

A pressão mínima foi condicionada pelo nível mínimo dos reservatórios Sul (1,26 m) e a pressão requerida foi condicionada pelos reservatórios Norte (1,5 m). Diferentes níveis iniciais nos reservatórios de distribuição foram considerados, com incrementos de 10% da amplitude de variação dos reservatórios, chegando-se a solução satisfatória com níveis mínimos de 1,5 m (25% do volume útil) no Norte e 1,93 m (42% do volume útil) no Sul. Nas tubagens principais e de referência do sistema de adução, T-08 (DN400), T-09 (DN350), T-25, T-37 e T-46 (DN300), as velocidades de escoamento foram de 1,59 m/s ($U_{\text{máx}}$: 1,39 m/s), 1,04 m/s ($U_{\text{máx}}$: 1,32 m/s), 1,35 m/s, 1,42 m/s e 1,37 m/s ($U_{\text{máx}}$: 1,24 m/s), e as perdas de carga unitárias foram de 6,63 m/km, 3,52 m/km, 11,64 m/km, 7,52 m/km e 7,04 m/km, respetivamente ($J_{\text{máx}}$: 5 m/km). Os resultados mostraram que para a exploração futura, apenas a tubagem T-09 apresenta perda de carga unitária dentro do recomendado de 5 m/km e velocidade dentro da admissível para o DN350 (figura 5 a 7).

3.3. Análise e discussão do cenário 2

Na interrupção do fornecimento de água aos reservatórios de distribuição por 12 horas, das 7 as 19 horas, nas condições iniciais da solução do cenário 1 (Figura 8), os resultados do modelo mostram que os reservatórios de distribuição de água do Norte atingem o seu nível mínimo de operação as 10 horas e mantendo-se abaixo do requerido até 20 horas (10 horas de déficit). Os reservatórios Sul atingem o seu nível mínimo também as 10 horas, mantendo-se com níveis abaixo dos requeridos até as 21 horas (11 horas de déficit). Avaliação feita para interrupção do fornecimento de água em um dia iniciado com reservatórios cheios (Figura 9), o modelo sugere que os reservatórios de distribuição de água do Norte apresentam déficit no fornecimento de 5 horas (15 as 20 horas) e, Sul de 6 horas (15 as 21 horas).

4. CONCLUSÃO

O modelo hidráulico construído sugere que para caudais de ponta de projeto, no geral, as velocidades e perdas de carga unitárias estejam acima do intervalo recomendado, com exceção da tubagem T-09 (DN350). Para o cenário 1 de exploração futura, sugere-se que no início de cada dia de operação do sistema deverá ser garantido um armazenamento mínimo de 25% do seu volume útil no Norte e 42% no Sul, para os meses de maior demanda. Para o cenário 2, independentemente do armazenamento inicial, conclui-se que não é possível satisfazer a demanda de projeto, contudo, é possível reduzir as horas de déficit (de 10 para 5 horas) iniciando o dia com o pleno armazenamento nos reservatórios. Os resultados alcançados sugerem que a reserva de água prevista para os centros distribuidores não contempla a componente de emergência, e que os volumes mínimos iniciais, estimados no cenário 1, tornar-se-ão imperiosos nos meses de maior demanda.

A abordagem metodológica adotada na análise hidrodinâmica do sistema adutor, para cenários futuros, considerando consignas de caudal na rede de distribuição dependentes da pressão no reservatório, permite melhor avaliar a resposta e sensibilidade do mesmo às flutuações do armazenamento e da demanda, quando comparado com a assunção da satisfação integral da demanda, independentemente da pressão disponível. A metodologia é replicável para sistemas similares, bastando observar os níveis mínimos operacionais dos reservatórios envolvidos e requisitos regulatórios para a pressão requerida.

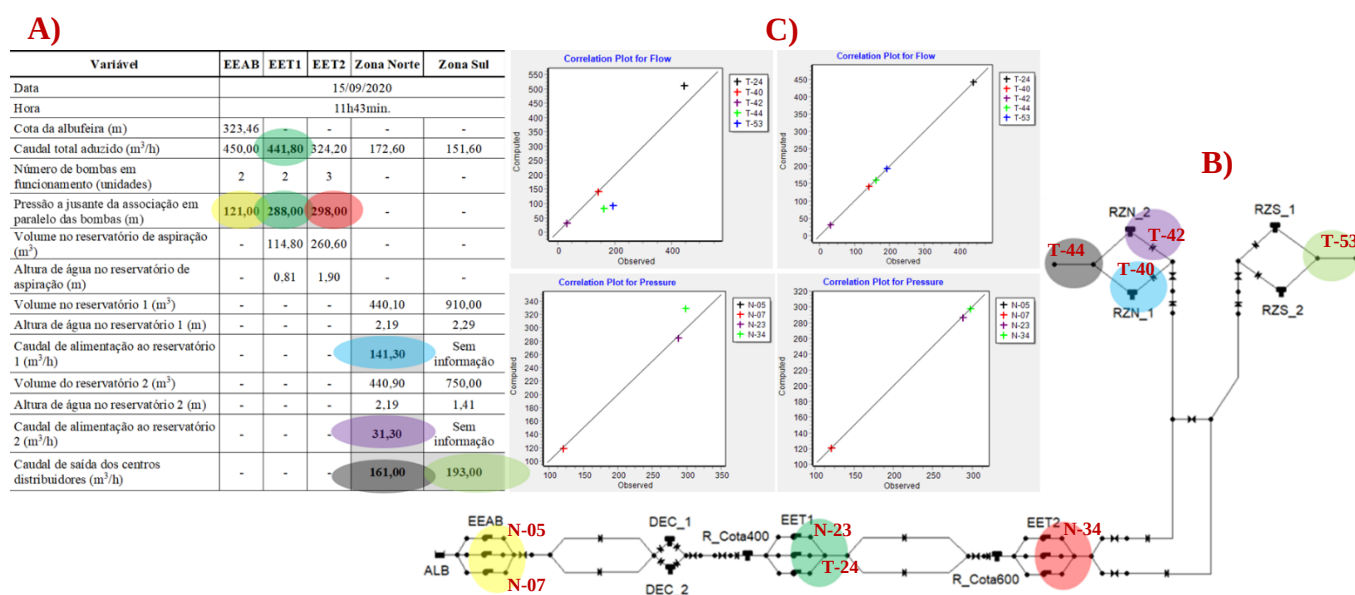


Figura 4 – (a) Pontos de calibração e dados observados, (b) esquema do sistema e (c) resultados

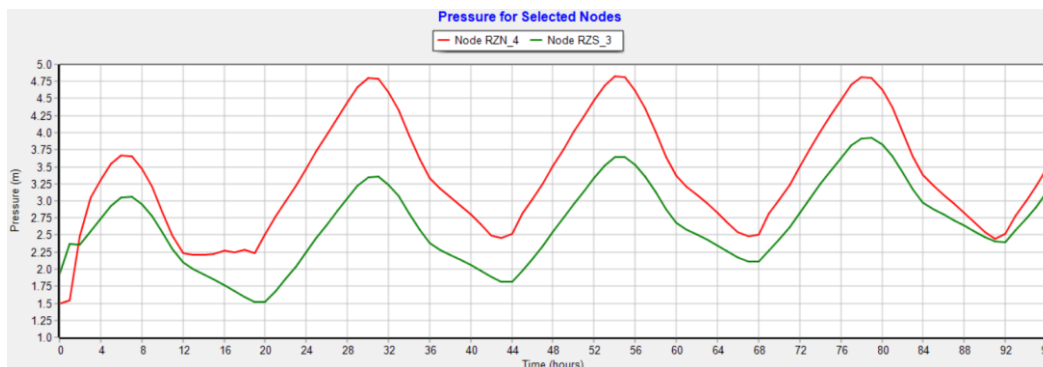


Figura 5 - Nível de água nos Reservatórios Norte (vermelho) e Sul (verde) para o incremento de 20% da amplitude

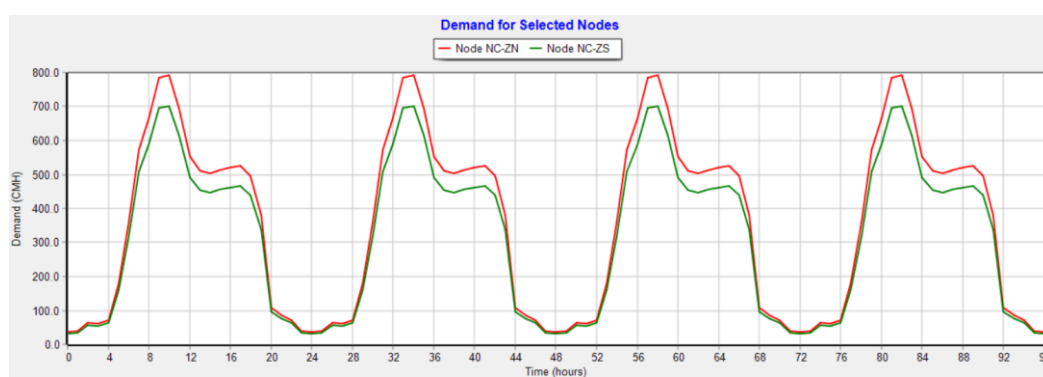


Figura 6 – Caudais fornecidos pelos reservatórios Norte (vermelho) e Sul (verde) para o incremento de 20%

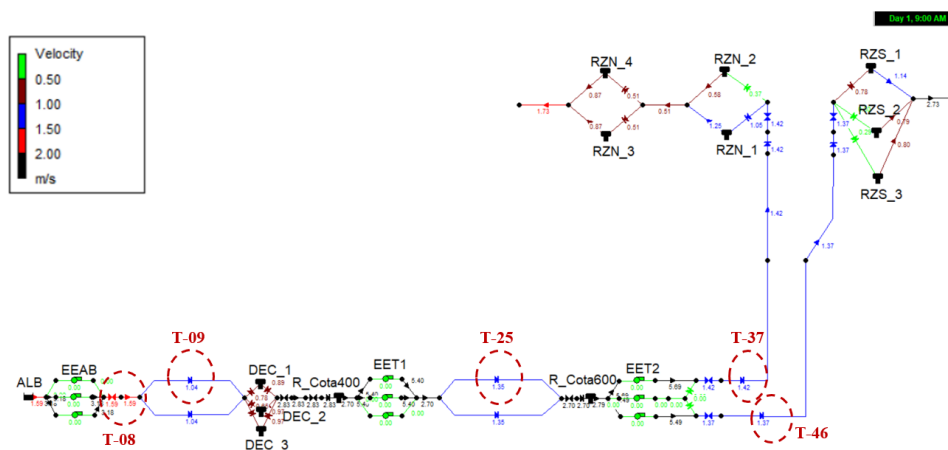


Figura 7 – Velocidade de escoamento nas tubagens – cenário 1

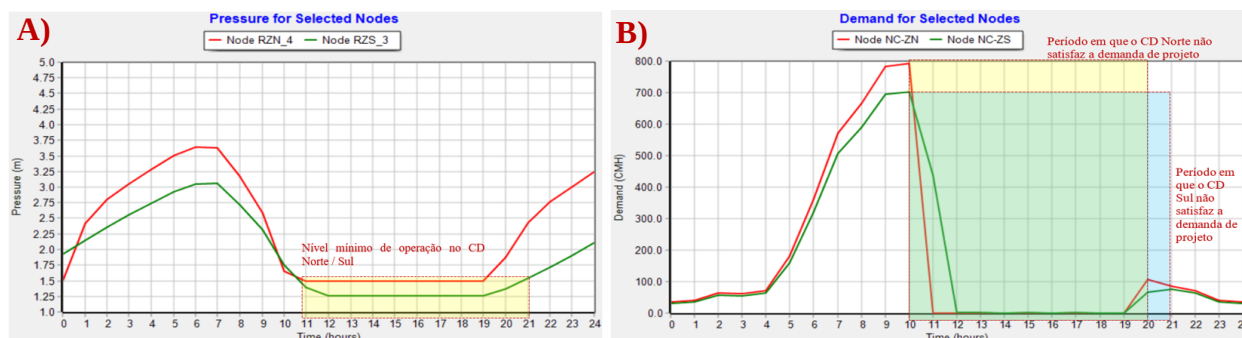


Figura 8 – (a) Nível de água nos reservatórios Norte e Sul e (b) caudal distribuído pela rede – cenário 2

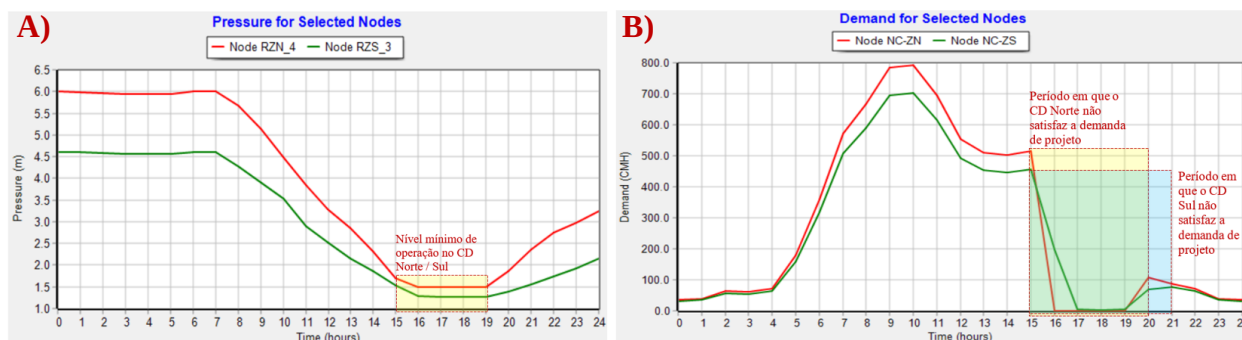


Figura 9 - (a) Nível de água nos reservatórios Norte e Sul e (b) caudal distribuído pela rede – cenário 2, reserva plena

REFERÊNCIAS

- COBACHO, R.; ARREGUI, F.; SORIANO, J.; CABRERA Jr., E. (2014). "Including leakage in network models: an application to calibrate leak valves in EPANET." *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*. 64(2):130-138. doi:10.2166/aqua.2014.197.
- COELHO, S. T.; LOUREIRO, D.; e ALEGRE, H. (2006). "Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água – Série Guias Técnicos 4." Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Decreto nº 30/2003. "Regulamento dos Sistemas Públicos de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais". De 01 de Julho de 2003.
- FRANCISCO, H. R. E. (2023). "Modelação Hidráulica de um Sistema de Adução Para Apoio à Tomada de Decisão. Estudo de Caso: Sistema de Adução da Vila de Songo". Dissertação de Mestrado. Universidade Eduardo Mondlane.
- HIDROPROJECTO e INGERÓP MOÇAMBIQUE (2012). "Reabilitação dos Sistemas de Distribuição de Água Potável e de Drenagem de Água Residual da Vila do Songo e sua Expansão aos Bairros Periféricos. Projecto da Rede de Distribuição de Água." Hidroeléctrica de Cahora Bassa, Songo, Moçambique.
- RAVELO, S. A. (1997). "Abastecimientos De Agua. Teoría & Diseño." 3ª Edición. Venezuela: Editorial Innovación Tecnológica (EdIT). Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. ISBN 84-399-8064-7.
- ROSSMAN, L.; WOO, H.; TRYBY, M.; SHANG, F.; JANKE, R.; & HAXTON, T. (2020). "EPANET 2.2 User Manual." United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- SÁ MARQUES, J.; SOUSA, J. (2009). "Hidráulica Urbana. Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais." 2ª Edição. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra. ISBN 978-989-8074-65-2.
- SEBBAGH, K.; SAFRI, A.; ZABOT, M. (2018). "Pre-Localization Approach of Leaks on a Water Distribution Network by Optimization of the Hydraulic Model Using an Evolutionary Algorithm." 3rd EWaS International Conference on "Insights on the Water-Energy-Food Nexus", Lefkada Island, Greece, 27–30 June 2018.
- SMET, J.; VAN WIJK, C. (eds.) (2002). "Small Community Water Supplies: Technology, People and Partnership." Delft, the Netherlands. IRC International Water and Sanitation Centre (Technical Paper Series 40). ISBN: 90-6687-035-4.
- TSUTIYA, M. T. (2006). "Abastecimento de Água." 3ª Edição. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. ISBN 85-900823-6-9.
- WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SAVIC, D. A.; GRAYMAN, W.; BECKWITH, S.; & KOELLE, E. (2003). "Advanced Water Distribution Modeling and Management." First Edition, Second Printing. Haestad Methods. Haestad Press, United States of America. ISBN: 0-9714141-2-2.