

Avaliação das perdas de água em redes de distribuição: Município de Chimoio, Moçambique

Assessment of water losses in distribution networks: Municipality of Chimoio, Mozambique

Evaluación de pérdidas de agua en redes de distribución: Municipio de Chimoio, Mozambique

Recebido: 27/03/2022 | Revisado: 01/04/2022 | Aceito: 15/04/2022 | Publicado: 19/04/2022

António Khanlawia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7735-6361>
Universidade Zambeze, Moçambique
E-mail: tony.khanlawia@gmail.com

Gonzaga Chilole

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4213-2699>
Universidade Zambeze, Moçambique
E-mail: chilole18@gmail.com

Luís Cristóvão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0854-8102>
Universidade Zambeze, Moçambique
E-mail: lumecristovao@gmail.com

Resumo

A água é vital para a sobrevivência humana, saúde e dignidade. No entanto, os recursos de água doce estão sob pressão crescente devido ao aumento do crescimento populacional e aumento de atividades económicas. Os sistemas de abastecimento de água, por sua complexidade e especificidade, introduzem um determinado grau de perda da produção. Por isso, em Moçambique, verifica-se uma grande preocupação da companhia de distribuição de água e dos investigadores na busca de soluções para implementação de processos operacionais que minimizem as perdas de água. Assim, a pesquisa teve como objetivo avaliar as perdas de água na rede de abastecimento no Município de Chimoio, Bairro 25 de Junho. O estudo baseou-se na determinação do balanço hídrico, modelação hidráulica e sua calibração, utilizando o Software Epanet 2.0. Os resultados obtidos indicam que o índice de perdas de água na rede de abastecimento foi de 25% e as perdas influenciaram de uma forma significativa nas variáveis pressão e caudal.

Palavras-chave: Calibração; Epanet; Hidráulica; Pressão; Perda de água.

Abstract

Water is vital for human survival, health and dignity. However, freshwater resources are under increasing pressure due to increasing population growth and increasing economic activities. Water supply systems, due to their complexity and specificity, introduce a certain degree of production loss. Therefore, in Mozambique, there is a great concern of the water distribution company and the researchers in the search for solutions for the implementation of operational processes that minimize water losses. Thus, the research aimed to evaluate water losses in the supply network in the Municipality of Chimoio, Zone 25 de Junho. The study was based on the determination of the water balance, hydraulic modeling and its calibration, using the Epanet 2.0 Software. The results obtained indicate that the rate of water losses in the supply network was 25% and losses significantly influenced the pressure and flow variables.

Keywords: Calibration; Epanet; Hydraulic; Pressure; Water loss.

Resumen

El agua es vital para la supervivencia humana, la salud y la dignidad. Sin embargo, los recursos de agua dulce están bajo una presión cada vez mayor debido al aumento de la población y al aumento de las actividades económicas. Los sistemas de abastecimiento de agua, por su complejidad y especificidad, introducen un cierto grado de pérdida de producción. Por lo tanto, en Mozambique existe una gran preocupación de la empresa distribuidora de agua y de los investigadores en la búsqueda de soluciones para la implementación de procesos operativos que minimicen las pérdidas de agua. Así, la investigación tuvo como objetivo evaluar las pérdidas de agua en la red de abastecimiento del Municipio de Chimoio, Bairro 25 de Junho. El estudio se basó en la determinación del balance hídrico, modelado hidráulico y su calibración, utilizando el Software Epanet 2.0. Los resultados obtenidos indican que la tasa de pérdidas de agua en la red de abastecimiento fue del 25% y las pérdidas influyeron significativamente en las variables de presión y caudal.

Palabras clave: Calibración; Epanet; Hidráulica; Presión; Pérdida de agua.

1. Introdução

A gestão dos recursos hídricos é um desafio ambiental crítico que a humanidade enfrenta atualmente. No entanto, a sustentabilidade da água é essencial para alcançar muitos dos ODS, particularmente os objetivos (3, 6, 7, 11, 14, 15 e 17), mas está interligada a todos. A disponibilidade de água é de vital importância para segurança alimentar e energética, o crescimento econômico e a sustentação das pessoas. No entanto, os recursos de água doce estão sob pressão crescente devido ao aumento do crescimento populacional, aumento de atividades econômicas, levando assim a uma maior concorrência de conflitos sobre os recursos limitados de água doce. Em Moçambique, 73% da água consumida é utilizada para fins agrícolas. O setor Municipal consome 25% e os restantes são destinados à indústria (Nordström, 2019). No entanto, à medida que o país persegue sua política de industrialização, espera-se que haverá aumento da demanda por água para atender às necessidades de produção. A alta dependência do país sobre os recursos hídricos partilhados é um fator importante na vulnerabilidade hídrica nacional. Atualmente, o acesso à água potável básica no país é de 45%, 78% nas áreas urbanas e 30% nas rurais (Banco Mundial, 2018). Os serviços de água rurais, apesar de muitas reformas importantes, permanecem frágeis, não tendo progredido muito além da opção de tecnologia básica da bomba manual.

No sistema de abastecimento de água urbano, as perdas são um dos maiores problemas no país, chegando a níveis de 53%, PAIRP (2019). A compreensão da dimensão do problema das perdas de água passa por uma visão das principais fases de um sistema de abastecimento de água. Todas as unidades de um sistema de abastecimento de água (captação, elevação, adução, tratamento, reserva e distribuição) são locais passíveis de perdas, mas as perdas de água devem ser reduzidas aos níveis econômicos mais baixos para que as concessionárias de água operem de forma sustentável. Além dos danos financeiros e ambientais, as perdas de água na distribuição geram sérios problemas para a operação do sistema de abastecimento. A importância de reduzir as perdas de água como componente da gestão de recursos hídricos é evidente na crise de governança da água, a necessidade de garantir água para as pessoas, a necessidade de garantir água para a produção de alimentos, a necessidade para proteger o ecossistema e outros usos, como geração de energia hidrelétrica (Gumbo, 2004).

Nos últimos anos, a questão das perdas de água nos sistemas de abastecimento tem sido o foco de uma ampla discussão no meio técnico-científico. A tecnologia dos sistemas evoluiu em maior escala na produção e tratamento de água, e menos nos sistemas de distribuição e nas ações de desenvolvimento operacional. Atualmente, entende-se que as perdas de água devem ser tratadas e geridas com medidas preventivas, melhorando os procedimentos de manutenção e operação das redes de distribuição, além de envolver também um programa de mudança cultural, desde o usuário até o funcionário da empresa, levando a uma tomada de decisão que se configure como uma estratégia empresarial.

Em Moçambique, a medida que a população cresce, juntamente com outros fatores como níveis crescentes de urbanização e os efeitos das mudanças climáticas, a importância da água no desenvolvimento econômico e social está sendo cada vez mais reconhecida. Em 1998, o Governo de Moçambique adotou uma reforma institucional abrangente em prol do desenvolvimento, prestação e regulamentação dos serviços de abastecimento de água urbano. O novo enquadramento legal foi inaugurado com a criação da entidade responsável pela gestão do património, FIPAG e uma autoridade reguladora independente, o CRA (Banco Mundial, 2009).

Recentemente, a Cidade de Chimoio está a sofrer uma expansão urbana e um crescimento populacional drástico, levando à expansão não planejada das suas infraestruturas de rede de abastecimento de água. Os sistemas de distribuição de água são operados em regime intermitente. Apesar do desenvolvimento de muitas pesquisas em estratégias de gerenciamento de perda de água (Tucciarelli, 1999; Alegre et al., 2000; Todini, 2003; Jury & Vaux, 2005; Heller & Lúcio, 2006; Turner & White, 2006; Rego, 2007; Marques & Sousa, 2011; Willis, 2011; Santos, 2012; Coelho et al., 2017), existem limitações de

conhecimento sobre as perdas de água no Município de Chimoio. Assim, o objetivo da presente pesquisa está centrado em avaliar as perdas de recurso hídrico na rede de distribuição de água no Bairro 25 de Junho, pelo que, os seus efeitos abrangem todo o sistema de abastecimento de água da cidade de Chimoio.

2. Metodologia

2.1 Balanço hídrico no Sistema de Abastecimento de Água

O balanço hídrico do sistema foi realizado na base da metodologia da matriz proposta pelo Associação Internacional da Água (AIA), Quadro 1. Os dados foram compostos por variáveis dependentes e independentes de acordo com Lakatos e Marconi (2003).

Quadro 1. Matriz do balanço hídrico aplicado ao sistema atual (volume em m³/dia).

Balanço Hídrico Simplificado		
A	B	C
Água que entra no reservatório (Volume Disponibilizado) (m ³ /ano)	Consumo autorizado (m ³ /ano)	Consumo autorizado faturado (m ³ /ano)
		Consumo autorizado não-faturado (m ³ /ano)
	Perdas de água (m ³ /ano)	Perdas aparentes (m ³ /ano)
		Perdas reais (m ³ /ano)

Fonte: AIA (2000).

As perdas reais e perdas aparentes foram determinadas através da diferença entre o volume de entrada e volume autorizado. O balanço hídrico no sistema foi realizado através da equação (1) e (2):

$$\text{Consumo autorizado} = \text{Consumo autorizado faturado} + \text{Consumo autorizado não faturado} \quad (1)$$

$$\text{Perdas de água} = \text{Perdas Reais} + \text{Perdas Aparentes} \quad (2)$$

O volume de entrada no sistema de abastecimento foi determinado através do somatório das leituras tiradas no micromedidor num período de 47 dias (1 de Novembro de 2018 á 2 de Janeiro de 2019). O consumo autorizado foi considerado como sendo igual ao volume micromedido junto ao consumidor final, na rede de distribuição.

2.2 Modelação Hidráulica do sistema de Abastecimento de Água

Na presente pesquisa, a modelação do sistema de abastecimento de água foi realizada pelo modelo Epanet (modelação matemática). As informações referentes a topologia e a geometria da rede de abastecimento de água da Cidade de Chimoio encontram-se cadastrado no software ArcMap 10.2, e para transferência dessa informação no ArcMap10.2 para o Epanet, foi numa primeira fase exportado para o CAD em formato DWD_R2004, por sua vez o mapa foi convertido para o formato DXF e com ajuda do EPACAD fez a conversão do formato DXF para o formato IND reconhecido pelo Epanet.

Os dados relativos a altimetria dos nós e o comprimento entre os nós, foram obtidos a partir da aquisição de coordenadas em UTM via GPS e convertidos no formato original do ESRI, *shape file* (shp), em ArcGIS para que fossem manipuláveis, e a posterior, a topologia da rede resultante em ArcMap 10.2 foi transladada para o Google earth.

Os principais parâmetros considerados na modelação são: carga hidráulica (m), caudal (l/s), Comprimento (m),

consumo (l/s), cota (m), diâmetro das condutas e válvulas (m), diâmetro dos reservatórios (m), perda de carga unitária (m/km), pressão (m.c.a) e a velocidade (m/s).

Caracterização da rede de abastecimento de água na área de estudo

O estudo incidiu sobre uma parte da rede de distribuição, na área de influência do reservatório CD 800, concretamente no Bairro 25 de Junho, considerou-se importante descrever de forma resumida a rede em toda área de influência, sendo posteriormente detalhada a zona específica em estudo, isto porque os parâmetros hidráulicos nos pontos de consumo na zona em estudo também são influenciados pelos consumos tanto do Bairro Nhamatsane assim como do bairro Piloto.

A área de estudo possui 1675 ligações de consumidores ativos, a rede conta com uma extensão total de 38728.9m das quais 20167m para o Bairro Piloto e 18561.9m para os Bairros Nhamatsane e 25 de Junho, as tubagens são 95% tubagens em PVC e 5% outro tipo de material (PE, HDPE e AC) com diâmetro compreendido entre 50 á 250mm. Relativamente ao seu traçado, classifica-se como uma rede mista, isto porque uma parte do seu traçado é malhado e outra é ramificado, Figura 1.

Figura 1. Rede de abastecimento de água do Bairro 25 de Junho.



Fonte: FIPAG (2018).

O Bairro 25 de Junho é abastecido por gravidade, com apenas um ponto de alimentação na parte mais alta, onde se localiza o reservatório. O reservatório de distribuição (CD 800) é classificado segundo a sua forma construtiva como do tipo térreo semienterrado (Figura 2) e está localizado no Bairro 25 de Junho mediante coordenadas 19° 06'34.30" S e 33° 27'51.67" E. As características do reservatório são: número de células é 1, capacidade total de 800 m³, cota de base de 720 m, cota em pleno armazenamento 724 m. Atualmente, o reservatório é operado entre os níveis 723m (mínimo) á 724m (máximo) em relação ao nível médio das águas do mar, o seu controle é garantido por um sensor de nível.

Figura 1. reservatório semienterrado CD 800.



Figura 2. Micromedidor de caudal.



Fonte: Autores.

Fez-se o levantamento de variáveis relativos ao caudal de entrada e de saída do reservatório, níveis mínimos e máximos de operação do reservatório (CD 800). Esses dados foram obtidos através de mapas de registos de caudais em m³/h, lidos através de micromedidor de caudais (contador ultra-sónico) a saída do reservatório (Figura 3).

Tipologia da rede de abastecimento de água

Com o objetivo de se perceber a variação altimétrica da zona em estudo, apresenta-se na Figura 4 o mapa de cotas topográficas da rede de distribuição. O mapa foi extraído do software Epanet 2.0, as cotas altimétricas da zona em estudo variam entre 600 m á 724 m.

Figura 4. Isolinhas de cotas topográficas da rede da zona de influência do reservatório CD 800.



Fonte: Autores.

2.3 Simulação do Modelo e Desempenho hidráulico da rede.

Calibração do modelo

O procedimento de calibração usada foi o iterativo e os parâmetros usados na calibração do modelo foram a pressão e o caudal, por serem os que melhor representam o comportamento hidráulico de um sistema de abastecimento de água (Pinto, 2010).

Crítérios de operação do sistema

Para alcançar os objetivos da pesquisa, foi necessário efetuar a simulação do modelo, utilizando a fórmula (3) de Hazen-Williams para o cálculo das perdas de carga (hf).

$$hf = \frac{10.7L}{C^{1.852} \cdot D^{4.87}} * Q^{1.852} \quad (3)$$

onde: C – coeficiente de rugosidade de Hazen William; Q – caudal em m³/s; L – comprimento da tubagem em m; D – diâmetro da tubagem, em m.

Para analisar o desempenho hidráulico do sistema de abastecimento de água, a simulação foi realizada no período em que se regista o maior e menor consumo, considerando a rede considerando as perdas de água existentes (Cenário 1) e considerando a rede a operar sem as perdas de água (Cenário 2).

3. Resultados e Discussão

3.1 Diagnostico de perdas na rede de abastecimento de água

O volume de água que entra no sistema foi determinado através da leitura do caudal de saída do reservatório, obtendo-se um valor de 39454.9m³/mês. O caudal foi estimado a partir de dados mensais de micromedição fornecidos pela empresa resultando em um valor de 29591.18 m³/mês. Assim, as perdas de água foram de 9863.72m³, correspondendo um índice de perdas de 25%. Parecia razoável esperar que a perda de água fosse maior em Chimoio do que na Província de Maputo. Mas, o índice de perdas do Chimoio é relativamente baixo, comparado com a Cidade de Maputo, Matola, Boane e Marracuene que estão em volta de 53%, segundo PAIRP (2019). Maiores perdas de água geram maior custo no abastecimento - desperdício de energia elétrica, reagentes químicos e recurso hídrico (Tsutiya, 2001).

Padrão temporal de consumo no Bairro 25 de Junho

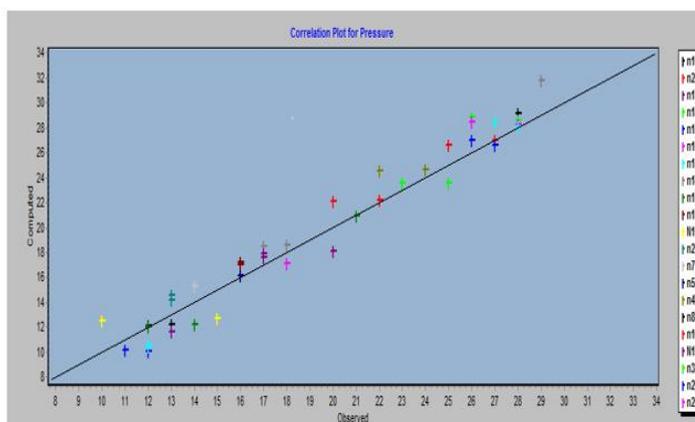
O fornecimento de água no Bairro 25 de Junho é realizado num período compreendido entre as 05h até 22h, correspondendo um período de abastecimento de 17h por dia. O intervalo de tempo de consumo máximo é compreendido entre as 7 e 8h e o consumo mínimo é no período entre 4 e 5h. O consumo máximo registado no período das 7 e 8h deve-se pelo facto de ser o momento da maior procura porque neste período as pessoas se preparam para dar sequência as suas atividades diárias (trabalho, escolas e outras), neste período tem se registado como hábitos das famílias Moçambicanas de encherem os seus recipientes para suprirem as necessidades ao longo do dia e com o receio de interrupção no fornecimento nas horas subsequentes.

Resultados de calibração do modelo

i. Pressão

A calibração de pressão gerou uma correlação entre os valores médios igual a 0.992 que representa a fiabilidade dos resultados (Pinto, 2010). Visualmente, nota-se que os dados medidos em campo (observed Mean) estão bem próximos dos dados calculados (computed Mean), Figuras 5.

Figura 5. Correlação entre os valores médios de pressões resultantes da simulação do modelo calibrado e as pressões medidas em campo.

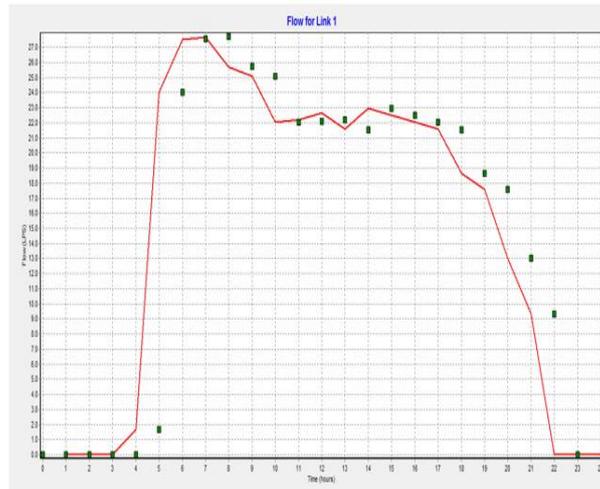


Fonte: Autores.

ii. *Caudal*

Os valores de caudal medidos são muito próximo dos simulados pelo Epanet, Figura 6.

Figura 6. Variação horária de caudal entre os valores simulados e observados.



Fonte: Autores.

Devido todas as imprecisões do sistema, pode se considerar que os pontos de pressão e vazão estão bem calibrados, mesmo apresentando algumas distorções dado que em ambos os casos a correlação é muito próximo de 1.

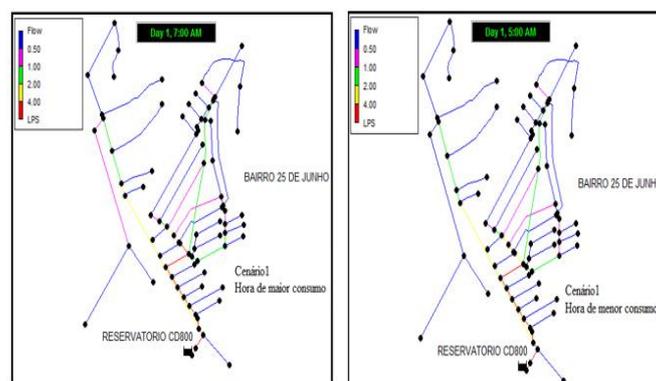
Simulação do modelo

Os resultados da simulação do modelo são apresentados a seguir através de diagramas, que mostram o funcionamento da rede de abastecimento nas horas de consumo máximo (7h), e de menor consumo (5h) no Cenário 1 e Cenário 2.

i. *Caudal*

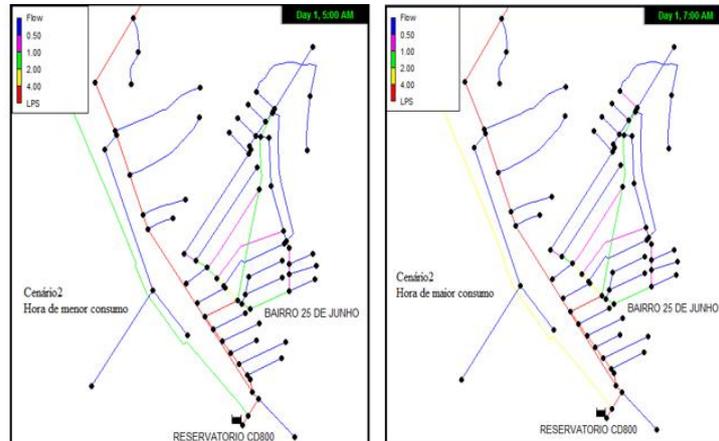
As Figuras 7 e 8 ilustram a distribuição espacial dos caudais. Os troços que transportam maior caudal são os que representam as condutas principais da rede e com um menor caudal nos extremos ou nas condutas secundárias da rede como era de prever segundo a lei da continuidade. A zona em estudo é alimentada pela conduta pipe78 que transporta um caudal de 12.57 Lps (0.01257m³/s) na hora maior consumo e 10.91 Lps (0.01091m³/s) na hora de menor consumo.

Figura 7. Distribuição espacial do caudal nas horas de maior e menor consumo.



Fonte: Autores.

Figura 8. Distribuição espacial do caudal nas horas de maior e menor consumo.



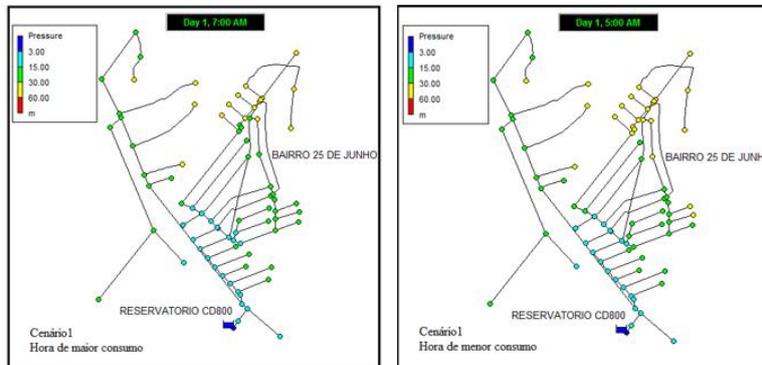
Fonte: Autores.

Os caudais nas tubagens no cenário 1 são maiores em relação aos caudais do cenário 2, sendo essa diferença influenciada pelas perdas de água.

ii. Pressão

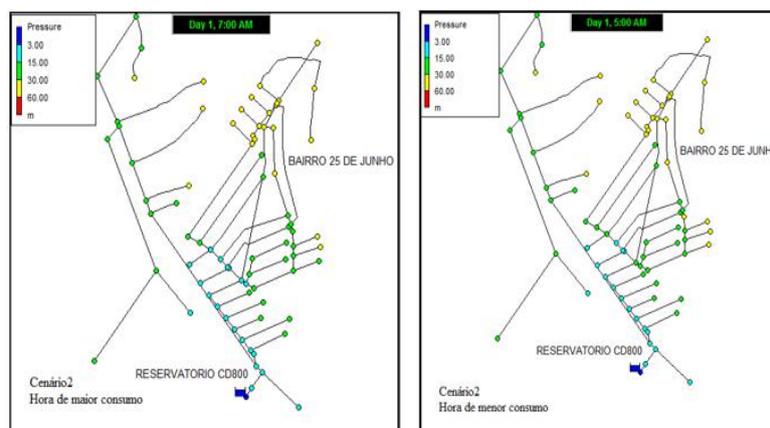
Os resultados obtidos da pressão disponível nos nós de consumo nas horas em que se registam o menor e o maior consumo para os Cenários1 e 2, são mostrados nas Figuras 9 e 10.

Figura 9. Distribuição espacial da pressão nas horas de maior e menor consumo Cenário 1.



Fonte: Autores.

Figura 10. Distribuição espacial da pressão nas horas de maior e menor consumo Cenário 2.



Fonte: Autores.

As pressões nos Cenários 2 são maiores em relação ao Cenário1. Entretanto, comparando com as pressões recomendadas pela RSPDADARM, estão acima dos parâmetros exigidos para o abastecimento nas torneiras do quintal.

iii. Perdas de águas

Analisando as Figuras 9 e 10, verifica-se que as perdas de cargas são relativamente maiores no cenário 1, neste cenário o reservatório deve suprir as perdas de água nos nós de consumo aumentando com isso os níveis de operação do reservatório para atender a demanda de consumo com pressões adequadas, gerando-se com isso um aumento de partida e parada das bombas, consequentemente aumento de consumo de energia elétrica.

4. Conclusão

A pesquisa concluiu o seguinte:

- As perdas reais e aparentes de água foram de 9863.72m³/mês, correspondendo um índice de perdas de 25%, e estas, influenciam de uma forma significativa nas variáveis pressão e caudal;
- Os resultados da simulação do modelo indicam que as pressões nos Cenários 1 e 2 estão acima dos parâmetros exigidos para o abastecimento de água nas torneiras do quintal (RSPDADARM) e relativamente inferiores a pressões máximas de serviços nas tubagens do tipo PVC, ou seja, 1.6MPa.
- A rutura das tubagens na rede de abastecimento de água não é devida ao excesso de pressão do fluido, mas sim, por estarem fora das suas vidas úteis, bem como, ocorre rompimento das tubagens causadas pelas máquinas de limpezas, pelo facto das tubagens estarem a uma profundidade inferior ao recomendado.
- As fugas de água ao longo da rede de abastecimento são significantes e as perdas são consideradas reais e aparentes (vazamentos, ligações ilícitas, avaria de micromedidores nos pontos de consumo, leituras ineficientes).

Como perspectivas, os autores propõem a realização estudo comparativo de perdas de água em sistemas de abastecimento entre municípios da mesma região.

Referências

- Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera JR., E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W. & Parena, R. (2000). Performance indicators for water supply services. London: *International Water Association – IWA*.
- Arbues, F., GARCÍA-Valiñas, M. A. & Martínez-Espiñeira, R. (2012). Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review. *Journal of Socio-Economics, North-holland*.
- Banco Mundial. (2009). Moçambique. (online), <https://ppiaf.org/documents/2638/download>.
- Banco Mundial. (2018). Moçambique. (online), <https://data.worldbank.org/country/Mozambique>.
- Bruggen, B. V. der, Borghgraef, K. & Vinckier, C. (2010). Causes of Water Supply Problems in Urbanized Regions in Developing Countries. *Water Resources Management, Springer*.
- Coelho, S. T., Loureiro, D. & Alegre, H. (2006). Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água, Instituto Regulador de Águas e Resíduos Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Gumbo, B. (2004). The status of water demand management in selected cities of Southern Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 29, 1225-1231.
- Heller, L. & Lúcio de Paula, V. (2006). Abastecimento de água para consumo humano. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, *Editora UFMG*
- José A. A. de Sá Marques & Joaquim J. de Oliveira Sousa. (2011). Hidráulica Urbana, Sistemas de Abastecimento de água e de Drenagem de águas residuais, 3ª Edição, *Imprensa da Universidade de Coimbra*.
- Jury, W. A. & Vaux, H. The role of science in solving the world's emerging water problems. (2005). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*.
- Lakatos, E. & Marconi, A. (2003). Fundamentos de metodologia científica (5 ed.). *São Paulo: Atlas*.
- Olaia, Ana I. Santos. (2012). *Gestão de Sistemas de Abastecimento de Água Através de Modelação Hidráulica*. Tese MSc. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Pinto, T. M. Modelação E Calibração de Um Sistema De Abastecimento De Água. repositorio-aberto.up.pt: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59298/1/000144794>.
- Programa Acelerado Integrado de Redução de Perdas (PAIRP). (2019). FIPAG, pigi.fipag.co.mz/docs/Internal%20NRW%Strategy_Maputo.pdf.
- Rego, A. A. C. (2007). *Integração de ferramentas SIG para a optimização sistema adutor com recurso ao Epanet*. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Rossman, I a. (2004). The Epanet water distribution system model. Presented at 2004 Peer Review Meeting, Cincinnati, OH, September 27 – 29.
- Todini, E. (2003). A More Realistic Approach to the “Extended Period Simulation” of Water Distribution Networks. In: *advances in water supply management*. Maksimovic, c.; butler, d.; memon, f. A. (eds.), Swets & Zeitlinger, Lisse, The Netherlands.
- Tsutiya, M.T. (2001). Redução do Custo de Energia Eléctrica em Sistemas de Abastecimento de Água, 1ª Ed. São Paulo: *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- Tucciarelli, T., Criminisi, A. & Termini, D. Leak. (1999). Analysis in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 277-285.
- Turner, A. & White, S. (2006). Water in the Urban Environment - Conference, Sippy Downs. Anais. Queensland, Australia.
- Willis, R.M., Stewart, R.A., Giurco, D. P., Talebpour, M. R. & Mousavinejad, A. (2011). End use water consumption in households: impact of socio-demographic factors and efficient devices. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier.
- Ylva Nordström. (2019). *Water Availability Challenges in Mozambique-Implications to the Nexus*. Master of Science Thesis, KTH.