

I-1513 – VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Fabricio Rios Mendes Aguiar⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Analista ambiental da HIDROBR – Soluções integradas.

Michael Silveira Thebaldi⁽²⁾

Professor Adjunto do Departamento de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras (UFLA)

Mateus Alexandre da Silva⁽³⁾

Engenheiro Civil, doutorando em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Endereço⁽¹⁾: Av. Brasil, 888 – 14º andar – Santa Efigênia – Belo Horizonte – MG - CEP: 30140-000 - Brasil - Tel: +55 (19) 998982957 - e-mail: fabricioaguiar98@hotmail.com

RESUMO

O conhecimento acerca da variação do consumo de água tem papel fundamental no planejamento, operação e manutenção de sistemas de abastecimento de água potável. Desta forma, torna-se essencial prever o funcionamento hidráulico de redes de abastecimento por meio da análise de cenários de consumo de água baseados na variabilidade temporal. Por este motivo, o objetivo com este estudo foi realizar simulações hidráulicas, com o auxílio do software EPANET 2.0, para identificação de possíveis alterações no comportamento hidráulico de uma rede de abastecimento de água potável. Para isso, foram criados três cenários de variação de consumo de água: horário, diário, sazonal; além de um cenário de envelhecimento da tubulação em uma rede de abastecimento fictícia do tipo malhada, baseados em parâmetros de funcionamento definidos em normas técnicas brasileiras e em dados apresentados na literatura nacional, realizando análises estatísticas para cada cenário. Por meio da comparação da variação das vazões e pressões dinâmicas com o aumento da demanda de água nos diferentes cenários, foi verificado que a variabilidade temporal tem influência significativa sobre o funcionamento hidráulico, sendo o funcionamento crítico, isto é, as menores pressões e maiores vazões médias, foram registradas em época de verão em horários próximos ao meio-dia.

PALAVRAS-CHAVE: Consumo de Água Potável; EPANET 2.0; Hidráulica de Sistemas Urbanos; Rede Malhada.

INTRODUÇÃO

A rede de distribuição de água é a parte que possui maior custo e a mais importante em um sistema de abastecimento, já que se encontra mais próxima do destino final, além de serem sistemas extremamente complexos devido à crescente demanda de água e intermitência no abastecimento (Moura et al., 2017; Ray et al., 2020; Roushangar & Alizadeh, 2018; Salgueiro et al., 2019). Assim, a rede de distribuição deve ser concebida com o objetivo de suprir as exigências técnicas demandadas pelas normas a regem, suprimindo as necessidades básicas quanto à quantidade e qualidade da água demandada. Entretanto, na prática, fatores como localização e disposição no meio urbano, tornam a manutenção e operação rotineira dessas redes limitada, exigindo elevados padrões de construção, operação, manutenção (Walter & Klingel, 2021), bem como um dimensionamento criterioso e eficiente, incluindo seu horizonte temporal de funcionamento.

Em um sistema de abastecimento de água potável, a quantidade de recurso hídrico consumido é uma informação imprescindível para a sua manutenção e operação (Sirsant & Reddy, 2021; Yang et al., 2021), e pode variar em função do tempo, das condições climáticas, dos hábitos e crescimento populacional e do funcionamento hidráulico da rede, como níveis de pressão (Altunkaynak & Nigussie, 2017; Garmendia et al., 2018). Ainda, segundo Mangalekar e Gumaste (2021) há uma série de fatores ligados ao uso de aparelhos sanitários nas edificações que podem dificultar a estimativa da demanda por água. Dentre as diversas formas de variação no consumo de água, a diária e horária têm papel fundamental já na etapa de dimensionamento não só da rede, mas de todo o sistema de abastecimento.

Para tratar tais complexidades de maneira adequada se torna necessário simular o comportamento dos sistemas de abastecimento. Segundo Lousada et al. (2019), utilizando o poder de cálculo dos computadores modernos é possível criar um modelo realista e, até certo ponto, hidraulicamente fiel do sistema estudado, o que possibilita avaliar o comportamento hidráulico e propor e testar soluções aos problemas identificados sem a necessidade de experiências realizadas num sistema real. Dessa forma, a modelagem e simulação de cenários relativos à variação do consumo, assim como mudanças das características do conjunto de tubulações ou mesmo outros constituintes do sistema hidráulico, é indispensável para que seja alcançado um ponto ótimo de equilíbrio tornando o projeto viável técnica e economicamente no presente e que desempenhe sua função no futuro.

Para tal, vários recursos computacionais desde os mais simples até os mais complexos podem ser usados para a avaliação do funcionamento hidráulico destes sistemas. Um deles, o software EPANET 2.0 (*United States Environmental Protection Agency - USEPA, 2000*), é uma ferramenta gratuita e que permite, de forma dinâmica, a realização da simulação de sistemas simples e complexos de tubulações, possibilitando a identificação de peculiaridades que tenham o potencial de alterar o funcionamento hidráulico de uma rede de abastecimento de água.

Sendo assim, objetivou-se determinar os efeitos da variabilidade temporal do consumo sobre o comportamento hidráulico de uma rede de abastecimento de água potável fictícia do tipo malhada, valendo-se de um software auxiliar e testes estatísticos para a análise comparativa entre vazões e pressões da rede.

OBJETIVOS

Determinar os efeitos da variabilidade temporal sobre o comportamento hidráulico de uma rede de abastecimento de água potável fictícia do tipo malhada, valendo-se de um software auxiliar e testes estatísticos para a análise comparativa entre vazões e pressões da rede.

MATERIAL E MÉTODOS

- Dados do loteamento e da rede de distribuição de água

O loteamento fictício considerado neste estudo (Figura 1) possui 11 quadras abrangendo um total de 128 unidades domiciliares. Adotou-se uma taxa de ocupação de 4 habitantes por domicílio, totalizando uma população de 512 habitantes a ser abastecida.

Considerou-se ainda que o abastecimento da rede é feito por meio de um reservatório elevado (torre) de carga constante com 15 metros de altura construído sob a cota de altitude de 780 metros.

Para as tubulações da rede foi considerado o material PVC PBA Classe 12 (PN 60) com diâmetro nominal de 50 mm e, em primeira análise, coeficiente de rugosidade (C) igual a 140. Os nós, bem como os comprimentos dos trechos da rede analisada podem ser vistos por meio da Figura 1.

Para a simulação do consumo horário de água no EPANET 2.0, foi adotada a série de referência de Vila Velha - ES, presente em Azevedo Netto e Fernández (2015). O padrão temporal obtido para tal cenário é apresentado na Figura 2.

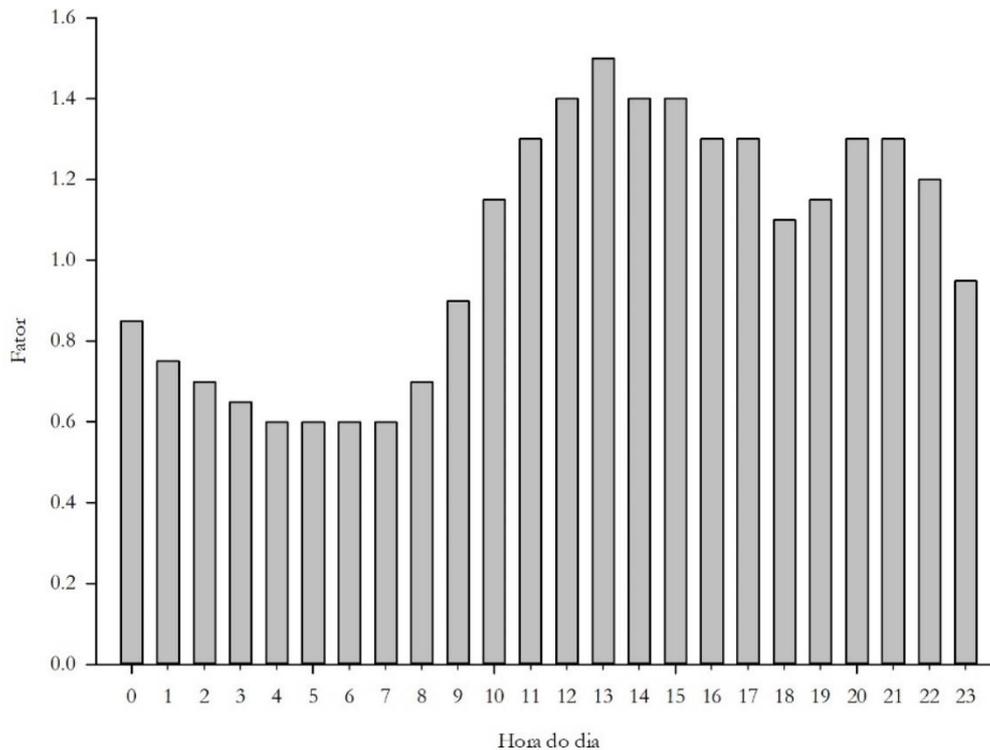


Figura 2 – Padrão temporal para variação horária do consumo.

Fonte: Adaptado de Azevedo Netto e Fernández (2015).

- Variação diária do consumo de água

Em relação à simulação da variação da demanda de água nos dias da semana, foi adotado como referência o padrão mostrado na Figura 3, desenvolvido por Guidi (2016), o qual apresenta a variação do consumo semanal na cidade de Franca – SP. O padrão temporal com variação para os dias da semana pode ser visto na Figura 3.

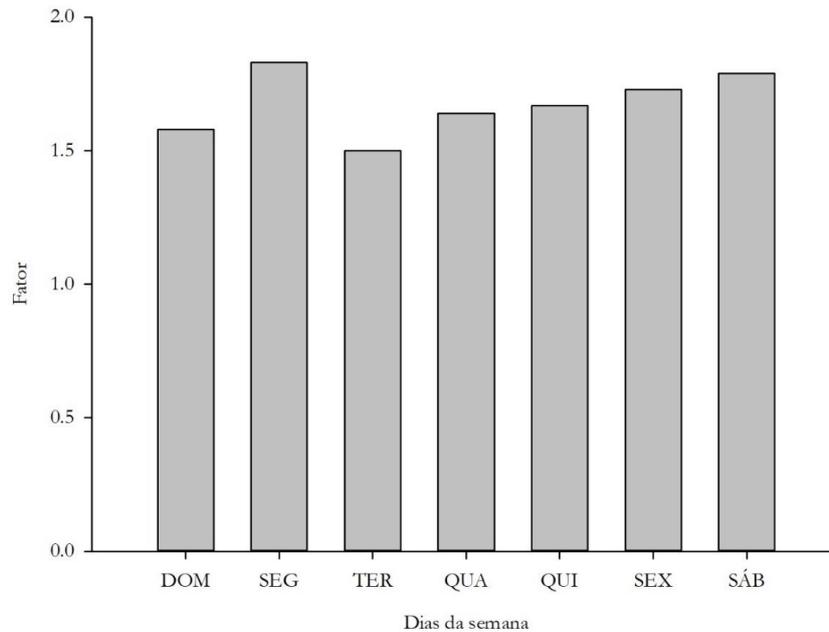


Figura 3 – Padrão temporal para variação diária do consumo.

Fonte: Adaptado de Guidi (2016).

Nota-se por meio da Figura 3 que a terça-feira apresentou o menor valor máximo para vazão dentre todos os dias da semana. Desse modo, terça-feira foi adotado como padrão unitário, com fator multiplicativo igual a 1,5, e os fatores dos demais dias foram obtidos pela divisão do valor máximo do dia em análise pelo valor máximo unitário. Destaca-se que o valor de 1,5 adotado para o fator multiplicativo de terça-feira refere-se ao horário de 12h (meio-dia) do padrão temporal diário apresentado na Figura 3. Pelo fato de 12h apresentar o consumo horário máximo de um dia, ao utilizar tal horário como referência para todos os dias da semana, cria-se um cenário crítico para a análise do comportamento hidráulico da rede.

- Variação sazonal do consumo de água

As variações de temperatura e precipitação promovem uma variação mensal do consumo de água. Quanto mais quente e seco for o clima maior é o consumo verificado. O consumo médio no inverno é aproximadamente 80% da média diária anual e no verão de mais de 125% desta média (Guimarães et al., 2007).

Com base nos valores percentuais apresentados, foi adotado um consumo médio de 125% para o verão e 80% para o inverno, em relação à média diária anual apresentada na Figura 2. Os padrões horários definidos (verão e inverno) são apresentados na Figura 4.

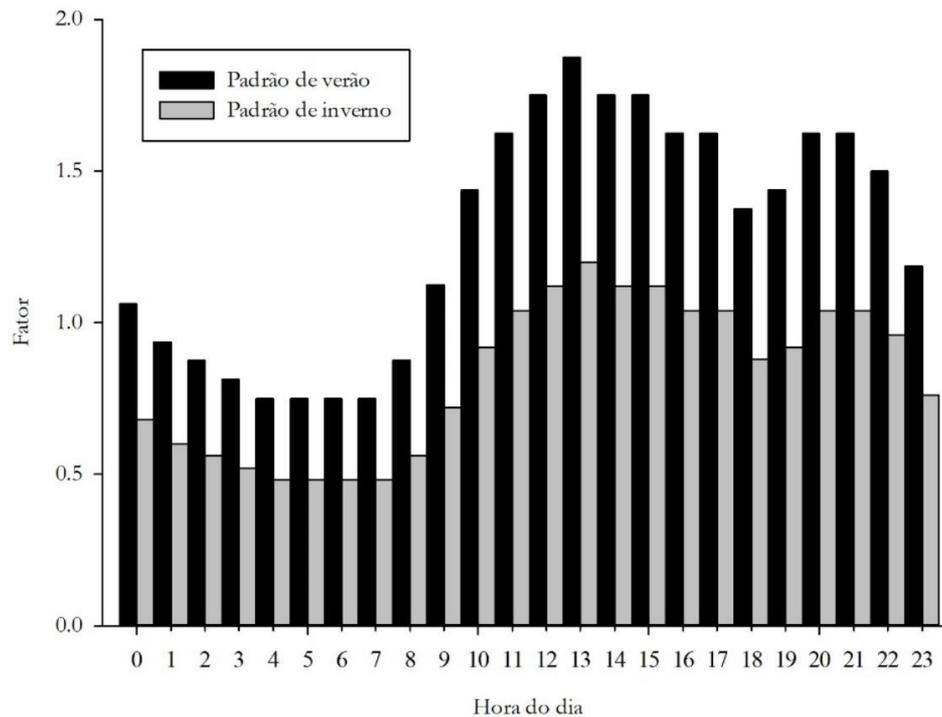


Figura 4 – Padrão horário para a variação sazonal do consumo de água no verão e inverno.
 Fonte: Os autores (2023).

Ambos os padrões apresentados na Figura 4 não compreendem um período mensal ou sazonal, e sim o período de um dia (24 horas). Tal simplificação pode ser feita, pois o comportamento hidráulico diário da rede se repetirá durante todo o período de cada estação.

- Envelhecimento da tubulação da rede

Para simular o envelhecimento das tubulações da rede, utilizou-se os valores definidos por Azevedo Netto e Fernández (2015) para o coeficiente de rugosidade (C) de Hazen-Williams, para tubulações compostas por tubos de PVC, juntas tipo PB ou luva, até DN 125. Os valores utilizados foram referentes a tubulação nova (C = 140,0) e para os tempos de uso de 10 (C = 135,0) e 20 anos (C = 132,5). Ainda, nessa simulação foi utilizada o padrão temporal horário de consumo (Figura 2) como referência.

- Análise estatística

Em cada um dos cenários avaliados, as amostras de vazão nas tubulações e/ou pressões nos nós da rede malhada estudada, para cada uma das fontes de variação avaliadas, foram comparadas por meio de análises estatísticas. Para os cenários de variação horária e diária, foi realizada uma Análise de Variância em Ranks (teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade) seguida do teste de Tukey, também à 5% de probabilidade para comparações múltiplas entre os níveis dos fatores.

Já para as avaliações sazonais e de envelhecimento da tubulação, que foram realizadas com duas fontes de variação (hora do dia e estação do ano; e hora do dia e tempo de uso das tubulações, respectivamente), foram realizadas Análises de Variância para dois fatores por meio do teste F com 5% de nível de significância e o teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparações múltiplas entre os níveis dos fatores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cenário da variação de consumo horária, a variação da vazão média nas tubulações pode ser vista na Figuras 5.

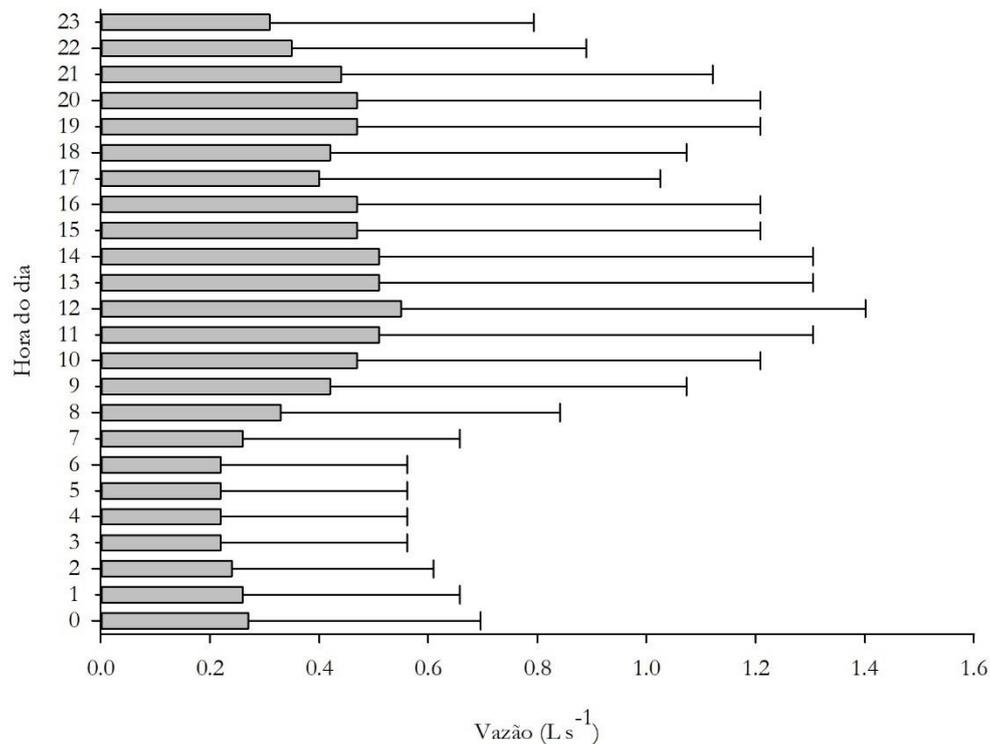


Figura 5 – Variação da vazão média na rede de abastecimento estudada em função das horas do dia.

Fonte: Os autores (2023).

Conforme apresentado por Azevedo Netto e Fernández (2015), ao longo do dia, a demanda de água varia continuamente. Durante o período matutino, a vazão supera o valor médio e atinge valores máximos por volta do meio-dia. Já no período noturno, o consumo cai para valores abaixo da média, apresentando valores mínimos nas primeiras horas da madrugada.

Nota-se pela Figura 5 que as menores vazões médias são registradas durante a madrugada, isto é, entre 1 e 6 h. Durante esse período, a demanda cai consideravelmente, já que as atividades humanas são reduzidas. Por outro lado, o consumo atinge seu pico ao meio-dia e permanece elevado em horários adjacentes. A alta demanda pode ser explicada pelo preparo e cocção de refeições para o almoço durante tal intervalo, aumentando o consumo da água durante o preparo dos alimentos. Ainda, nesses horários, geralmente, é registrada temperaturas médias superiores aos demais durante o dia, o que leva a um maior consumo para a dessedentação e higiene pessoal. A diferença percentual, desconsiderando o desvio padrão, entre as vazões máxima e mínima foi de 60%.

É importante mencionar que dentre os 43 trechos de tubulações existentes na rede malhada adotada, 3 apresentaram vazões muito baixas ou nulas. Este é um grande problema do uso da rede malhada, principalmente quando implantada em loteamentos pequenos e com abastecimento isolado, como foi o caso do presente estudo. Ao tratar uma rede malhada de modo a ser numericamente simples, faz-se uma generalização das derivações, a fim de que o equilíbrio de cargas seja atingido mais facilmente, logo, a não-discretização das tomadas de água influencia o comportamento hidráulico da rede. Já a Figura 6 indica a variação da pressão média nos nós da rede em função das horas do dia.

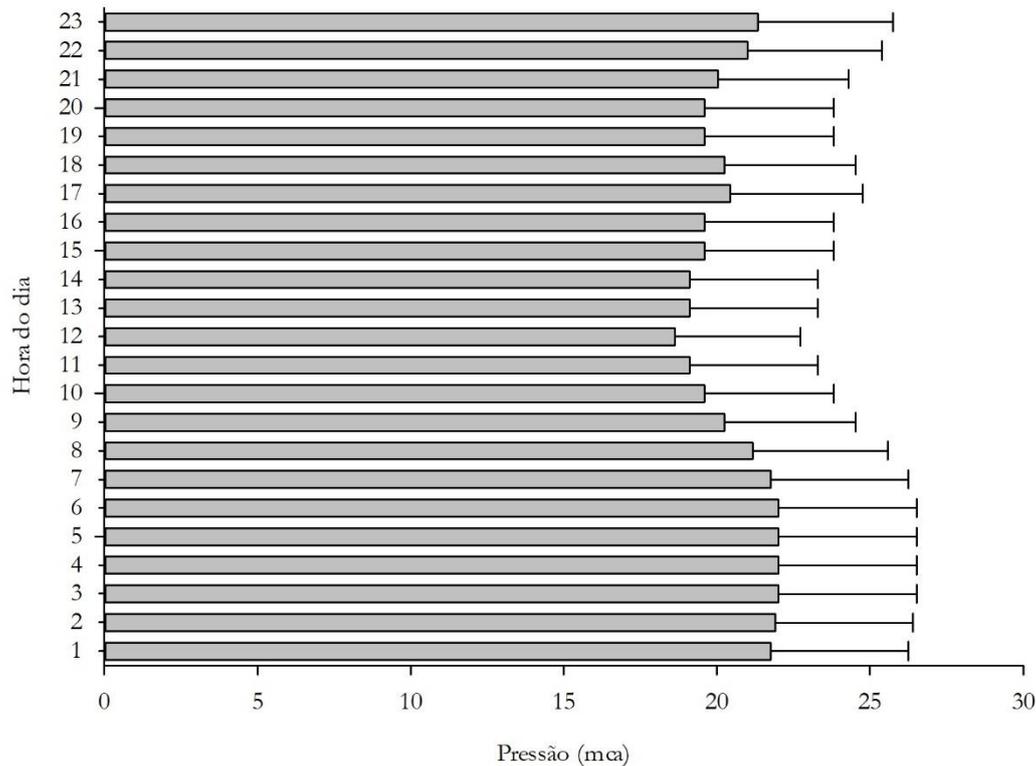


Figura 6 – Variação da pressão média nos nós da rede de abastecimento estudada em função das horas do dia.

Fonte: Os autores (2023).

Pela análise da Figura 6, percebe-se que as maiores e menores pressões médias foram registradas durante as primeiras horas da madrugada e em horários adjacentes ao meio-dia, respectivamente. Fazendo uma comparação das pressões registradas (Figura 6) com a vazão (Figura 5), é possível identificar uma relação inversamente proporcional, isto é, a pressão nos nós cai, à medida que a vazão nas tubulações aumenta. Tal fato pode ser explicado pois o aumento da vazão leva a um aumento da perda de carga, que, consequentemente, reduz os valores de carga de pressão.

Nota-se também que todas as pressões médias registradas são superiores a 10 mca e inferiores 50 mca, valores estes em conformidade com a NBR 12218 (ABNT, 2017).

Ressalta-se que durante uma primeira análise da rede, percebeu-se que diâmetros inferiores à 50 mm poderiam ser utilizados sem comprometer o funcionamento da rede, tampouco desrespeitar os valores mínimos e máximos de pressão estabelecidos pela NBR 12118 (ABNT, 2017). Ademais, Silva et al. (2019) apresentam uma análise técnica e econômica do uso de tubulações com diâmetros inferiores à 50 mm em redes ramificadas. Porém, como o presente estudo tratou de uma rede malhada composta apenas por tubulações primárias ficou estabelecido o diâmetro de 50 mm em todas as tubulações.

Com o avaliado, registrou-se uma diferença percentual entre as pressões máxima e mínima de aproximadamente 15%, inferior aos 60% de variação de vazão na mesma análise. Tanto para as amostras de vazão nas tubulações quanto para as pressões nos nós da rede, não foram identificadas diferenças estatísticas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre os níveis do fator avaliado.

O fato da rede apresentar valores relativamente baixos para as vazões e velocidades de escoamento de água nas tubulações, levou em média, a uma pequena perda de carga unitária em todo o sistema. Além disso, essa pequena perda está diretamente atrelada ao fator planialtimétrico da rede, que por ter uma pequena diferença entre cotas, não foram obtidos valores de pressões muito elevados em pontos mais baixos da rede. Sendo

assim, com uma baixa perda de carga unitária nas tubulações, já se esperava pouca variação nas pressões dinâmicas do sistema de abastecimento, como já indicado pela diferença percentual encontrada (15%).

Os valores médios de vazão considerando a variação de consumo semanal podem ser vistos na Figuras 7.

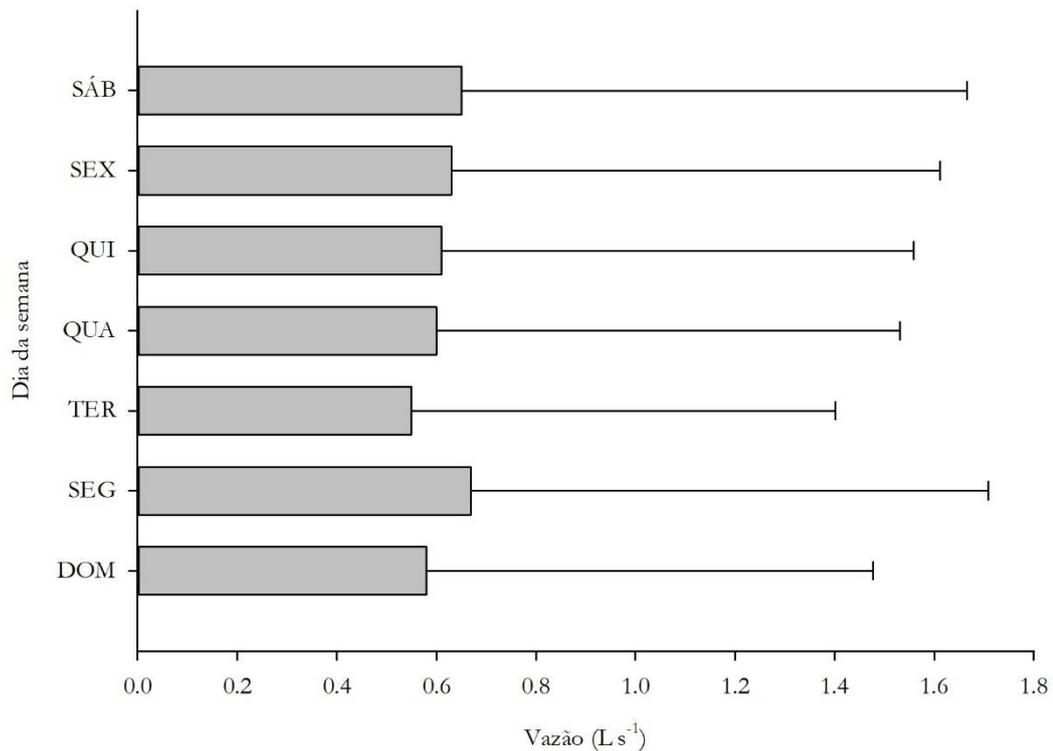


Figura 7 – Variação da vazão média nas tubulações da rede de abastecimento estudada em função dos dias da semana.

Fonte: Os autores (2023).

De acordo com Azevedo Netto e Fernández (2015), há meses em que a demanda de água é maior, como nos dias mais quentes e secos. Por outro lado, no mesmo mês ou semana, existem dias que a demanda assume valores maiores ou menores sobre a média.

A partir do padrão de simulação definido e a análise da Figura 7, nota-se que segunda-feira assume o maior valor de vazão média e, portanto, é o dia da semana em que há uma maior demanda por água.

Em uma pesquisa na literatura, Beal e Stewart (2014) demonstraram que a demanda de água pode variar de acordo com o clima (precipitação e temperatura), comportamento do consumidor, eficiência hídrica, características sociodemográficas dentre outros fatores. Na região adotada como referência para definição do padrão de consumo semanal, a segunda-feira foi o dia com o maior consumo de água, porém, em uma outra região, espera-se um comportamento diferente do apresentado neste estudo. Com o avaliado, a diferença percentual, desconsiderando o desvio padrão, entre as vazões máxima (segunda-feira) e mínima (terça-feira) foi de aproximadamente 18%. Já a Figura 8 indica os valores médios de pressão considerando a variação de consumo semanal.

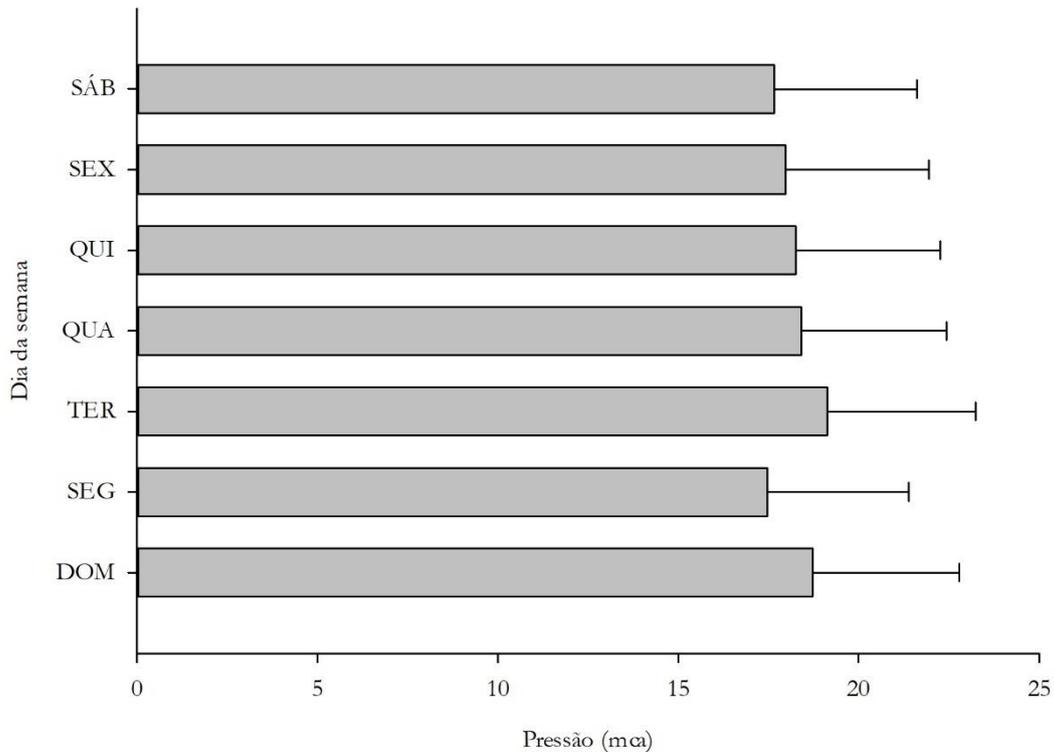


Figura 8 – Variação da pressão média nos nós da rede de abastecimento estudada em função dos dias da semana.

Fonte: Os autores (2023).

Como a demanda de água durante a segunda-feira é máxima, conseqüentemente sua pressão média é a menor registrada durante a semana, uma vez que a pressão reduz com o aumento da vazão. Do mesmo modo, a terça-feira registou a maior pressão média, fato devido ao menor valor de vazão médio. Nota-se que as pressões dinâmicas médias registradas para todos os dias da semana estão de acordo com o estabelecido pela NBR 12218 (ABNT, 2017), que indica que não se pode ter valores inferiores a 100 kPa (aproximadamente 10,2 mca) nestas estruturas hidráulicas.

A diferença percentual, desconsiderando o desvio padrão, entre as pressões máxima (terça-feira) e mínima (segunda-feira) foi de aproximadamente 9%, menor que a variação de vazão obtida, semelhante ao ocorrido no cenário de avaliação em função da variação horária. Para mais, não foram observadas diferenças significativas entre as amostras avaliadas de vazão e pressão neste cenário.

O cenário de avaliação da variação sazonal do consumo de água seguiu os moldes dos cenários horário e diário. Na Figura 9 é apresentado as vazões médias horárias registradas para o verão e inverno.

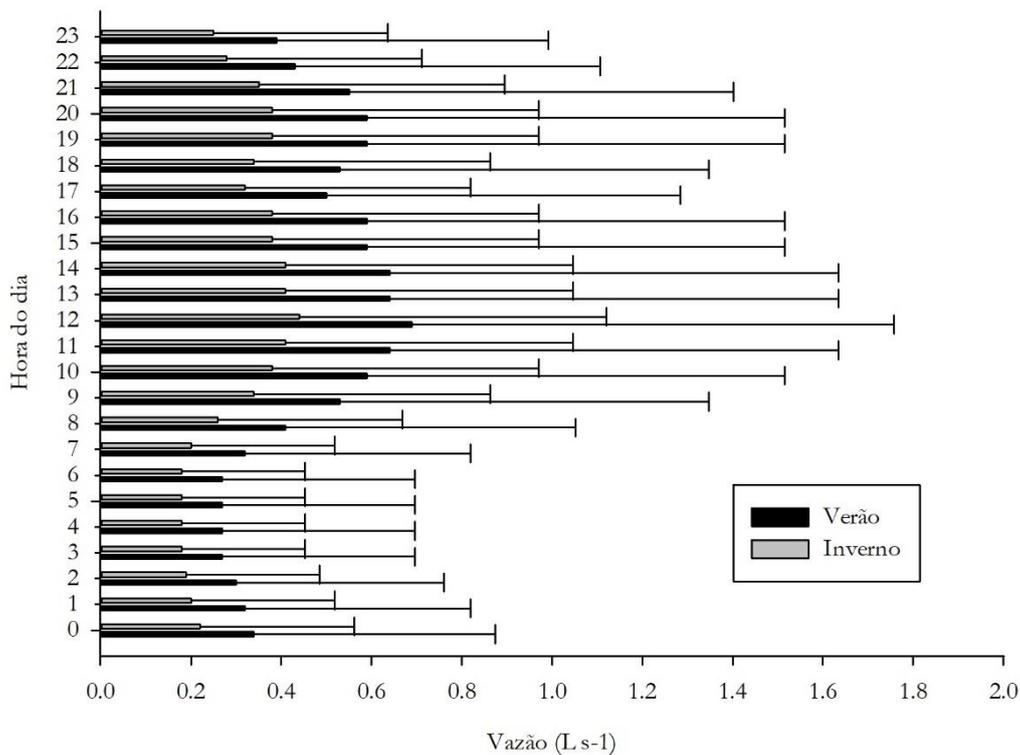


Figura 9 – Variação sazonal da vazão média na rede de abastecimento estudada em função das horas do dia.

Fonte: Os autores (2023).

De acordo com Azevedo Netto e Fernández (2015), os locais onde o fator da sazonalidade é muito influente no consumo de água, ou seja, regiões com clima muito variável e estações do ano muito distintas, os valores de K_1 a serem utilizados são elevados, além de ser necessário o uso de um K_2 pleno nas previsões de consumo de maior alcance de tempo.

Por meio da Figura 9, percebe-se o incremento e a redução da demanda para as estações de verão e inverno, respectivamente, em relação ao cenário diário de variação do consumo (Figura 5). Esse incremento da demanda foi de aproximadamente 25% e a redução de 20% conforme os valores percentuais sugeridos por Guimarães et al. (2007).

Ao realizar a comparação das demandas entre as estações do ano apresentadas na Figura 9, tem-se que a demanda de água aumenta 50% no verão em relação ao inverno, em horários de baixo consumo, chegando a quase 57% de demanda adicional ao meio-dia, no qual ocorre o pico de consumo.

Com a verificação da análise estatística, teve-se que para o efeito simples das horas do dia, valores significativos foram registrados nas interações entre horários da madrugada (1 às 7 h) e horários próximos ao meio-dia (11 às 14 h). Tal fato pode ser explicado pela grande diferença de demanda entre esses horários, isto é, durante a madrugada, enquanto grande parte das estão dormindo, o consumo de água cai de forma relevante, resultando em menores vazões médias, e conseqüentemente, maiores pressões médias. Próximo ao meio-dia, horário de maior movimento e de atividades de preparo de refeições, o consumo se eleva ao valor máximo diário e o comportamento hidráulico torna-se inverso, ou seja, menores pressões e maiores vazões médias. Além disso, há uma correlação positiva entre a temperatura do ar e o consumo de água (Balling Junior et al., 2008). A Figura 10 apresenta as pressões médias horárias registradas para o verão e inverno.

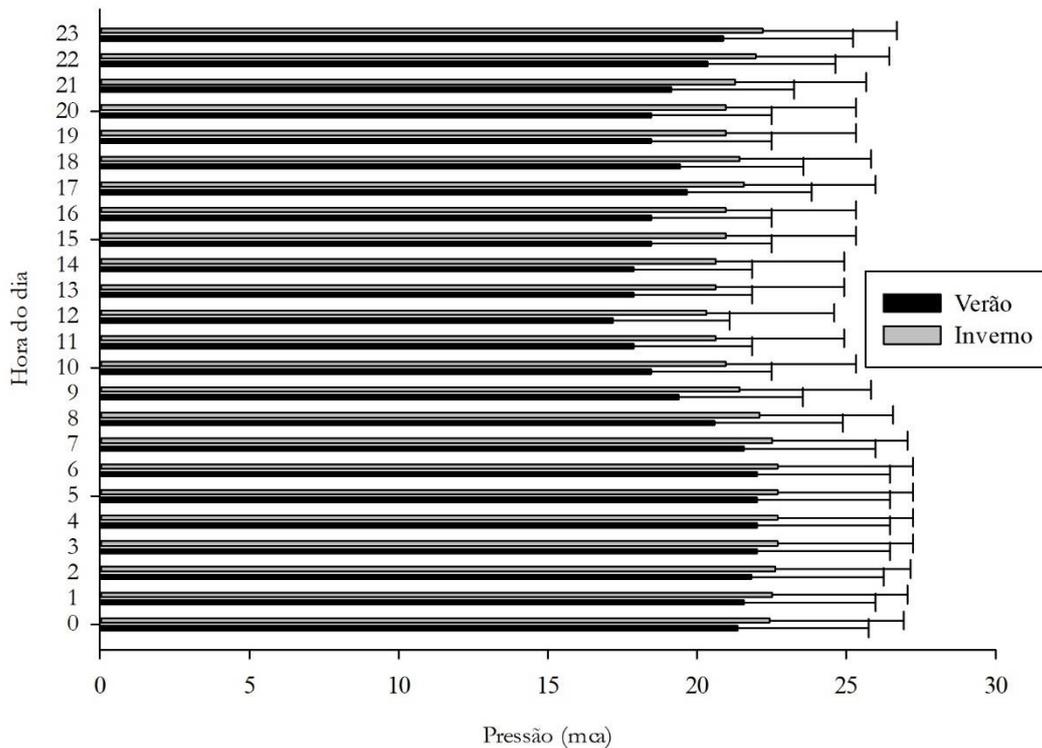


Figura 10 - Variação sazonal da pressão média na rede de abastecimento em função das horas do dia.

Fonte: Os autores (2023).

Percebe-se, pela Figura 10, que o cenário sazonal possui um comportamento semelhante ao cenário horário de variação de consumo, porém, ainda assim, os valores de pressão média horária são diferentes. Isso ocorre pois durante as estações do verão e inverno ocorre um aumento e uma redução dos fatores multiplicativos (demanda por água), respectivamente. Com a demanda de água intensificada no verão e reduzida no inverno, as pressões médias serão, portanto, menores em meses quentes e maiores em meses frios.

Nota-se que todas as pressões médias horárias, para ambas as estações, são superiores a 100 kPa (aproximadamente 10,2 mca) e estão de acordo com a NBR 12218/2017 (ABNT, 2017).

Por meio da comparação dos valores de pressão média horária entre as estações do ano tem-se que a pressão média nos nós da rede diminui 3% no verão em relação ao inverno, em horários de baixo consumo, chegando a 18% de redução no pico de consumo, ao meio-dia.

Analisando os valores médios de vazão e pressão, percebe-se para ambos, que mesmo com o aumento drástico na demanda de água do inverno para o verão de aproximadamente 60% ao meio-dia, a pressão não sofre grandes variações com a mudança de estações. Isso ocorre devido ao fato de a perda de carga ser mais influenciada pelo diâmetro da tubulação do que pela vazão escoada. Neste trabalho não houve variação dos diâmetros das tubulações constituintes da rede, que foram todas definidas com 50 mm. Assim, as baixas vazões e, conseqüentemente, velocidades de escoamento, levaram a perdas de carga pouco relevantes. Tendo-se um reservatório com carga constante em cota geométrica elevada, um grande aumento percentual na demanda de água não causará uma redução da pressão na mesma proporção.

Com o consumo reduzido durante a madrugada, a vazão nas tubulações cai e, conseqüentemente, a pressão nos nós se eleva. Por outro lado, ao meio-dia a situação se inverte, com a alta demanda para atender a vazão aumenta e a pressão dinâmica é reduzida.

O resumo da ANOVA, realizada para comparação entre amostras de vazão nas tubulações e pressão nos nós da rede malhada estudada, no cenário de variação sazonal do consumo de água, pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo da ANOVA para as fontes de variação hora do dia e estação do ano na análise da variação da pressão na rede de abastecimento de água estudada.

Fontes de variação	GL	Pressão			Vazão		
		QM	F	GL	QM	F	
Hora do dia (H)	23	95,174	5,097**	23	1,844	4,483**	
Estação do ano (E)	1	1309,032	70,102**	1	22,737	55,275**	
H x E	23	14,750	0,790 ^{NS}	23	0,0893	0,217 ^{NS}	
Resíduo	1390	18,673		2016	0,411		
Total	1437	20,731		2063	0,435		

Em que: **: significativo pelo teste F a 1% de probabilidade estatística; ^{NS}: não significativo pelo teste F a 1% de probabilidade estatística. Fonte: Os autores (2023).

Como mostrado por meio da Tabela 1, foram identificadas diferenças significativas entre vazão e pressão média na rede considerando o efeito simples das estações do ano avaliadas. Além do consumo de água ser maior durante estações com temperaturas mais altas (Balling Jr et al., 2008), devido a maior necessidade de higiene pessoal, a água utilizada para abastecer piscinas e para regas de jardim também contribuem para o aumento significativo da demanda nesta estação do ano (Fox et al., 2009; Hoyos & Artabe, 2017; Reyes-Paecke et al., 2019). A temperatura (e sua variação ao longo do dia) também influi na demanda e é diretamente proporcional ao consumo. Durante o verão, a temperatura máxima média varia entre 28°C e 34 °C, nas Regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil. Nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil as máximas temperaturas podem variar entre 24°C e 32°C. Por outro lado, no inverno, a temperatura máxima média aumenta no norte do Brasil, enquanto, na Região Sul e áreas serranas do Sudeste, predominam valores médios inferiores a 22 °C (INPE, 2019).

Com base nos dados apresentados, as diferenças significativas, identificadas na Tabela 1, podem ser explicadas, uma vez que o consumo de água no verão e próximo ao médio dia é consideravelmente superior ao consumo no inverno e nas primeiras horas do dia, respectivamente.

O cenário de envelhecimento da tubulação possui o mesmo padrão temporal do cenário horário e apresenta as pressões médias horárias para três diferentes idades de tubulação (0, 10 e 20 anos), conforme apresentado na Figura 11.

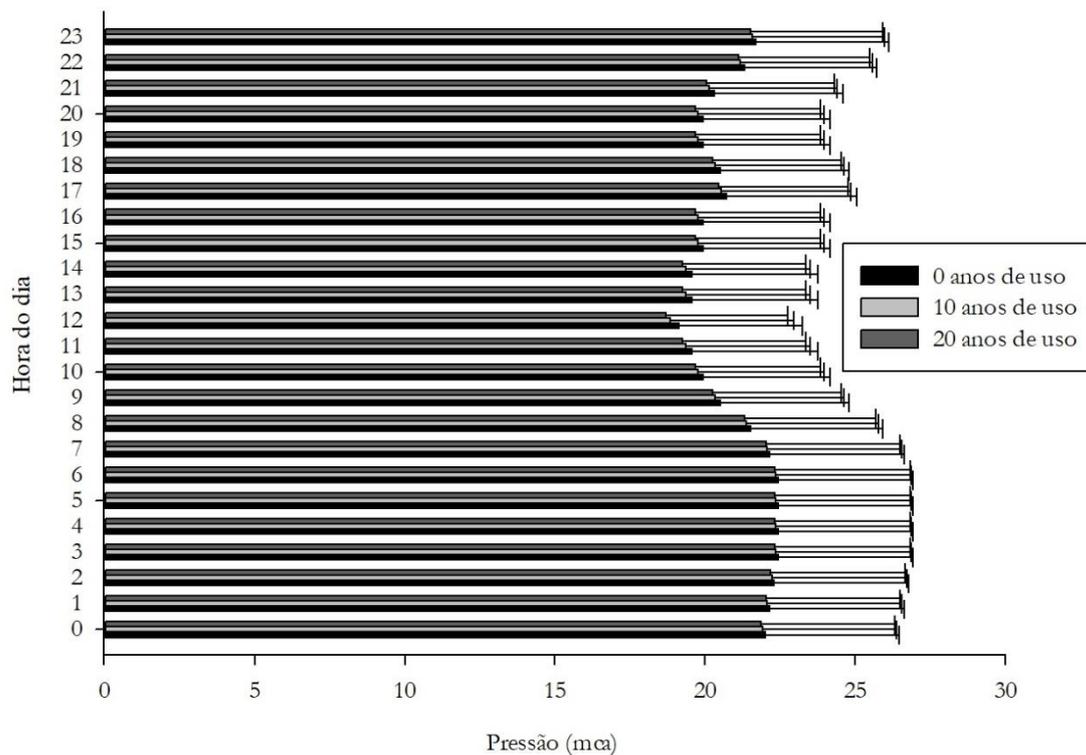


Figura 11 – Efeito do envelhecimento da tubulação na variação da pressão média nos nós da rede malhada estudada em função das horas do dia.

Fonte: Os autores (2023).

Pela análise da Figura 11, conforme ocorre o envelhecimento da tubulação, e conseqüentemente, a deterioração desta, mais reduzida se torna a pressão média horária, isto é, com a tubulação mais rugosa, a pressão nos nós caem, já que neste cenário a demanda por água manteve-se constante.

Tal fato indica que a deterioração da tubulação é capaz de comprometer o funcionamento hidráulico de uma rede de abastecimento, sendo indispensável a realização de manutenções na rede com o passar dos anos, a fim de evitar a interrupção do abastecimento de água. Esse fato torna-se mais relevante se o padrão de consumo da população aumentar com o tempo ou mesmo se houver uma variação positiva da população a ser atendida pela rede, já que o ritmo ascendente de crescimento populacional influencia na complexidade dos sistemas de abastecimento de água potável, conforme apresentado por Guidi (2016). Segundo Speight (2014), durante a vida útil de sistemas de abastecimento de água são realizados programas de reabilitação e substituição de dutos, em que o aumento da eficiência energética do sistema por meio da redução da rugosidade dos dutos é frequentemente citado como um fator importante.

O resumo da ANOVA realizada para comparação entre amostras de pressão nos nós da rede malhada estudada, no cenário de envelhecimento da tubulação em função variação diária do consumo de água, pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo da ANOVA para as fontes de variação hora do dia e idade da tubulação na análise da variação da pressão na rede de abastecimento de água estudada.

Fontes de variação	Pressão		
	GL	QM	F
Hora do dia (H)	23	134,636	7,202**
Idade da tubulação (I)	2	10,532	0,563 ^{NS}
H x I	46	0,118	0,00631 ^{NS}
Resíduo	2088	18,694	
Total	2159	19,525	

Em que: **: significativo pelo teste F a 1% de probabilidade estatística; ^{NS}: não significativo pelo teste F a 1% de probabilidade estatística. Fonte: Os autores (2023).

Neste estudo não foram identificados efeitos significativos do envelhecimento da tubulação sobre os valores médios das pressões dinâmicas determinadas nos nós. Isso se deve ao fato da rugosidade da tubulação de PVC não possuir um aumento expressivo com o passar dos anos, sendo esta uma das grandes vantagens de materiais plásticos sobre tubulações de ferro fundido, pois além de uma menor redução do coeficiente C com o passar do tempo, é mais seguro em relação ao fator sanitário. De acordo com Azevedo Netto e Fernández (2015), ensaios e verificações em que foram empregados tubos de ferro fundido de boa qualidade, sem revestimento interno, mostraram que para o início de funcionamento, o coeficiente C assume valores próximos a 140. Entretanto, pouco tempo depois, esse valor cai para 130 e com o passar do tempo, atinge valores ainda mais baixos. Além disso, a tendência à dissolução do ferro e a presença de oxigênio dissolvido na água, fatores primordiais na corrosão, são responsáveis pela formação de tubérculos na superfície interna dos tubos, reduzindo a seção com a deposição do material, se tornando também uma possível fonte de contaminação da água.

Por meio da comparação dos valores de pressão média horária entre as idades de tubulação apresentadas na Figura 11, nota-se que a pressão média nos nós da rede diminui menos de 1% aos 20 anos de idade em relação a tubulação nova, em horários de baixo consumo, chegando a 2,5% de redução no pico de consumo, ao meio dia, fato que corrobora com o exposto anteriormente.

De maneira semelhante ao cenário sazonal, o efeito simples das horas do dia para o cenário de envelhecimento da tubulação, registrou valores significativos nas interações entre as sete primeiras horas do dia (0 às 7 h) e horários próximos ao meio-dia (11h às 14 h). Do mesmo modo, a grande diferença de demanda entre esses horários explica tais valores, ou seja, durante a madrugada o consumo de água é baixo, enquanto em horários próximos ao meio-dia o consumo é elevado. Valores significativos também foram registrados nas interações entre o período da madrugada, isto é, de 2h às 6h e os seguintes horários: 10h, 15h, 16h, 19h e 20h. Tal fato está associado ao coeficiente C, que com o passar dos anos, e consequentemente, o envelhecimento da tubulação, tem seu valor reduzido, levando a maiores valores de perda de carga unitária nas tubulações. Apesar de os horários de 10h, 15h, 16h, 19h e 20h não serem os de maior consumo no dia, ainda sim possuem uma demanda significativa quando comparados à madrugada. O aumento da perda de carga com o aumento da rugosidade, gerou a redução das pressões dinâmicas médias da rede, a ponto de apresentarem diferenças significativas entre os referidos horários, ou seja, pressões médias consideravelmente maiores durante o período da madrugada.

CONCLUSÃO

Por meio da criação de quatro cenários de variação de consumo baseados em dados presentes na literatura nacional, cada qual composto por uma simulação hidráulica feita através do software EPANET 2.0 e aplicados a uma rede de abastecimento de água potável fictícia do tipo malhada, foi possível identificar particularidades da variabilidade temporal horária, diária e sazonal, bem como o efeito provocado pelo envelhecimento da tubulação sobre o comportamento hidráulico da rede.

Ademais, por ter sido avaliada a situação crítica de funcionamento para todos os cenários criados, as análises estatísticas para variação sazonal e envelhecimento da rede, identificaram diferenças significativas no funcionamento hidráulico para o efeito simples da hora do dia, em ambos os casos, e das estações do ano, não sendo observadas interações entre os efeitos principais.

Com a análise dos quatro cenários, apesar de a rede malhada adotada para o estudo apresentar problemas em relação a baixas vazões e, conseqüentemente, baixas velocidades de escoamento de água, percebe-se que a variabilidade temporal tem influência significativa no funcionamento hidráulico, na qual o funcionamento crítico, isto é, as menores pressões e maiores vazões médias, são registradas na estação verão e em horários adjacentes ao meio-dia. Contudo, não se pode desprezar que o dimensionamento das redes de abastecimento de água do tipo malhada possui problemas, pois ao tratar de loteamentos de pequenas proporções e com abastecimento individual, é comum a generalização de derivações e não-discretização das tomadas de água, com intuito de simplificação de cálculos, alterando assim o comportamento hidráulico.

Os cenários criados, principalmente o sazonal, permitiram identificar que a perda de carga sofre mais influência dos diâmetros da tubulação do que da vazão, como esperado. Com a presença de um reservatório com carga constante, a variação das vazões não implicou a variação proporcional na pressão, fato que pôde ser observado pelas grandes diferenças percentuais encontradas entre as vazões das estações do ano ($\approx 50\%$) e as pequenas diferenças percentuais entre as pressões para o mesmo cenário ($\approx 10\%$).

Portanto, conclui-se que a variabilidade temporal e fatores associados a esta, são de fundamental importância na avaliação do funcionamento hidráulico de sistemas de distribuição de água, e que por isso devem estar presentes na fase de planejamento e projeto de redes de abastecimento, sendo analisadas também, no planejamento de futuras manutenções e intervenções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALTUNKAYNAK, A. & NIGUSSIE, T. A. (2017). Monthly Water Consumption Prediction Using Season Algorithm and Wavelet Transform-Based Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(6), 04017011-1 - 04017011-10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000761](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000761).
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2017). *NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público*. ABNT.
3. AZEVEDO NETTO, J. M. & FERNÁNDEZ, M. F. (2015). *Manual de Hidráulica*. Blucher.
4. BALLING JR, R. C. et al. (2008). Sensitivity of residential water consumption to variations in climate: An intraurban analysis of Phoenix, Arizona. *Water Resources Research*, 44(10), W10401-1 - W10401-11. <https://doi.org/10.1029/2007WR006722>.
5. BEAL, C. D. & STEWART, R. A. (2014). Identifying residential water end uses underpinning peak day and peak hour demand. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(7), 04014008-1 - 04014008-10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000357](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000357).
6. FOX, C. et al. (2009). Classifying households for water demand forecasting using physical property characteristics. *Land Use Policy*, 26, 558-568. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.08.004>.
7. GARMENDIA, M. et al. (2019). Pressure management and residential consumption reduction. *Water Supply*, 19(1), 236-244. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.071>.
8. GUIDI, J. M. M. (2016). *Análise da variação do consumo de água utilizando dados obtidos por supervisores remotos – estudo de caso: município de Franca-SP*. UNICAMP. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/320708>.
9. GUIMARÃES, A. J. A. et al. (2007). *Saneamento básico*. <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/Apostila%20IT%20179/Cap%204%20parte%201.pdf>.
10. HOYOS, D. & ARTABE, A. (2017). Regional Differences in the Price Elasticity of Residential Water Demand in Spain. *Water Resources Management*, 31, 847-865. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1542-0>.
11. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. (2019). *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*. <http://infoclima1.cptec.inpe.br/#>.

12. LOUSADA, S. et al. (2019) Modelação de sistemas de abastecimento de água: o caso de Ilha da Madeira. *Bitácora Urbano Territorial*, 29(2), 89-98. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v29n2.69381>.
13. MANGALEKAR, R. D. & GUMASTE, K. S. (2021). Residential water demand modelling and hydraulic reliability in design of building water supply systems: a review. *Water Supply*, 21(4), 1385-1397. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.021>.
14. MOURA, G. de A. et al. (2017). Neural fuzzy control system for optimal operation of water distribution networks. *Anais do XV Seminário Iberoamericano de Redes de Água*. SRNN. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3113742>.
15. RAY, P. et al. (2020). Vulnerability and risk: climate change and water supply from California's Central Valley water system. *Climatic Change*, 161, 177-179. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02655-z>.
16. REYES-PEACKE, S. et al. (2019). Irrigation of green spaces and residential gardens in a Mediterranean metropolis: gaps and opportunities for climate change adaptation. *Landscape and Urban Planning*, 182, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.006>.
17. ROUSHANGAR, K. & ALIZADEH, F. (2018). Investigating effect of socio-economic and climatic variables in urban water consumption prediction via Gaussian process regression approach. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(1), 84-93. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.100>.
18. SALGUEIRO, F. J. et al. (2019). Unreported leaks location using pressure and flow sensitivity in water distribution networks. *Water Supply*, 19(1), 11-18. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.048>.
19. SILVA, M. L. da et al. (2019). Alternativa para dimensionamento de redes ramificadas de abastecimento de água: avaliação hidráulica e orçamentária. *Sustentare*, 3(1), 3-16. <http://dx.doi.org/10.5892/st.v3i1.5263>.
20. SIRSANT, S. & REDDY, M. J. (2021). Performance-based multi-objective design and expansion of water distribution networks considering life cycle costs and future demands. *Water Supply*, WS2021344. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.344>.
21. SPEIGHT, V. L. (2014). Impact of pipe roughness on pumping energy in complex distribution systems. *Procedia Engineering*, 70, 1575-1581. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.174>.
22. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. (2000). *EPANET: Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems*. <https://www.epa.gov/water-research/epanet#tab-5>.
23. WALTER, D. & KLINGEL, P. (2021). System for controlled distribution of non-demand-covering water availability: concept, design and modelling. *Water Supply*, 21(4), 1538-1551. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.028>.
24. YANG, J. et al. (2021). Integrated RAGA-PP water demand forecast model (case study: Shaanxi Province, China). *Water Supply*, 21(4), 1806-1816. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.034>