



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



Análise Comparativa de Métodos de Distribuição de Demandas em Sistemas de Abastecimento de Água

Marcelo Lima Cance

Aluno de Graduação em Engenharia Ambiental, marcelo_cance@ufms.br

Dr. Enio Arriero Shinma

Orientador

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

O abastecimento de água é um dos serviços essenciais para a sociedade moderna, exigindo metodologias eficientes para a distribuição de demandas em redes hidráulicas, especialmente em cenários onde há limitação de dados comerciais e operacionais. A correta estimativa dessas demandas impacta diretamente o planejamento, operação e expansão dos sistemas de abastecimento. Este estudo compara quatro métodos distintos de distribuição de demandas em modelagem hidráulica: (1) distribuição por matrículas georreferenciadas, (2) distribuição por área de influência, (3) distribuição uniforme entre nós e (4) distribuição proporcional por áreas de telhados. A acurácia dessas abordagens foi analisada por meio de parâmetros hidráulicos fundamentais, como Perda de Carga Unitária (m/km), velocidade média (m/s) e vazão (l/s). Com relação a densidade de ocupação, o Método de Distribuição por Área de Telhados (MDAT) foi o mais acurado, com variações percentuais na ordem de 1% em relação ao método base nos setores com construções ocupando a maior parte da área total, garantindo maior fidelidade na distribuição das demandas, resultado similar a (Girol et al., 2017). No entanto, sua aplicação em áreas com poucas construções e muita área livre revelou limitações, com variações percentuais de até 20%, mesmo que no dado caso todos os métodos apresentaram variações de ao menos 5% ao comparar os parâmetros analisados, demonstrando a necessidade de abordagens alternativas. O Método de Distribuição Uniforme por Área (MDUA) mostrou-se mais eficiente para regiões em estágio inicial de ocupação territorial, eliminando a necessidade de interpolação com densidade demográfica, o que torna sua aplicação mais ágil. Além disso, reforço a importância da disponibilidade de dados comerciais e operacionais, pois a ausência de um cadastro detalhado de consumidores pode comprometer a acurácia dos modelos hidráulicos pela ausência do histórico de consumo bem como o conhecimento da posição geográfica. Espero que os achados deste estudo possam contribuir para a otimização do planejamento e gestão de sistemas de abastecimento de água, oferecendo noção da representatividade de cada metodologia viável para a modelagem de redes em diferentes contextos urbanos.

Palavras-chave: Modelagem hidráulica, distribuição de demandas, abastecimento de água, planejamento urbano.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida e desempenha um papel fundamental na manutenção dos ecossistemas e na sustentabilidade das atividades humanas (Alves, 2010). O abastecimento de água é um dos serviços mais críticos para a sociedade moderna, sendo indispensável para consumo humano, higiene, agricultura e atividades industriais. Segundo Tsutiya (2006), um Sistema de Abastecimento de Água (SAA) deve garantir água de qualidade, na quantidade e condições adequadas ao seu uso.

Na engenharia hidráulica, diversos métodos são empregados para o dimensionamento e a análise de redes de abastecimento de água. Técnicas iterativas, como o método de Hardy-Cross, e softwares especializados baseados em princípios da hidráulica e mecânica dos fluidos como HES-HAS, WaterGEMS, EPANET, CESSG, CDREN entre outros revolucionaram a forma de simular e gerenciar esses sistemas. O uso desses softwares possibilita a construção de modelos incorporando variáveis como topografia, características das tubulações, da região, padrões de consumo e variações climáticas, permitindo uma avaliação detalhada do comportamento da rede em diferentes cenários operacionais e facilitando a construção do modelo em si, com importação de cadastro em CAD, interpolação das cotas através de curvas de nível e demais funcionalidades que otimizam o tempo de análise, fornecendo mais tempo para trabalhar o modelo e analisar as possibilidades.

Um dos aspectos fundamentais na modelagem de sistemas de abastecimento de água é a definição da distribuição das demandas na rede, pois a escolha do método influencia diretamente a acurácia da simulação e o planejamento do sistema. Este estudo propõe uma análise comparativa de quatro métodos distintos de distribuição de demandas:

1. Distribuição por matrículas georreferenciadas;
2. Distribuição por área de influência;
3. Distribuição uniforme entre nós;
4. Distribuição proporcional por áreas de telhados.

O objetivo central deste estudo é comparar os resultados obtidos a partir dos quatro métodos, identificando suas vantagens e limitações, e fornecendo subsídios para um planejamento mais eficiente e fundamentado na distribuição de demandas em sistemas de abastecimento. Os resultados desta pesquisa contribuem para uma melhor compreensão das dinâmicas de distribuição de água, possibilitando melhorias nos processos de planejamento e gestão desses sistemas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

Glória de Dourados é um município localizado no estado de Mato Grosso do Sul, na região Centro-Oeste do Brasil. Atualmente, conta com uma população de aproximadamente 10.444 habitantes, segundo o censo de 2022 e aproximadamente 3221 ligações de água de acordo com o cadastro recebido.

Situado no sudoeste de Mato Grosso do Sul, Glória de Dourados está inserido na microrregião de Iguatemi, e suas coordenadas geográficas são 22°25'04" S e 54°13'58" O. A cidade está a 267 km da capital do estado, Campo Grande, e a 1.251 km de Brasília, capital do país.

O mapa de localização no contexto do estado do Mato Grosso do Sul encontra-se na Figura 1 a seguir em que os mapas a direita representam a posição do município no contexto estadual e local de fronteiras municipais além de fornecer visão da área urbanizada, que se trata da área de estudo deste estudo.

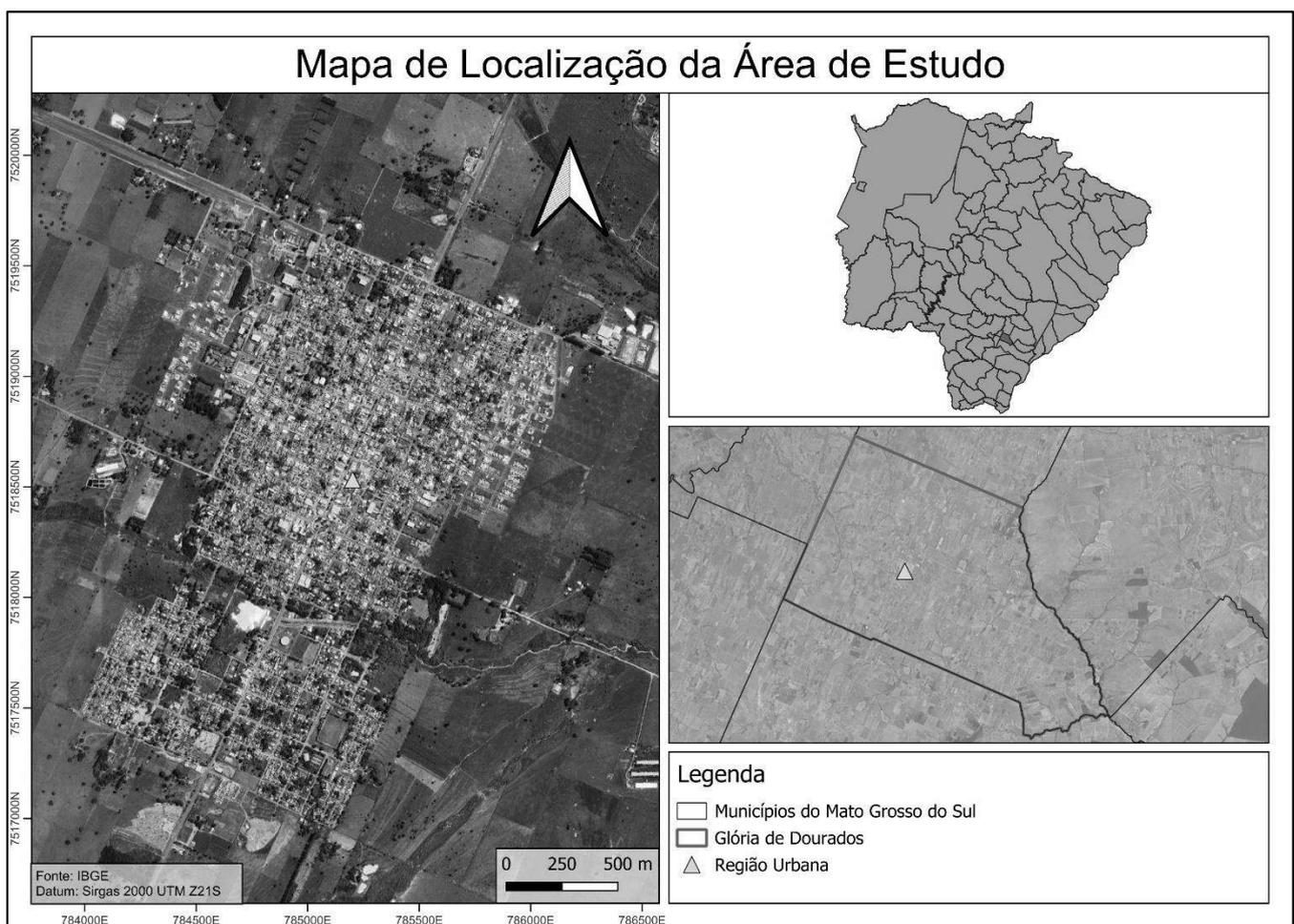


Figura 1 - Localização do Município

2.2 Modelo Hidráulico

A modelagem hidráulica de sistemas de abastecimento de água é realizada por meio da aplicação de métodos numéricos para calcular as propriedades hidráulicas da rede de distribuição, como vazão, pressão e perda de carga. Atualmente utilizam-se softwares capazes de realizar esses cálculos com rapidez, por isso fez-se o uso do WaterGEMS, capaz de integrar dados geoespaciais, desenhos CAD, bancos de dados e planilhas, o que permite a construção de modelos detalhados e a realização de simulações que avaliam o desempenho da rede sob diferentes cenários operacionais.

Ele permite a configuração de cálculo para a fricção e para as equações hidráulicas, o método de Hazen-Williams é frequentemente adotado para o cálculo das perdas de carga nas tubulações da rede de distribuição de água. Esse método, baseado em uma fórmula empírica, é projetado para sistemas de abastecimento de água pressurizada e se destaca pela simplicidade e eficiência computacional. No WaterGEMS, a aplicação do método de Hazen-Williams se dá por meio da equação (I).

Na equação (I) o coeficiente C é um parâmetro crítico para o cálculo, sendo ajustável conforme o tipo de material e a condição da tubulação. O software permite que os engenheiros insiram esse valor manualmente ou o defina de forma automática, dependendo das propriedades dos materiais de tubulação da rede modelada.

O método de Hazen-Williams é implementado de forma a considerar as características hidráulicas de cada trecho da rede, com o cálculo da perda de carga sendo feito para cada segmento de tubulação, o que facilita a análise do comportamento global do sistema de distribuição. Essa abordagem é eficiente, pois permite modelar o comportamento da rede sem a necessidade de se calcular o fator de fricção diretamente, como acontece no método de Darcy-Weisbach, simplificando o processo de modelagem sem comprometer a precisão nas análises de redes de água pressurizada.

O motor de cálculos realiza as simulações com base nos dados inseridos sobre a rede, como o diâmetro das tubulações, o comprimento das linhas e os coeficientes de rugosidade. O modelo pode ser configurado para simular diferentes cenários de operação, permitindo que os engenheiros testem variações nos parâmetros hidráulicos, como alterações em válvulas, bombas ou condições de demanda, e avaliem os impactos dessas modificações na rede de abastecimento.

A utilização do método de Hazen-Williams no software escolhido é particularmente indicada para a análise de sistemas de abastecimento de água, pois esse método simplificado é adequado para redes pressurizadas, onde a turbulência e as flutuações de fluxo são relativamente controladas. Embora o método seja empírico e tenha suas limitações em sistemas com comportamentos mais complexos, como aqueles sujeitos a transientes hidráulicos ou fluxos de ar, sua aplicação no WaterGEMS oferece uma forma eficiente e prática de modelar redes de distribuição de água em termos de perdas de carga.

É importante notar que, o software suporta a calibração do modelo, ajustando os parâmetros hidráulicos com base em dados reais de campo. Em situações em que a calibração é viável, como em sistemas operacionais com dataloggers para monitoramento de pressões e vazões, o modelo pode ser ajustado para refletir de forma mais precisa o comportamento real da rede, melhorando ainda mais a acurácia das simulações.

Em termos de unidade, as adotadas as seguintes unidades para os cálculos: carga de pressão em metros de coluna d'água (mca), vazão em litros por segundo (l/s), velocidade média em metros por segundo (m/s) e perda de carga unitária em metros por quilômetro (m/km), o que facilita a análise e interpretação dos resultados das simulações.

Com essa configuração, o modelo proporciona uma plataforma robusta e eficiente para a modelagem e análise hidráulica de redes de abastecimento de água para otimizar o processo de cálculo e simular diferentes condições de operação do sistema.

2.3 Dados para as simulações

2.3.1 Cadastro Comercial

O cadastro comercial de uma companhia de saneamento de água é fundamental para a gestão eficiente do abastecimento, pois reúne informações sobre os consumidores, incluindo volume de consumo, localização e status das ligações de água.

Neste estudo, foi utilizada uma planilha contendo dados de consumo para cada unidade consumidora no período de julho de 2023 a julho de 2024, associada ao respectivo endereço (rua e número). Essas informações são essenciais para garantir maior precisão na modelagem do sistema, possibilitando uma estimativa mais fiel da demanda e uma distribuição geograficamente coerente dos consumos.

Para integrar essas informações ao modelo hidráulico, os endereços foram convertidos em coordenadas geográficas por meio de um script desenvolvido em Python, anexado ao final do documento, no Anexo I que através do input da planilha contendo as matrículas, ruas, números e cidade gera uma planilha resposta com as matrículas, endereços encontrados e coordenadas geográficas de cada ponto. Esses pontos foram usados como consumidores no modelo do sistema de abastecimento de água.

2.3.2 Cadastro Técnico

O cadastro técnico é um elemento essencial para a modelagem hidráulica, pois fornece informações detalhadas sobre a rede de abastecimento, incluindo diâmetro das tubulações, posição das redes, conexões, registros, reservatórios, ruas e quadras.

O cadastro técnico da cidade estudada foi disponibilizado em formato DWG e serviu como base para a construção do modelo hidráulico. No entanto, algumas informações, como tempo médio de operação das tubulações, não estavam presentes nesse arquivo. Para contornar essa limitação, foram solicitados dados complementares, permitindo a estimativa do coeficiente de rugosidade das tubulações de acordo com seu tempo de operação e material.

Segundo Pesqueira (2022), o cadastro técnico-operacional é essencial para a eficiência dos sistemas de abastecimento de água, e a qualidade desse cadastro é um fator determinante em modelos desses sistemas, pois eventuais inconsistências podem comprometer a validade dos resultados da modelagem. Por exemplo, um registro fechado erroneamente identificado como aberto pode levar a simulações imprecisas e divergentes dos valores observados em campo.

A rede possui um total de 412 nós e 591 trechos, totalizando aproximadamente 51Km de rede enterrada para distribuição pública de água, o cadastro dessas redes pode ser visto na Figura 2, em que verde representa 50mm de diâmetro, amarelo 75mm, rosa 100mm, vermelho 150mm, ciano 200mm, azul escuro 250mm e marrom em um trecho pequeno do R2 de 400mm.

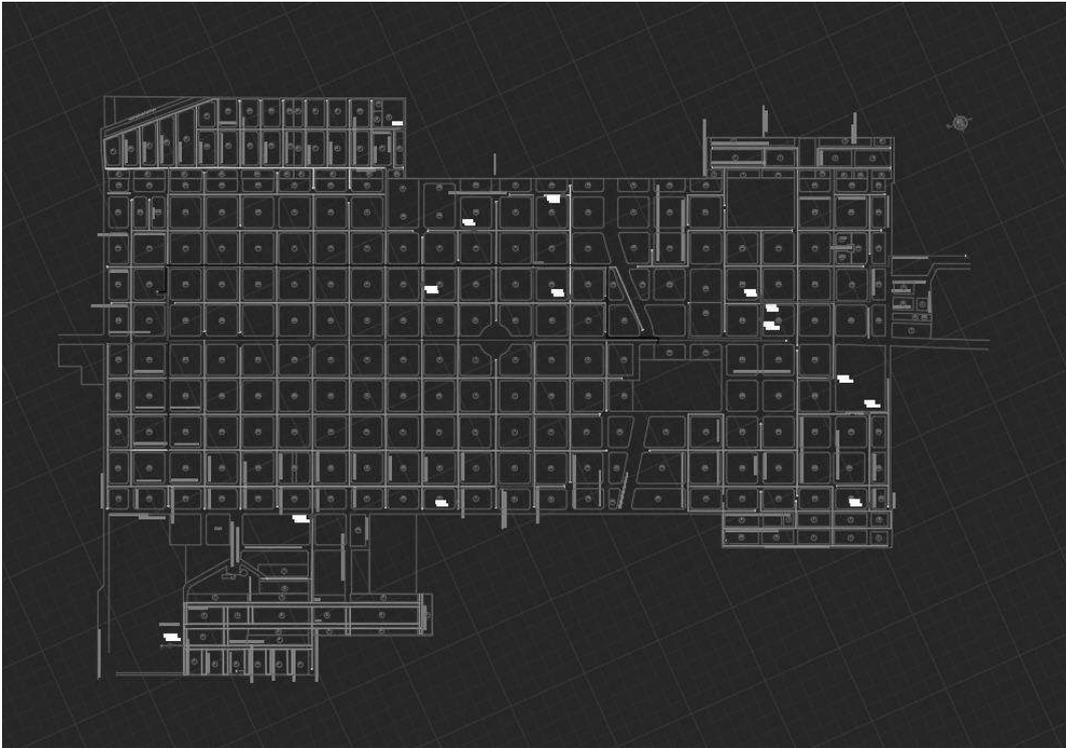


Figura 2 - Cadastro Técnico das Redes

2.3.3 Topografia

A topografia da região estudada tem influência direta sobre diversos aspectos da modelagem hidráulica, afetando as pressões nos trechos, o custo de operação do sistema e a demanda energética necessária para bombeamento.

Para representar essas variações no modelo, foi utilizado um arquivo GIS contendo dados topográficos do local. A inclusão dessas informações no sistema de modelagem garantiu uma representação mais realista do terreno, melhorando a confiabilidade das simulações.

2.3.4 Áreas de telhados

A identificação e análise das áreas de telhados foram realizadas por meio do projeto Open Buildings da Google, que utiliza inteligência artificial para mapear edificações com base em imagens de satélite.

Para obter esses dados, foram baixados os centróides dos telhados da área de estudo, a partir de um polígono previamente definido. Cada estrutura identificada como telhado foi associada a um grau de confiança (variando de 0 a 1). Neste estudo, não houve filtragem de estruturas com baixo grau de confiança, pois mesmo essas estão localizadas em lotes urbanos e representam potenciais pontos de consumo de água.

O download desses dados foi realizado por meio da integração do projeto Open Buildings com o ambiente de programação Google Colab. O processo envolveu a inserção das coordenadas dos vértices do polígono em formato JSON, permitindo que um script automatizado realizasse o download dos dados disponíveis para a região analisada.

2.4 Parâmetros hidráulicos

2.4.1 Coeficiente de Rugosidade

Para estimar a rugosidade associada a cada tubulação adotou-se como base um tempo de operação de pelo menos 20 anos de cada trecho e os valores de cada material foram distribuídos conforme Netto e Fernández (2015) estima.

Tabela 1 - Coeficiente C por material e idade das tubulações. (Netto e Fernández, 2015).

Tubulações compostas por :	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 20 anos
Ferro fundido sem revestimento permanente, 125 < DN < 550	125	105	95
PVC ou resina com fibra, juntas tipo PB ou luva, até DN 125	137,5	135	132,5
PVC ou resina com fibra, juntas tipo PB ou luva, 125 < DN < 550	140	137,5	135
Material usado eventualmente ou em desuso:			
Cimento Amianto	140	130	120

A rugosidade é quem determina a intensidade do atrito interno das tubulações que farão com que a água perca muita energia durante sua movimentação.

2.4.2 Equação de Perda de Carga

A perda de carga nas tubulações acontece devido ao atrito da água com a parede interna dos tubos, sendo diferente para cada tipo de material. As principais consequências da perda de carga são quedas de pressão na rede e um gasto maior de energia nas elevatórias de água para realizar o recalque.

O método utilizado para o cálculo de perda de carga nas tubulações de distribuição de água é realizado por meio da fórmula de Hazen-Williams, conforme equação a seguir:

$$H_f = 10,65 * L * \left(\frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} * D^{4,87}} \right) \quad (I)$$

Onde:

H_f = Perda de carga na tubulação (m/km);

D = Diâmetro do tubo (m);

C = Coeficiente de rugosidade(-);

Q = Vazão (m³/s).

2.4.3 Reservação

Como a cidade em estudo não possuía informação sobre os níveis operacionais dos reservatórios até a data de realização deste estudo, foi adotado que todos os reservatórios estariam com nível de água de pelo menos 50%, em busca de representar a realidade, visto que os reservatórios não permanecem cheios durante o dia todo e nem vazios.

A elevação atribuída a cada reservatório consiste na soma da cota de fundo (cota do terreno) com metade da altura total do reseratório, admitindo que o mesmo possui volume útil igual ao volume total, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Alturas Operacionais Simuladas

ID	Volume (m ³)	Cota do Terreno (m)	Altura Operacional Simulada (m)	Cota Final (m)
R1	30	429	3	432
R4	30	397	5	402
R3	50	417	5	422
R2	180	422	10	432

A localização dos reservatórios no ambiente urbano pode ser visto na Figura 3 a seguir:

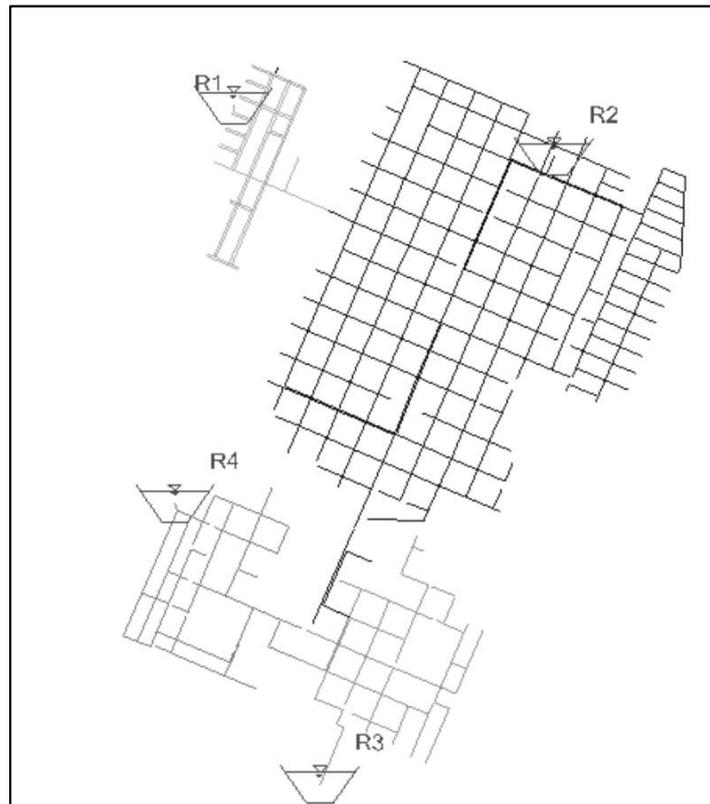


Figura 3 - Posição dos Reservatórios no Modelo

2.4.4 Demanda

A determinação dos consumos e das vazões de projeto em sistemas de distribuição de água é uma etapa fundamental para o adequado dimensionamento da infraestrutura. As vazões devem atender às demandas domésticas, comerciais, industriais e públicas, além de prever perdas, fugas no sistema e a vazão necessária para combate a incêndios.

Neste estudo, a série histórica de consumo foi disponibilizada pela concessionária responsável pelo abastecimento de água da cidade analisada. A partir desses dados, foi calculada a média de consumo para cada unidade ativa, servindo como base para a estimativa do consumo total da rede.

A demanda calculada para cada consumidor foi determinada por meio da seguinte fórmula, que converte a demanda média em metros cúbicos por mês (m³/mês) na demanda máxima horária em litros por segundo (L/s):

$$Q = \frac{q}{30 \cdot 86400} \times 1000 \quad (\text{II})$$

Onde:

Q = Consumo médio por consumidor (L/s)

q = Consumo de água médio histórico (m³/mês)

$$D = Q \cdot (1 - IPD) + (Q \cdot k1 \cdot k2) \quad (\text{III})$$

Onde:

D = Demanda Máxima (l/s)

Q = Vazão de projeto por consumidor (l/s)

IPD = Índice de perdas (%) – 44%

k1 = Coeficiente do dia de maior consumo

k2 = Coeficiente da hora de maior consumo

A demanda máxima horária foi utilizada para realizar as comparações entre métodos no estudo por ser o parâmetro base de dimensionamento de redes de abastecimento de água, visto que ao atender o cenário de maior demanda o sistema conseguirá atender também os cenários de demanda inferior. Os valores encontrados para a demanda média, perdas e demanda máxima horária, em L/s podem ser vistos na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Demanda Calculada

Consumo Médio (L/s)	Perdas (L/s)	Demanda Máxima Horária (L/s)
15,591	8,73	36,797

2.5 Métodos de simulação

Neste estudo, foram avaliados quatro métodos distintos para a distribuição de demandas em um sistema de abastecimento de água.

Os métodos de distribuição considerados foram:

- **Método 1:** Matrículas georreferenciadas inseridas diretamente no modelo hidráulico.
- **Método 2:** Distribuição das demandas com base na área de contribuição.
- **Método 3:** Distribuição uniforme das demandas entre os nós de cada setor.
- **Método 4:** Distribuição proporcional por área de telhados de cada setor.

Todos os Métodos utilizaram as mesmas informações estruturais do sistema de abastecimento, diferenciando-se apenas pela forma como o consumo foi atribuído a cada nó da rede.

Para avaliar as diferenças e comparar os métodos entre si foram utilizados os parâmetros médios da rede e também o coeficiente de determinação R² obtido comparando os resultados trecho a trecho e nó a nó, através do excel.

Método 1: Matrículas Georreferenciadas

No primeiro método, as demandas foram inseridas conforme a localização geográfica das unidades consumidoras, utilizando os chamados Custom Meters, que representam pontos de consumo conectados diretamente à rede pública de abastecimento de água. Esse método serviu como base comparativa, permitindo avaliar a acurácia dos demais métodos na representação da distribuição dos consumos em um Sistema de Abastecimento de Água (SAA).

A inserção dos consumidores em sua posição geográfica foi realizada por meio da ferramenta

Model Builder do software WaterGEMS, que possibilita a importação de dados a partir de uma planilha CSV contendo coordenadas geográficas e consumos individuais. Após a importação desses dados, as demandas foram distribuídas através da ferramenta Load Builder, que associa cada ponto de consumo a um nó ou trecho da rede.

Para este estudo, a conexão dos consumidores com a rede foi feita por meio da associação aos nós mais próximos, garantindo maior representatividade da demanda no modelo hidráulico. A Figura 4 ilustra um exemplo de consumidores conectados à rede no modelo gerado.

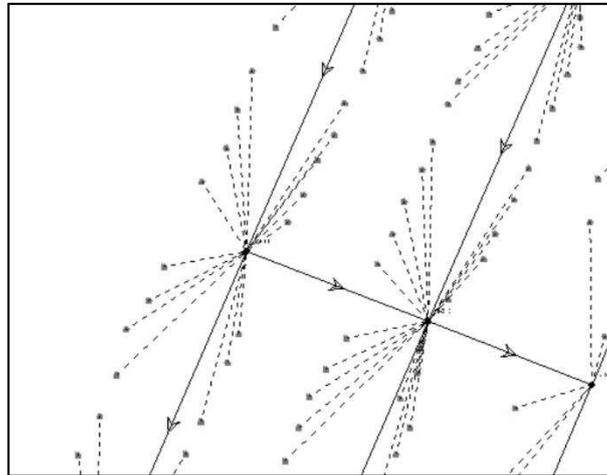


Figura 4 – Consumidores Georeferenciados

No Método 2 (Método de Distribuição Uniforme por Área), o consumo total de cada setor foi distribuído uniformemente pela área de influência de cada nó do sistema, utilizando polígonos de Thiessen, também conhecidos como diagramas de Voronoi.

Esses diagramas representam uma divisão espacial onde cada polígono corresponde à área mais próxima de um determinado ponto em relação a todos os outros. Essa abordagem é amplamente empregada em diversas áreas, como geoprocessamento, meteorologia e logística, para definir zonas de influência e otimizar a distribuição de recursos.

No contexto deste estudo, os polígonos de Thiessen foram gerados por meio da ferramenta Thiessen Polygons do software WaterGEMS, tendo como parâmetros os nós do sistema e os limites de cada setor. Isso permitiu uma distribuição espacial mais precisa e condizente com a infraestrutura existente, garantindo que cada nó representasse uma área de contribuição de forma proporcional.

A Figura 5 ilustra as áreas de influência definidas para cada nó do sistema, evidenciando a metodologia aplicada na distribuição das demandas.

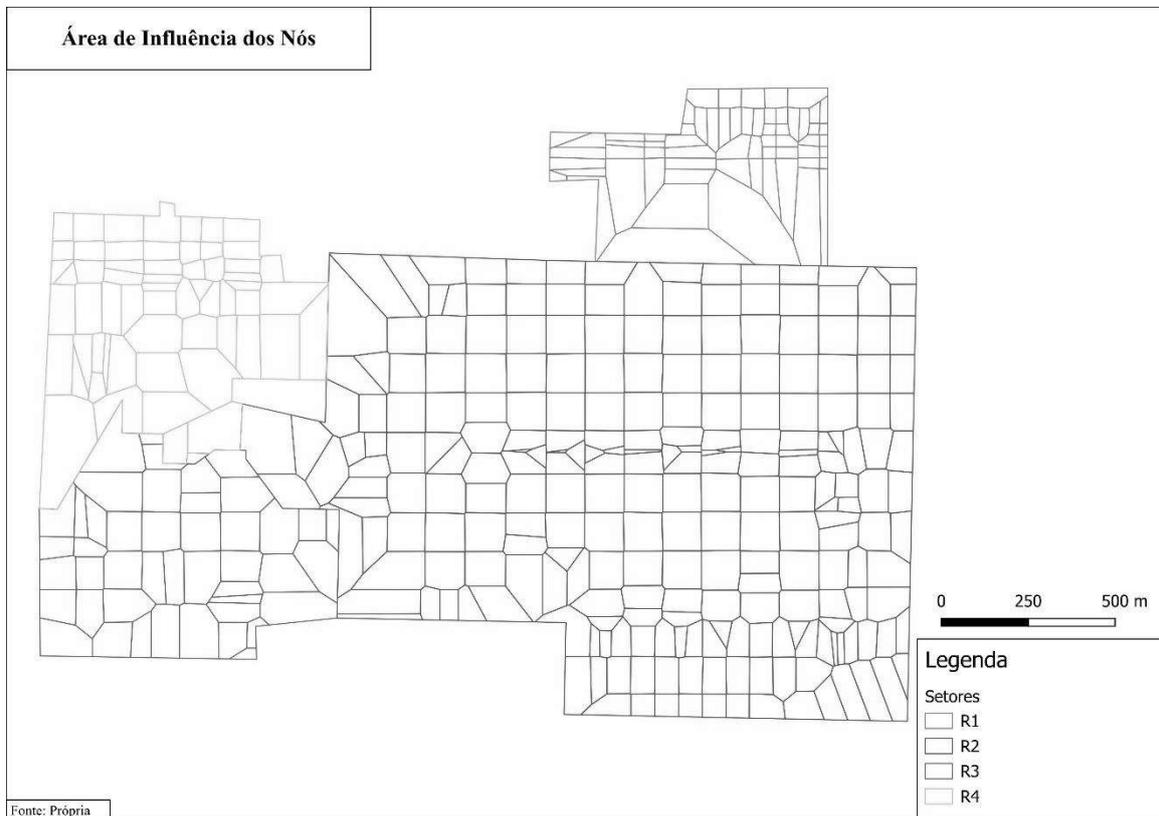


Figura 5 – Área de Influência dos Nós

Essa metodologia baseia-se em uma premissa comumente adotada em projetos de redes de abastecimento de água quando não há informações detalhadas sobre os consumidores, como localização exata e histórico de consumo. Nesse método, cada nó da rede recebe uma área de influência, utilizada para representar um valor estimado de demanda.

Para cada nó da rede, a demanda é calculada com base na seguinte equação:

$$D = \frac{An \cdot Ds}{Ats} \quad (IV)$$

Onde:

D = Demanda de cada nó (L/s)

An = Área de influência do nó (m²)

Ds = Demanda Total do Setor (L/s)

Ats = Área Total do Setor (m²)

No Método 3 (Método de Distribuição Uniforme por Nós) o consumo total de cada setor foi dividido pelo número total de nós presentes no mesmo, resultando em uma distribuição igualitária entre todos os nós do setor. Dessa forma, cada nó recebe a mesma demanda, independentemente da sua localização ou características específicas.

Este método foi escolhido por sua simplicidade e rapidez de aplicação, sendo frequentemente utilizado em sistemas menores, onde não há necessidade de alta acurácia na distribuição das demandas. Embora sua aplicação seja prática, ele não considera variações no consumo real dos consumidores, podendo resultar em uma representação menos fiel da distribuição hidráulica no sistema.

A demanda de cada nó, dependendo do setor, é calculada pela seguinte equação:

$$D = \frac{Ds}{Qn} \quad (V)$$

Onde:

D = Demanda de cada nó (l/s)

Qn= Quantidade de nós no setor (un)

Ds= Demanda total do Setor (l/s)

No Método de Distribuição Por Área de Telhados, como o próprio nome sugere, as demandas foram distribuídas proporcionalmente à área dos telhados de cada setor. A abordagem é semelhante ao Método 2 (Distribuição Uniforme por Área), mas com a diferença de que não considera vazios urbanos, focando exclusivamente em estruturas construídas.

Essa estratégia busca aumentar a acurácia na distribuição das demandas, pois parte do princípio de que o consumo de água ocorre onde há edificações. Dessa forma, ao utilizar as áreas dos telhados como referência, a metodologia oferece uma representação mais parecida com o Método 1 onde os consumidores são inseridos, de fato em suas posições geográficas, o que distribui as demandas de modo mais representativo ao que acontece na realidade.

Os centróides dos telhados analisados, bem como a setorização dos mesmos, podem ser visualizados na Figura 6 a seguir.

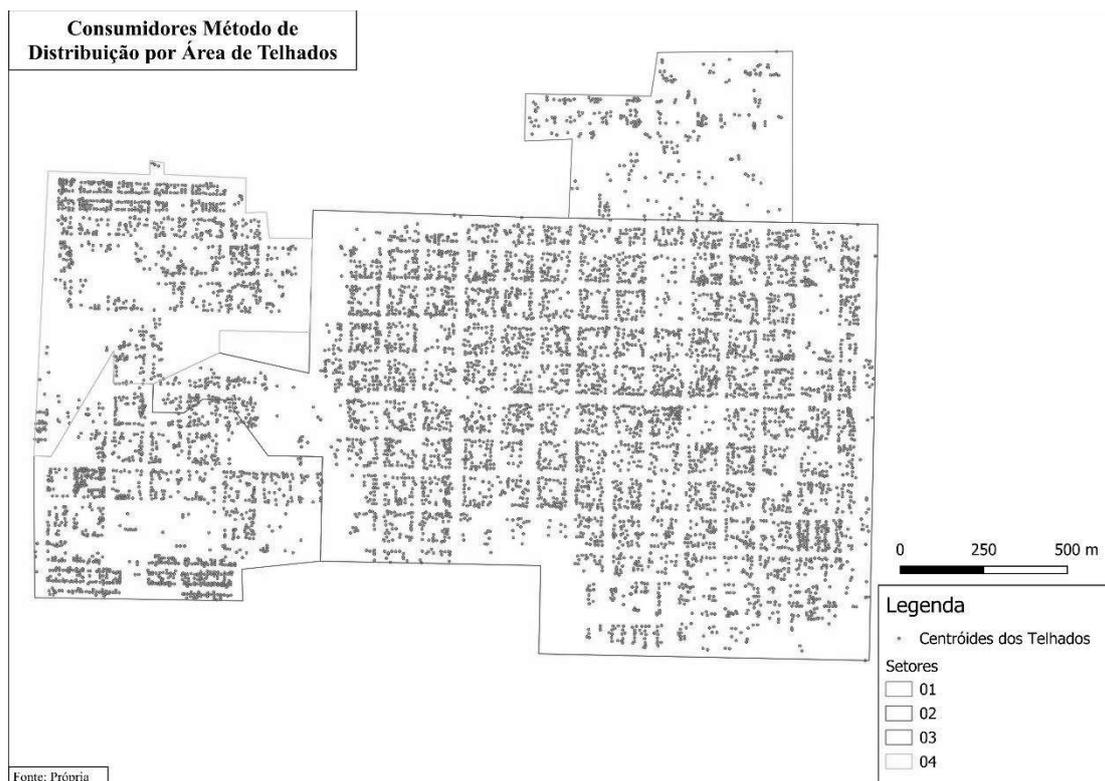


Figura 6 – Centróides dos telhados usados como consumidores

Essa metodologia é proposta como uma alternativa mais lógica para o uso das áreas de influência, eliminando a necessidade de tratamentos adicionais, como a interpolação com informações de densidade demográfica. Isso se mostra especialmente relevante no contexto brasileiro, onde a atualização desses dados ocorre de forma lenta—sendo o último censo realizado em 2010.

Ao dispensar completamente o uso dessas informações, esse método torna o processo de modelagem mais ágil e eficiente, permitindo uma estimativa mais direta das demandas sem depender de dados demográficos que podem estar defasados.

A equação utilizada para a distribuição das demandas é expressa por:

$$D = \frac{At * Ds}{Ats} \quad (VI)$$

Onde:

D = Demanda de cada telhado (L/s)

At= Área do telhado (m²)

Ds= Demanda do Setor (L/s)

Ats = Área Total do Setor (m²)

A Figura 7 mostra um exemplo de planilha resposta após aplicação da fórmula e com as informações necessárias para a realização das contas, em que Dmax é a demanda máxima horária de cada setor e Dmax-Ponto é a demanda(l/s) atribuída ao centróide de cada telhado em função da área (m²) de cobertura.

area	FID	Setores	Dmax	Dmax-Ponto
88,457	1 02		24,573	0,0042
54,435	1 02		24,573	0,0026
178,847	1 02		24,573	0,0085
123,364	3 04		5,707	0,011
62,806	1 02		24,573	0,003
229,115	1 02		24,573	0,0108

Figura 7 – Planilha de dados de demandas de telhados

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, esses serão organizados por setor de abastecimento, considerando cada reservatório e método de distribuição de demandas utilizado na simulação.

Para garantir uma apresentação estruturada e objetiva dos dados, os resultados serão segmentados da seguinte maneira:

- Os resultados referentes aos trechos estarão no tópico Trechos;
- Os resultados referentes aos nós estarão no tópico Nós.

Além disso, para simplificar a nomenclatura dos métodos analisados, serão adotadas as seguintes abreviações:

- **MDG** – Método de Distribuição por Matrículas Georreferenciadas
- **MDUA** – Método de Distribuição Uniforme por Área
- **MDUN** – Método de Distribuição Uniforme por Nós
- **MDAT** – Método de Distribuição por Área de Telhados

Essa organização visa facilitar a compreensão e comparação dos diferentes métodos de distribuição de demandas, permitindo uma análise detalhada dos impactos de cada metodologia no sistema de abastecimento de água.

3.1 Trechos

A perda de carga em trechos de um modelo hidráulico influencia diretamente o sistema hidráulico, determinando a redução da pressão ao longo do percurso da água. A relevância desse parâmetro se torna ainda maior em sistemas dinâmicos, onde há variações horárias ou diárias de consumo.

A média da perda de carga para cada setor pode ser visualizada no Figura 8.

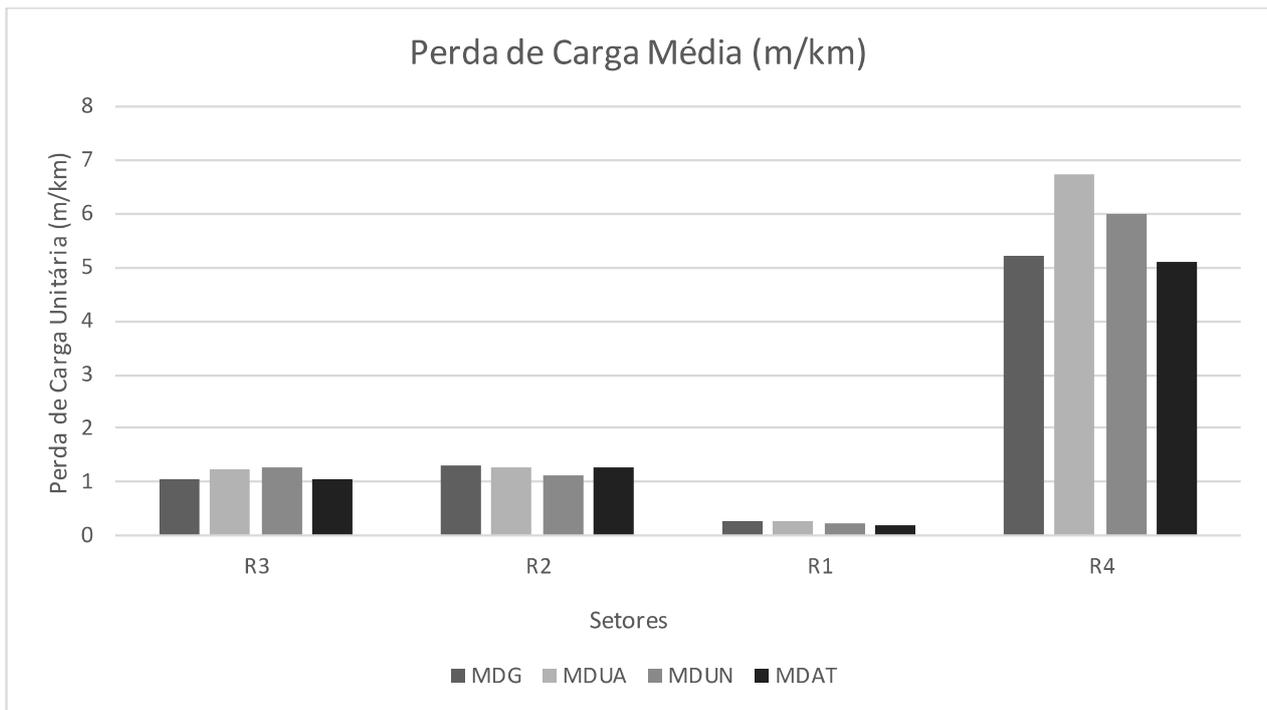


Figura 8 – Perda de Carga Média por Método e Setor

Os resultados indicam que o método que mais se aproxima da perda de carga do método base (MDG) é o MDAT, com exceção do setor R1, onde o MDUA apresentou melhor desempenho. Ao realizar uma comparação percentual, a diferença entre MDAT e MDG se mostrou mínima, conforme demonstrado na Tabela 4, onde os campos verdes indicam as menores variações percentuais para cada setor.

Tabela 4 - Diferenças percentuais entre os métodos em relação à base para a perda de carga

Diferença percentual entre os métodos – Perda de Carga Unitária			
	MDG x MDUA	MDG x MDUN	MDG x MDAT
R3	19,84%	23,60%	-0,26%
R2	-2,76%	-14,62%	-2,23%
R1	5,20%	-17,43%	-24,02%
R4	19,84%	23,60%	-0,26%

Essa característica se manteve para os demais parâmetros da rede, como velocidade (m/s) e vazão (L/s), replicando o mesmo padrão observado na perda de carga. Esse comportamento pode ser explicado pelas características geográficas do setor R1, uma área de loteamento recém-construído, onde imagens de satélite indicam a presença de construções finalizadas, mas sem consumo efetivo, conforme o cadastro comercial fornecido. Isso sugere que o MDAT pode ser impreciso em regiões pouco adensadas, onde há edificações sem ligação real de água.

Além disso, a análise do coeficiente de determinação (R^2) revelou que o MDAT obteve o maior valor, $R^2 = 0,959$, demonstrando uma boa relação entre esse método e o método base (MDG). Os valores de R^2 dos demais métodos podem ser consultados na Tabela 5.

Tabela 5 - Correlação da Perda de Carga Unitária com o método base

R ² Perda de Carga Unitária	
0,854	R ² Mdua
0,928	R ² MDUN
0,959	R ² MDAT

Em relação às velocidades médias dos condutos, novamente com exceção do setor R1, o MDAT foi o método que melhor se aproximou da velocidade média de distribuição em cada reservatório. Isso reforça sua capacidade de incorporar informações geográficas na modelagem das demandas e distribuí-las conforme a área dos telhados.

As velocidades médias de cada setor podem ser visualizadas no Figura 9.

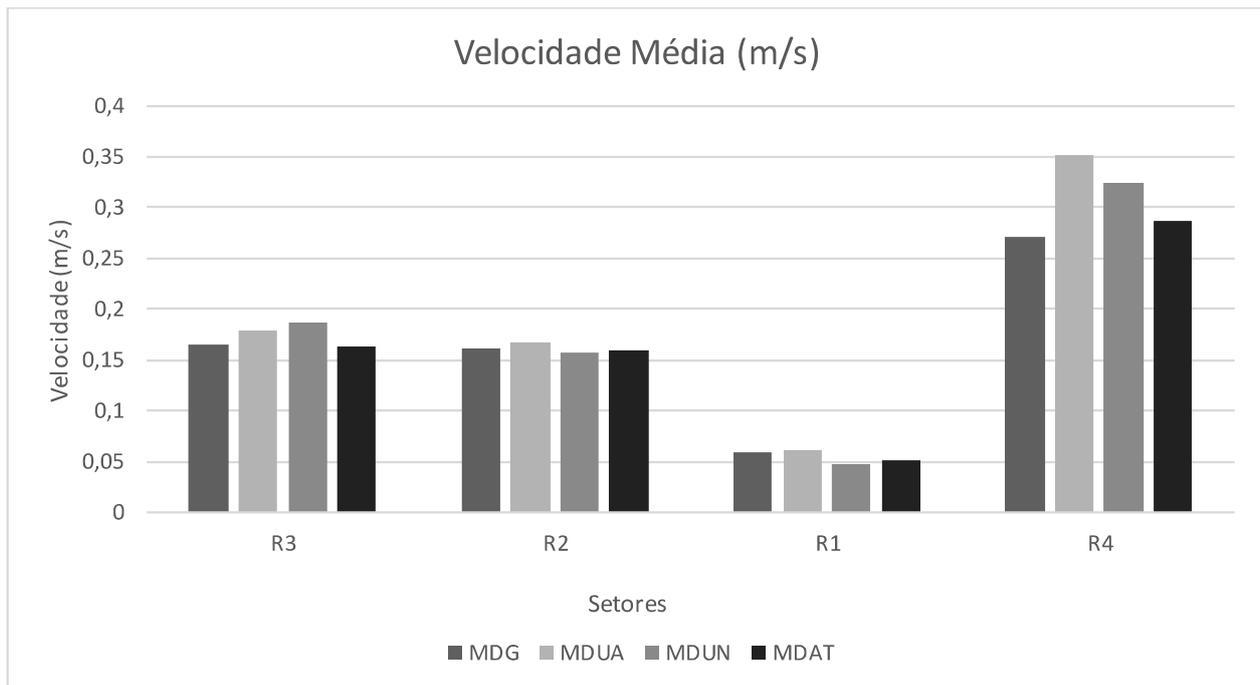


Figura 9 – Velocidade média por método e setor

A diferença percentual, mostrada no Figura 9 pode ser vista numericamente na Tabela 6.

Tabela 6 - Diferenças percentuais entre os métodos em relação à base para velocidade média

Diferença percentual entre os métodos – Velocidade Média (m/s)			
	MDG x Mdua	MDG x MDUN	MDG x MDAT
R3	9,21%	13,28%	-0,84%
R2	3,51%	-2,09%	-1,45%
R1	2,78%	-20,14%	-13,19%
R4	9,21%	13,28%	-0,84%

A análise do coeficiente de determinação confirmou novamente a acurácia do MDAT na representação das condições geográficas da rede, resultando em um R² de 0,948, enquanto os demais métodos permaneceram abaixo de 0,9, conforme indicado na

Tabela 7. Isso demonstra que, embora outros métodos possam representar melhor os resultados médios por setor, ao se realizar uma comparação individual por trecho, a correlação com o MDAT se mostrou mais precisa.

Tabela 7 - Correlação da velocidade média com o método base

R ² Velocidade	
0,846	R ² MDUA
0,871	R ² MDUN
0,948	R ² MDAT

O Figura 10 ilustra que, para a maioria dos setores, o método que mais se aproxima da média base é o MDAT, evidenciando sua acurácia e reforçando o padrão observado nos demais parâmetros analisados.

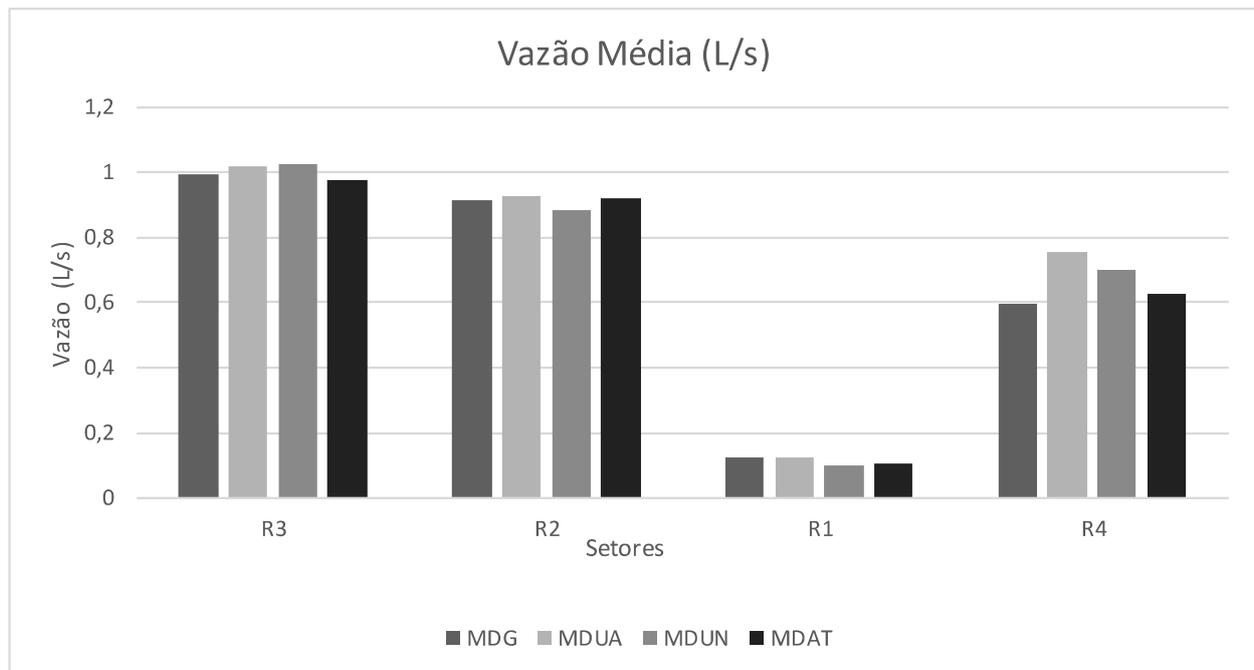


Figura 10 – Vazão Média por Método e Setor

A diferença percentual, mostrada na Figura 10 pode ser vista numericamente na Tabela 10.

Tabela 8 - Diferenças percentuais entre os métodos em relação à base para vazão média

Diferença percentual entre os métodos – Vazão Média (m/s)			
	MDG x MDUA	MDG x MDUN	MDG x MDAT
R3	2,92%	3,05%	-1,37%
R2	1,64%	-2,98%	0,68%
R1	2,35%	-18,62%	-13,54%
R4	2,92%	3,05%	-1,37%

Em relação aos valores de R^2 , todos os métodos apresentaram coeficientes elevados, com o menor valor igual a 0,986, enquanto o MDAT manteve o maior coeficiente, conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9 - Correlação da vazão média com o método base

R ² Vazões	
0,990	R ² MDUA
0,986	R ² MDUN
0,997	R ² MDAT

3.2 Pressões nos Nós

A análise das pressões nos nós é fundamental na modelagem hidráulica, pois influencia diretamente a viabilidade de novos loteamentos, além de subsidiar a tomada de decisão em diversos segmentos do saneamento. Foram avaliados os valores máximos e mínimos para cada setor, para verificar a variabilidade das pressões conforme a adoção dos diferentes métodos de distribuição de demanda, assim como a quantidade de nós com pressões distintas em relação ao modelo base (MDG). Essa análise possibilita mensurar a acurácia de cada metodologia utilizada.

Os resultados indicam que os métodos MDUA e MDAT apresentaram pouca diferença entre si, com 28% e 21% dos nós apresentando pressões divergentes em relação ao MDG. Por outro lado, o MDUN apresentou a maior variabilidade, atingindo 44% de nós com diferenças em comparação ao modelo base.

Ao analisar as variações máximas e mínimas em relação ao MDG, percebe-se que, de modo geral, as pressões não sofreram grandes oscilações. No entanto, no MDUA, a variação máxima chegou a 4 mca, um valor que, para muitas concessionárias, pode ser suficiente para revisão do modelo, exigindo ajustes adicionais. Nos outros métodos, as variações foram menores, variando entre 1 e 2 mca, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Variações Máximas e Mínimas do método base

Extremos de Variação de Pressão			
	MDUA	MDUN	MDAT
Max	4	2	1
Min	-2	-1	-2

Quanto ao coeficiente R^2 todos os métodos se mostraram satisfatórios tendo valores elevados de R^2 sendo o maior deles do MDAT, como pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11 - Correlação da pressão média com o método base

R ² Pressões	
0,995	R ² MDUA
0,997	R ² MDUN
0,998	R ² MDAT

As diferenças por setor para cada nó podem ser observadas em formato de mapa 3D personalizado nas Figura 11, Figura 12 e Figura 13.

Na Figura 11, observa-se a confirmação do padrão discutido no tópico anterior. O MDUA demonstrou ser um método eficiente para representar áreas em expansão, uma vez que no setor R1 não houve qualquer variação de pressão nos nós do sistema.

Por outro lado, foi também o método que apresentou as maiores amplitudes de variação de pressão

entre os nós, registrando oscilações de -2 a 4 mca em alguns setores. Esse comportamento reforça a característica do MDUA de proporcionar estabilidade em regiões em crescimento, porém com maior variabilidade na distribuição das pressões quando aplicado a setores mais consolidados.

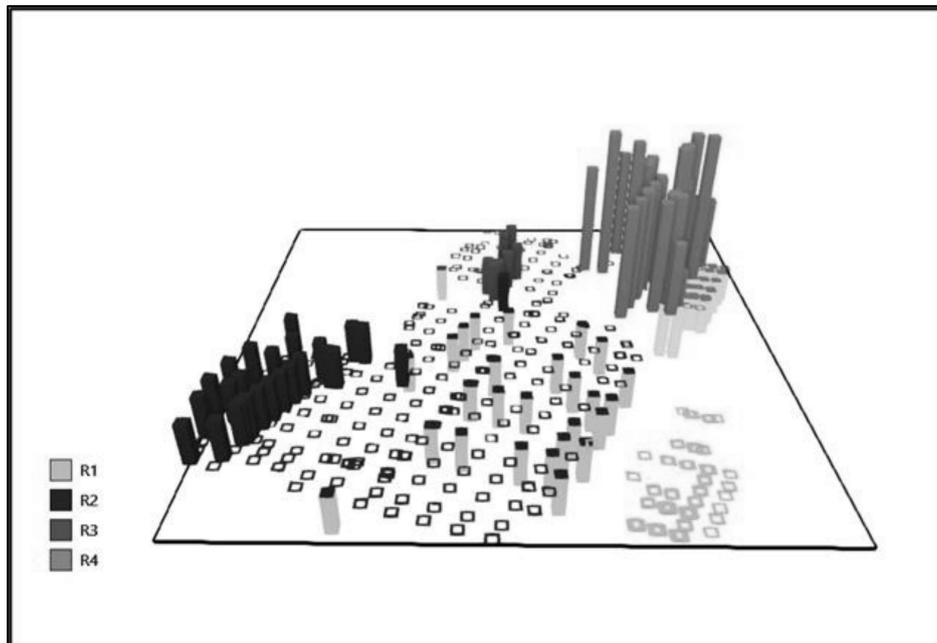


Figura 11 - Diferença de Pressões MDG x MDUA

A Figura 12 confirma a análise apresentada anteriormente sobre a quantidade de nós afetados por variações de pressão, evidenciando que 44% dos nós apresentam diferenças em relação ao modelo base. Esse resultado demonstra que o método não é o mais eficiente para representar as pressões na rede, uma limitação diretamente relacionada à uniformização das demandas, que desconsidera as influências de características geográficas e individuais dos consumidores atendidos.

As variações de pressão observadas na figura se estendem de -1 mca a 2 mca de diferença em cada nó, reforçando o impacto desse método na estabilidade hidráulica do sistema.

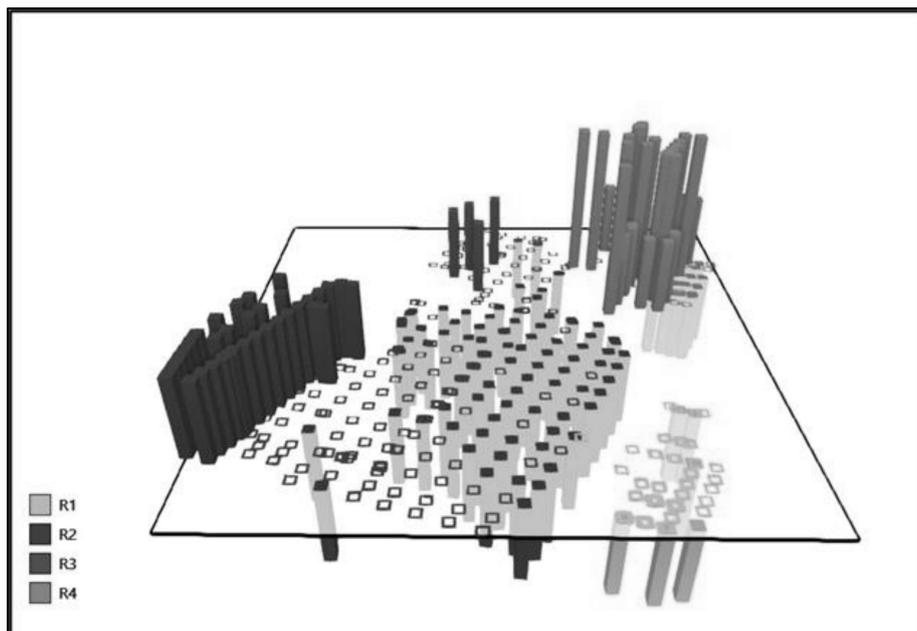


Figura 12 - Diferença de Pressões MDG x MDUN

A Figura 13 evidencia a boa representação do MDAT em áreas densamente ocupadas, mesmo que

alguns nós apresentem pressões divergentes. A magnitude do erro se mantém baixa, com uma variação máxima de 2 mca, valor que, conforme as normas de diversas concessionárias, pode ser considerado aceitável para um modelo representativo, desde que as demais condições operacionais sejam devidamente atendidas.

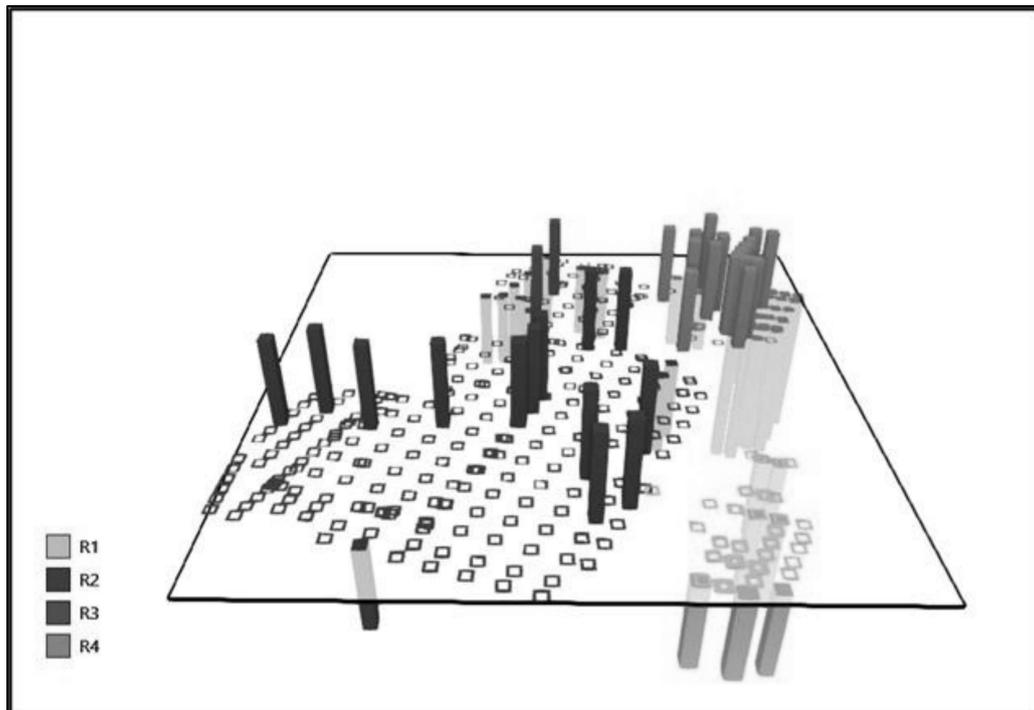


Figura 13 - Diferença de Pressões MDG x MDAT

4 CONCLUSÕES

Os resultados indicaram que o MDAT foi o método que melhor representou os impactos do fator geográfico para a maioria dos setores (R3, R2 e R4), apresentando menores diferenças em relação aos valores de referência. Esse método demonstrou-se uma alternativa viável para modelos hidráulicos iniciais, especialmente quando não há dados precisos de localização e histórico de consumo. No entanto, apresentou limitações em regiões pouco adensadas, onde pode incluir construções que não representam um consumo real de água.

Para essas áreas de baixa ocupação, o MDUA mostrou-se mais eficaz, proporcionando uma distribuição precisa mesmo sem a inclusão de dados de densidade demográfica, o que pode ser um fator determinante para sua escolha em modelos hidráulicos futuros. No entanto, apesar de ser uma opção válida para regiões em expansão, o MDUA apresentou maior variabilidade nas pressões simuladas, registrando as maiores divergências em setores mais consolidados.

O estudo também evidenciou que não existe um único método ideal, mas sim abordagens complementares, que devem ser aplicadas de acordo com as características da região estudada e disponibilidade de dados, como mencionado também por (Girol et al., 2017). Enquanto o MDAT se mostrou robusto para áreas urbanizadas, o MDUA pode ser mais adequado para zonas em desenvolvimento.

Além disso, destaca-se a importância da calibração do modelo hidráulico, que não foi realizada neste estudo devido à ausência de monitoramento em campo. A inclusão de dataloggers para registro de pressões e vazões poderia aumentar significativamente a acurácia e precisão dos resultados, permitindo ajustes mais refinados na distribuição de demandas.

Por fim, recomenda-se a realização de simulações utilizando modelos devidamente calibrados e em estado dinâmico, para possibilitar uma análise dos impactos horários das variações de demanda ao longo do dia. Essa abordagem pode fornecer informações mais detalhadas e úteis para o planejamento e otimização de sistemas de abastecimento de água.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 12211: Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água – Procedimento.* Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento.* Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A.** *Manual de Hidráulica.* 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2000.
- DIUANA, Fabio Amendola; OGAWA, Seiti Caio Contardo Pereira.** *Análise Comparativa dos Modelos Hidráulicos Epanet, WaterCAD e Sistema UFC para Sistemas de Abastecimento de Água – Rede de Distribuição.* Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, 2015.
- GIROL, Guilherme Violato; FERNANDES, Eduardo Pauly; MARTINS, Marisa Pacheco.** *Avaliação de Metodologias de Distribuição de Demanda em Modelo Hidráulico de Sistema de Água: Estudo de Caso em Capão Bonito/SP.* In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 32., 2017, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABES, 2017.
- NOGUEIRA, É.; JUSTINO, J. D.** *Aplicação do método de Hardy Cross: estudo, análise e proposta de reestruturação de um sistema de distribuição de água na comunidade de Macundú – Rio Claro/RJ.* Cadernos UniFOA, v. 8, n. 22, p. 17–24, 10 ago. 2013.
- PESQUEIRA, Ulma Santos.** *Atualização do cadastro técnico-operacional das redes de abastecimento de água: estudo de caso em Itaberaba-BA.* In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 31., 2021, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: ABES, 2021.
- PORTO, R. M.** *Hidráulica Básica.* 3. ed. São Carlos, SP: EESC-USP, 2004.
- TSUTIYA, Milton Tomoyuki.** *Abastecimento de Água.* Porto Alegre: ABES, 2006.
- ALVES, C.** *Tratamento de Águas de Abastecimento.* 3ª ed. Porto: Publindústria, 2010.

ANEXO I SCRIPT PYTHON

Para utilizar o script basta na variável “API_URL” substituir o nome “RENAME” após a igualdade do texto a direita pela chave API fornecida ao usuário pelo google.

```

import csv
import requests
import time

API_URL = "https://maps.googleapis.com/maps/api/geocode/json?address={}&key=RENAME"
ARQUIVO_ENTRADA = "Dados.csv"
ARQUIVO_SAIDA = "Dados_com_coordenadas.csv"

def obter_coordenadas(endereco):
    try:
        response = requests.get(API_URL.format(endereco))
        if response.status_code == 200:
            data = response.json()
            lat = data.get("lat", "")
            lon = data.get("lon", "")
            return lat, lon
        else:
            return "", ""
    except Exception as e:
        print(f"Erro na requisição para {endereco}: {e}")
        return "", ""

def processar_linha(linha):
    endereco = linha.get("End", "")
    lat, lon = obter_coordenadas(endereco)
    linha["Lat"] = lat
    linha["Lon"] = lon
    return linha

def main():
    with open(ARQUIVO_ENTRADA, newline="") as arquivo_entrada:
        leitor_csv = csv.DictReader(arquivo_entrada)
        cabecalho = leitor_csv.fieldnames + ["Lat", "Lon"]

        with open(ARQUIVO_SAIDA, "w", newline="") as arquivo_saida:
            escritor_csv = csv.DictWriter(arquivo_saida, fieldnames=cabecalho)
            escritor_csv.writeheader()

            for linha in leitor_csv:
                linha_processada = processar_linha(linha)
                escritor_csv.writerow(linha_processada)
                print(f"Processado: {linha_processada}")

                # Aguarda 1 segundo antes da próxima requisição
                time.sleep(1)

    print(f"Resultados salvos em {ARQUIVO_SAIDA}")

if __name__ == "__main__":
    main()

```