



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA

MATHEUS BESERRA CAVALCANTI

**APLICAÇÃO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA
DIRIGIDO PELA PRESSÃO EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA**

CARUARU
2019

MATHEUS BESERRA CAVALCANTI

**APLICAÇÃO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA
DIRIGIDO PELA PRESSÃO EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste – CAA, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra

CARUARU
2019

Catalogação na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

C376a Cavalcanti, Matheus Beserra.
Aplicação de um modelo de simulação hidráulica dirigido pela pressão em um sistema de distribuição de água. / Matheus Beserra Cavalcanti. – 2019.
43 f. il. : 30 cm.

Orientador: Saulo de Tarso Marques Bezerra.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Sistema de abastecimento - Água. 2. Hidráulica. 3. EPANET (Programa de computador). I. Bezerra, Saulo de Tarso Marques (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2019-085)

MATHEUS BESERRA CAVALCANTI

**APLICAÇÃO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA
DIRIGIDO PELA PRESSÃO EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste – CAA, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, como requisito parcial para para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

A banca examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o candidato APROVADO com nota _____

Caruaru, 26 de junho de 2019.

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Almir Cirilo (Avaliador)

Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dr. Artur Paiva Coutinho (Avaliador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos (Coordenador da disciplina de TCC)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha mãe Joseane de Melo Beserra Cavalcanti, que sempre me incentivou, me apoiou nos momentos de dificuldade e sempre fez o máximo que pôde para me ajudar a tornar esse sonho realidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as bênçãos em minha vida.

À minha mãe, Joseane de Melo Beserra Cavalcanti, e ao meu pai, Ronaldo Medeiros Cavalcanti, que, com muito incentivo e apoio, não mediram esforços para que eu pudesse chegar ao fim de mais esse ciclo na minha vida.

Aos meus avós Maria de Lourdes Melo Beserra e Raimundo Medeiros Cavalcanti, bem como aos meus demais familiares pelo incentivo e apoio incondicional.

À minha noiva, Jéssica Lane Neves Silva, que sempre me incentivou em todos os momentos e esteve ao meu lado me apoiando desde o início da graduação.

Ao meu amigo Luttemberg Ferreira de Araújo, pela amizade, incentivo, paciência e por toda ajuda que me disponibilizou na realização desse trabalho.

Ao professor Saulo de Tarso Marques Bezerra, pelo suporte e orientação, tornando esse trabalho possível de ser realizado.

Ao curso de Engenharia Civil do Campus Acadêmico do Agreste, a todos os professores e às pessoas com quem convivi ao longo desses anos.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta etapa da minha vida.

“Ama-se mais o que se conquista com esforço”.
Benjamin Disraeli.

RESUMO

Os modelos de simulação hidráulica têm uma importância incontestável tanto na fase de projeto quanto na fase de operação de um sistema de distribuição de água. Basicamente, existem dois grupos: os modelos de simulação hidráulica conhecidos como sendo dirigidos pela demanda e os modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão. Sendo assim, este trabalho objetivou avaliar o uso de um modelo dirigido pela pressão (MHDPres) em uma rede fictícia, cuja configuração induz a um comportamento de geração de pressões negativas, e em um de sistema de distribuição de água de um condomínio horizontal de alto padrão localizado na cidade de Caruaru-PE, no qual foi constatado que alguns dos nós da rede apresentam déficit no atendimento de suas respectivas demandas. O estudo apresenta dados de vazões totais, fluxo disponível e pressões disponíveis calculados através do modelo hidráulico dirigido pela demanda (MHDDem) EPANET 2, um simulador hidráulico amplamente utilizado, e através de um método que adapta o motor de cálculo do EPANET 2 para simular a modelagem dirigida pela pressão. Nestas análises, foi constatado que, para a rede fictícia, a modelagem dirigida pela pressão mostrou-se muito mais eficaz ao reproduzir a condição que é esperada na prática. Além disso, para a rede do estudo de caso, verificou-se que, eventualmente, mais de $\frac{1}{4}$ da vazão prevista na fase de projeto pode não ser, de fato, atendida na prática. Esta diferença configura-se como sendo bastante significativa e a importância desta constatação pode ser exemplificada através de fatos como o de que, na rede em questão, existem pontos de consumo que simplesmente não são atendidos e, desse modo, é evidenciada a importância de empregar uma metodologia de análise que seja capaz de quantificar com maior precisão o déficit de fluxo disponível nos nós que compõem a rede.

Palavras-chave: Sistemas de abastecimento de água. Modelos de simulação hidráulica. EPANET. Demanda dirigida pela pressão.

ABSTRACT

The hydraulic simulation models have an undeniable security both in the design phase and in the operation of a water distribution system. Basically, there are two types: the models defined as being driven by demand and the models known as being pressure-driven. Thus, this study aimed to evaluate the use of a model-driven pressure (MHDPres) in a fictitious network whose configuration induces a negative pressure generation behavior, and in a water distribution system of a high horizontal condominium located in the city of Caruaru-PE, in which it was found that some of the network nodes present deficits in meeting their respective demands. The study presents data of total flows, available flow and available pressures calculated using the hydraulic model driven by demand (MHDDem) EPANET 2, a widely-used hydraulic simulator, and through a method that adapts the calculation engine of EPANET 2 to simulate the pressure-driven modeling. In these analyzes, it was found that, for the fictive network, pressure-driven modeling proved to be much more effective in reproducing the condition that is expected in practice. In addition, for the case study network, it has been found that, possibly, more than $\frac{1}{4}$ of the flow expected in the design phase may not actually be met in practice. This difference is considered to be quite significant and the importance of this finding can be exemplified by facts such as that in the network in question there are points of consumption that are simply not met and, thus, the importance of using an analysis methodology that is able to more accurately quantify the available flow deficit in the nodes that compose the network is evidenced.

Keywords: Water supply systems. Hydraulic simulation models. EPANET. Pressure-driven demand.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicações mais frequentes dos modelos de simulação hidráulica	18
Figura 2 – Diversas funções que descrevem a relação entre pressão e fluxo disponível.....	23
Figura 3 – Configuração do conjunto de elementos artificiais adicionados aos nós com déficit de pressão	25
Figura 4 – Fluxograma das etapas de execução do algoritmo	27
Figura 5 – Vista superior do Condomínio Quintas da Colina	29
Figura 6 – Representação esquemática da rede fictícia	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos nós da rede fictícia	30
Tabela 2 – Resultados das análises executadas para a rede fictícia.....	31
Tabela 3 – Resultados das análises executadas para a rede do estudo de caso	32

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS.....	15
2.1.	Objetivo geral.....	15
2.2.	Objetivos específicos	15
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1.	Modelagem de sistemas de abastecimento de água.....	16
3.2.	Modelos de simulação hidráulica dirigidos pela demanda (MHDDem)	20
3.3.	Modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão (MHDPres).....	20
4.	METODOLOGIA	27
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
5.1.	Rede fictícia	30
5.2.	Rede do loteamento de alto padrão	32
6.	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	35
	APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DA REDE DO ESTUDO DE CASO	40
	APÊNDICE B – RESULTADOS DAS PARA A REDE DO ESTUDO DE CASO	42

1. INTRODUÇÃO

Os modelos de simulação hidráulica são imprescindíveis para o projeto e a operação de sistemas de distribuição de água. Os simuladores avaliam as equações de conservação de massa e de energia para determinar as pressões nos nós, vazões nos trechos e os níveis de reservatórios (SEIFOLLAHI-AGHMIUNI *et al.*, 2013; KANG e LANSEY, 2014; TAO *et al.*, 2014; YANG e BOCCELLI, 2014; LAUCELLI e GIUSTOLISI, 2015; KUN *et al.*, 2015).

Os modelos de simulação hidráulica dirigidos pela demanda (MHDDem) são amplamente adotados pela comunidade técnico-científica. Estes modelos são formulados sob a suposição de que as demandas são preestabelecidas pelo projetista e totalmente atendidas, independentemente da pressão. Siew e Tanyimboh (2012) destacam que a hipótese de que todas as demandas são plenamente satisfeitas, independentemente da pressão, torna-se irracional e representa a principal limitação dos MHDDem. Na prática, a demanda disponível em cada nó da rede hidráulica depende das pressões disponíveis. Quando uma rede tem pontos de consumo com baixa ou falta de pressão, as demandas não serão atendidas na íntegra nos pontos com baixa pressão e poderão ser maiores que as previstas nos pontos com pressões elevadas.

As condições de deficiência de pressão são inevitáveis nos sistemas de distribuição de água e podem ser causadas por ocorrências comuns como: subdimensionamento das instalações, falha de bombas, rompimentos de tubos, fechamento de trechos para manutenção, etc. Sob estas circunstâncias, o sistema pode não ser capaz de satisfazer todas as demandas da rede. Nestes casos, o modelo de simulação hidráulica dirigido pela demanda é incapaz de quantificar com precisão a magnitude exata da deficiência em termos de pressão nodal e vazão. Esta é uma informação crítica que não pode ser negligenciada durante a avaliação de desempenho dos sistemas. Principalmente nos casos citados, a adoção de uma metodologia de análise, que considere explicitamente a relação entre demandas nodais e pressão, é indispensável.

Diante do exposto, a adoção de uma metodologia de análise de sistemas reais, que considere explicitamente a relação entre demandas nodais e pressão, é indispensável. Modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão (MHDPres) apresentam uma representação mais realista do sistema. Na prática, as condições corretas de operação do sistema podem ser obtidas considerando-se as demandas dos nós como dependentes de pressão. Recentemente, Elhay *et al.* (2015) enfatizaram a necessidade urgente de modelos hidráulicos que são adequados para condições extremas de operação e/ou eventos extremos.

Existem numerosos métodos de obtenção das demandas nodais para MHDPres na literatura. Esses métodos geralmente podem ser categorizados em dois grandes grupos. A primeira categoria dos MHDPres adota os modelos dirigidos pela demanda para determinar as grandezas hidráulicas dos sistemas. Por exemplo, Ang e Jowitt (2006) propuseram um algoritmo que, progressivamente, adiciona reservatórios artificiais a nós deficientes em pressão. A abordagem utilizada pelos autores é semelhante à de Bhave (1991). Rossman (2007) implementou demandas dependentes de pressão modelando emissores como orifícios nos nós da rede. Kalungi e Tanyimboh (2003) desenvolveram um método heurístico na qual alguns aspectos do MHDPres foram usados em um ambiente de MHDDem para identificar nós com déficits de demandas. Os métodos citados adotam o uso repetitivo de MHDDem com ajustes sucessivos feitos em parâmetros específicos até que uma consistência hidráulica preestabelecida seja obtida. Com isto, estes possuem um alto custo computacional, apresentando dificuldade para ser efetivamente implementadas em grandes sistemas.

A segunda categoria de métodos acrescenta ao processo de cálculo dos simuladores hidráulicos uma abordagem que relate a demanda com a carga hidráulica dos nós da rede. Estas relações são funções matemáticas adotadas para estimar o fluxo real nos nós com base na pressão nodal. Os MHDPres desenvolvidos por Germanopoulos (1985), Cullinane *et al.* (1992), Fujiwara e Ganesharajah (1993), Gupta e Bhave (1996) e Udo e Ozawa (2001) consideram que a demanda nodal é satisfeita por completo quando a pressão é igual ou maior a desejada, e zero quando a pressão é igual ou menor que a mínima. A maior vantagem desses modelos MHDPres é que as equações não lineares são resolvidas apenas uma vez. A desvantagem é a ausência de continuidade na função e/ou suas derivadas nas transições entre zero e fluxo nodal parcial, e/ou entre satisfação parcial e total da demanda nodal. Estas descontinuidades podem levar a dificuldades de convergência na solução computacional dos sistemas de equações (TANYIMBOH e TEMPLEMAN, 2010).

Tanyimboh e Templeman (2010) desenvolveram um algoritmo robusto baseado no método de Newton Raphson. O modelo foi denominado como PRAAWDS (*Program for the Realistic Analysis of the Availability of Water in Distribution Systems*) e apresenta um equacionamento da relação fluxo-carga (carga hidráulica) no nó com bons resultados e sem descontinuidades. Além disso, a derivada para a função de Tanyimboh e Templeman (2010) pode ser facilmente calculada, além de possibilitar a incorporação da relação fluxo-carga no motor de cálculo hidráulico do EPANET 2.

Sayyed, Gupta e Tanyimboh (2015) descreveram uma abordagem de modelagem que permite simular condições de operação com pressão insuficiente em uma única execução do EPANET 2, sem modificar o código-fonte do simulador. A simulação hidráulica dirigidos pela pressão é executada por meio da adição aos nós de uma válvula de retenção, uma válvula de controle de fluxo e um emissor. Assim, a abordagem de modelagem proposta aprimora uma formulação anterior, evitando a necessidade de um reservatório artificial nos nós com pressão insuficiente. Consequentemente, o tubo de conexão para o reservatório artificial (para o qual dados adicionais devem ser fornecidos) não é necessário. A Equação de descarga do emissor permite que a relação cabeça-fluxo nodal seja variada para refletir as características de qualquer rede. Os resultados sugerem que o procedimento é robusto, confiável e rápido o suficiente para uso regular.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

- Traçar um comparativo entre os resultados obtidos na modelagem de sistemas de distribuição de água através de uma metodologia dirigida pela demanda e outra dirigida pela pressão.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar as distinções entre a modelagem de sistemas de distribuição de água através da metodologia dirigida pela demanda e a metodologia dirigida pela pressão;
- Definir qual entre as metodologias aplicadas apresenta resultados mais consistentes na modelagem de uma rede cuja configuração induz a um comportamento onde observa-se a geração de pressões negativas nos nós.
- Quantificar o déficit de fluxo disponível nos nós do sistema de distribuição de água de um loteamento de alto padrão através da aplicação do modelo de simulação hidráulica dirigido pela pressão.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, o embasamento conceitual que serve como suporte do desenvolvimento do trabalho é apresentado, onde a definição e os conceitos primordiais relacionados à modelagem de sistemas de abastecimento de água são abordados. Dessa forma, apresenta-se o conceito de modelagem, as principais aplicações e os diferentes tipos de abordagem, sendo estes últimos descritos com maiores detalhes no final do capítulo.

3.1. Modelagem de sistemas de abastecimento de água

O desenvolvimento e aplicação dos modelos de simulação dos sistemas de abastecimento de água vem sendo realizada ao longo das três últimas décadas. Esses modelos podem ser formulados e resolvidos de forma inteiramente manual, como é o caso do método de Hardy-Cross, formulado na década de 30, que consiste num método iterativo para resolver as equações de conservação de massa e energia através de cálculos manuais. No entanto, dada a complexidade e inerente morosidade dos cálculos, a partir da década de 60 começaram a surgir os primeiros métodos numéricos para a solução das equações que descrevem o escoamento em dutos sob pressão, descrito por Martin e Peters (1963), Shamir e Howard (1968). Na década de 80, através do estudo de Todini e Pilati (1988), houve uma revolução no setor através da apresentação de um método inovador na época para a solução de redes de água e que, mais tarde, tornou-se o motor de cálculo do *software* EPANET, um simulador de sistemas de abastecimento de água amplamente testado e credível.

Atualmente, o nível de detalhe dos modelos hidráulicos cresceu significativamente. De acordo com um levantamento feito pela AWWA (2014) – o qual contou com 209 respostas de profissionais de consultoria e de profissionais de empresas do setor de produção, transporte, distribuição de água -, esse crescimento pode ser associado ao ativo uso de sistemas de informações geográficas (SIG), onde vários modelos têm sido criados a partir desses sistemas (63%) e outros têm sido atualizados a partir do SIG (56%). Esse crescimento pode também ser associado ao incremento da velocidade de processamento dos computadores, o que, por sua vez, diminui o tempo das simulações dos modelos hidráulicos, que contribui para o decréscimo do custo de armazenamento de dados e permite a integração dos modelos de rede com outros sistemas de informações como *softwares* de gestão de ativos e gestão de manutenção computadorizada. Estes avanços permitiram que as empresas de saneamento modelem mais do que o sistema principal de distribuição de água.

Nesse contexto, os modelos de simulação podem ser definidos como ferramentas que podem ser utilizadas para previsão e acompanhamento do comportamento hidráulico e dos parâmetros de qualidade da água do sistema, com uma margem de erro estimável. Essa análise é feita a partir das características do sistema, como sua forma de operação e demandas previstas. Sendo assim, os modelos permitem a realização rápida e eficaz de análises de sensibilidade e a simulação de vários cenários, com uma aproximação razoável, sem que se faça necessário arriscar o sistema a modos de operação desconhecidos. Os modelos de simulação hidráulica têm sua importância evidenciada através do fato de que são os instrumentos computacionais mais utilizados desde a etapa de projeto até a realização do diagnóstico de funcionamento dos sistemas de abastecimento de água, onde esse diagnóstico pode ser utilizado para prever a resposta do sistema face a uma variada gama de condições operacionais e ambientais. Dessa forma, pode-se prever os problemas antecipadamente e fazer uma análise das soluções a serem empregadas antes de os investimentos serem realizados (COELHO; ALEGRE; LOUREIRO, 2006).

Segundo Riss (2016), o sistema de distribuição de água tem sua representação através dos modelos de simulação hidráulica composta pelo sistema de tubulações e acessórios, tais como bombas, estações elevatórias, reservatórios de armazenamento, válvulas e outros equipamentos de controle. O nível de detalhamento a ser empregado no modelo depende da complexidade do problema a ser analisado. A título de exemplo, para realização de um estudo de conectividade, densidade, tamanho e localização de válvulas em um sistema de distribuição pode exigir a utilização de um modelo detalhado do ponto de vista de confiabilidade. Por outro lado, similar ao descrito em Wagner *et al.* (1988), um estudo de confiabilidade do abastecimento em uma zona inteira pode exigir apenas um modelo básico do sistema principal de fornecimento e dos acessórios.

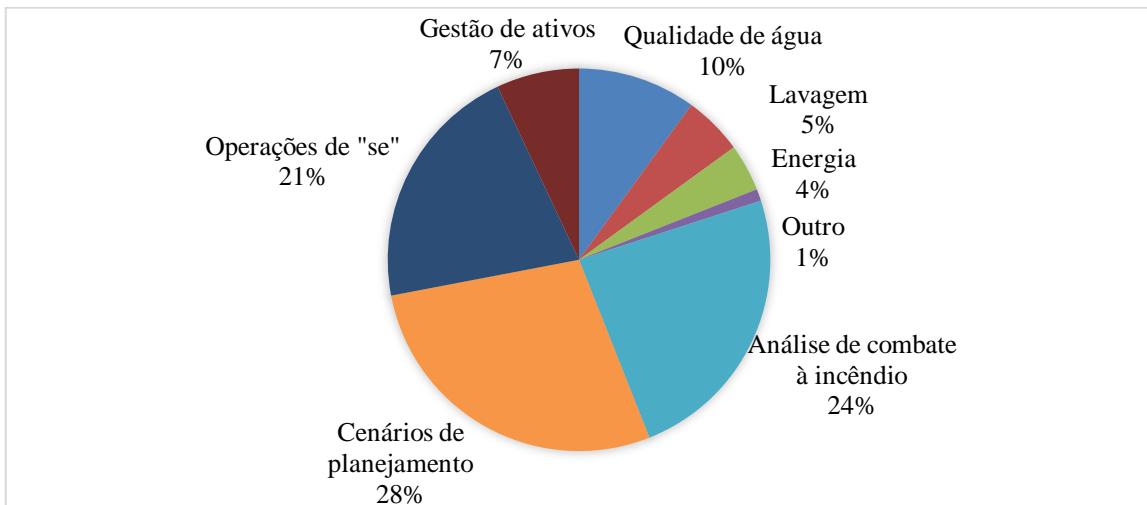
Dentre as diversas aplicações dos modelos de simulação para sistemas de distribuição de água, pode-se citar:

- simulação de problemas e cenários de operação corrente, como gestão dos níveis em sistemas com múltiplos reservatórios de serviço ou situações de emergência, como falhas em grupos elevatórios ou o combate a incêndios (SUWAN *et al.*, 2017);
- controle e otimização de parâmetros de qualidade da água, como por exemplo a manutenção de um residual adequado de cloro (KRUSZYŃSKI, 2016);
- análise de alternativas de reabilitação de sistemas deficientes e a programação das intervenções necessárias de forma a minimizar o impacto no consumidor (HONG; ALLOUCHE; TRIVEDI, 2006);

- otimização da operação para redução da energia de bombeamento (MARTINS *et al.*, 2006);
- controle de perdas de água, como, por exemplo, simulação de redução de pressões de serviço (GUPTA *et al.*, 2017).

Ainda sobre a aplicação dos modelos, o levantamento supracitado feito pelo AWWA (2014) aponta que as principais aplicações estão destinadas a análise de cenários de planejamento (28%), seguida pelas análises de situações de combate a incêndio (24%), como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Aplicações mais frequentes dos modelos de simulação hidráulica



Fonte: Adaptado de AWWA (2014)

Dentre os modelos de simulação hidráulicos desenvolvidos, o EPANET 2 (ROSSMAN, 2002) se destaca por sua qualidade e pela quantidade de usuários existentes no mundo. É um programa aberto e de domínio público que foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U. S. Environmental Protection Agency – EPA*). O EPANET foi concebido para ser uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição de água para abastecimento urbano, sistemas de irrigação, de combate a incêndios, etc. O sistema pode ser composto por redes (malhadas, ramificadas e/ou mistas), estações de bombeamento, diversos tipos de válvulas e reservatórios de nível fixo e/ou variável. O EPANET também simula o comportamento de parâmetros da qualidade da água, ao longo da rede de distribuição, durante um determinado período de tempo.

O simulador hidráulico EPANET 2 usa o método *Global Gradient Method* (TODINI; PILATI, 1988) para resolver o equacionamento matemático. O programa permite obter valores de vazão em cada trecho, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de elementos químicos na água ao longo da rede de distribuição em um período de simulação preestabelecido. O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, cujas características mais destacáveis são:

- não existe limite no número de componentes;
- calcula as perdas de carga por atrito por meio das fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- inclui as perdas de carga singulares em curvas, ampliações, reduções, etc;
- simula bombas, funcionando com velocidade de rotação fixa ou variável;
- calcula a energia de bombeamento e o seu respectivo custo;
- modela os principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão;
- modela reservatórios de armazenamento de água de nível variável com diversas formas geométricas;
- possibilita estabelecer diferentes categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação com o tempo;
- modela a relação entre pressão e vazão efluente de dispositivos emissores (aspersores de irrigação, ou consumos dependentes da pressão);
- possibilita a simulação com diversas regras de operação do sistema.

A modelagem de sistemas de distribuição de água é construída a partir da formulação tubulação-nó, na qual os tubos são interconectados nos nós. O consumo de água que ocorre ao longo das tubulações é transferido para os nós localizados no final da tubulação, de modo que este consumo passa a ser definido como demanda nodal. Essa demanda nodal compõe o consumo de água, este que, por sua vez, pode ser independente da pressão (baseado no volume) ou dependente da pressão (no qual o fluxo disponível para os consumidores depende da pressão). Os modelos de sistemas de distribuição de água são capazes de calcular a carga nos nós e o fluxo nas tubulações para um cenário de níveis do reservatório, e isso é realizado através da solução simultânea da Equação da conservação de massa para cada um dos nós e da relação de perda de carga para cada tubulação da rede. Os modelos de análise, citados anteriormente, podem ser classificados como sendo guiados pela demanda ou sendo guiados pela pressão.

No primeiro caso, o fluxo disponível nos nós é assumido constante independentemente das pressões na rede. No segundo, o modelo assume que o fluxo disponível no nó depende da pressão disponível. As duas abordagens de simulação têm um valor inquestionável no planejamento, projeto, diagnóstico e operação do sistema de distribuição de água (MURANHO *et al.*, 2014).

3.2. Modelos de simulação hidráulica dirigidos pela demanda (MHDDem)

A simulação de modelos classificados como sendo guiados pela demanda (MHDDem) tem origem no método do gradiente-global, implementado através do algoritmo do gradiente-global, ambos descritos por Todini e Pilati (1988). Esse é usado para determinar a pressão nos nós, considerando a demanda de água assumida como fixa e de valores conhecidos que são atribuídos aos nós. A esses modelos refere-se como sendo independentes da pressão, de forma que a descarga de fluxo nas tubulações e as pressões nos nós são avaliados através de simulação hidráulica que é realizada de acordo com as condições da rede. O fluxo nos nós é assumido constante, independentemente da pressão, e em função disso é que a demanda serve como guia para o modelo. A maioria dos modelos bem estabelecidos são baseados nessa abordagem, como é o caso do EPANET. Nesse contexto, é importante enfatizar que, ao realizar a modelagem da rede para fins de projeto, faz-se a verificação das pressões de forma que sejam alcançados valores satisfatórios. No entanto, a suposição da independência da demanda em relação a pressão da rede permanece e é utilizada como sendo um instrumento de simplificação da modelagem mantido através de uma suposição estatística (RISS, 2016; TABESH *et al.*, 2011; MURANHO *et al.*, 2014).

3.3. Modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão (MHDPres)

Geralmente, os MHDDem não são capazes de simular fielmente o comportamento dos sistemas de distribuição de água sob condições anormais como em caso de combate a incêndios, falta de energia nas estações de bombeamento, rompimento de tubulação, etc. Esta limitação deve-se ao fato de que, em tais situações, baixas pressões ou até mesmo pressões negativas são obtidas através deste tipo de análise. Nestes casos, a utilização de um modelo com a demanda dependente da pressão (MHDPres) é mais realística e, portanto, apresenta vantagem sobre a análise guiada pela demanda. Quando a pressão nodal fica abaixo de um certo limite conhecido como pressão desejada, a demanda no nó pode ser atendida apenas parcialmente. Quando a

pressão nodal fica abaixo do limite conhecido como pressão mínima, o fluxo no nó será zero. No entanto, para uma rede real, a relação entre a pressão no nó e o fluxo disponível é específica e sua determinação configura-se como uma tarefa árdua (JUN e GUOPING, 2013).

Consequentemente, vários pesquisadores desenvolveram trabalhos buscando formular o relacionamento entre a pressão no nó e o fluxo disponível (BHAVE, 1981; GERMANOPOULOS, 1985; WAGNER *et. al.*, 1988), enquanto outros propuseram métodos adicionais que visam prever o desempenho em condições de déficit (FUJIWARA; LI, 1998; TUCCIARELLI *et al.*, 1999; TANYIMBOH; TEMPLEMAN, 2010). No entanto, não se sabe qual formulação que expressa a demanda como sendo dependente da pressão tem melhor desempenho no que diz respeito a convergência e quão próximo os resultados são das situações reais.

Alternativamente, alguns pesquisadores propuseram novas metodologias que não seguem uma relação entre a pressão no nó e a demanda disponível explícita, mas que determinam o fluxo disponível nos nós de maneira subjacente. Ozger e Mays (2003), Todini (2003, 2006) e Ang e Jowitt (2006) propuseram abordagens similares nas quais utiliza-se um reservatório artificial nos nós com déficit de pressão para que o fluxo ocorra e verificam o fluxo que retorna para o reservatório. Se o fluxo que retorna para o reservatório não for menor do que a demanda no nó, o reservatório é substituído pelo nó original com demanda totalmente atendida. Na abordagem adotada por Mansoor e Vairavamoorthy (2003), a modelagem da demanda dependente da pressão é feita utilizando reservatórios com válvulas. No entanto, Wu (2007) destacou que métodos utilizando reservatórios artificiais apresentam desvantagens que incluem a necessidade de modificações da topologia da rede, alto custo de processamento e dificuldade de aplicação da metodologia a análise de período estendido.

O desenvolvimento de métodos para o cálculo do fluxo em redes com déficit de pressão data do início dos anos 80. Segundo o estudo de Carey e Hendrickson (1984), foi proposto um modelo que assume que as capacidades da tubulação são limitadas por um gradiente de energia máximo, transformando o problema de déficit de pressão da rede em um clássico problema de transbordo (WAGNER *et al.*, 1998). Fujiwara e De Silva (1990) utilizaram este método para calcular o fluxo disponível em cada nó da demanda e os resultados mostraram que o fluxo disponível tende a ser superestimado.

Germanopoulos (1985) sugeriu uma relação empírica entre a pressão e a demanda para prever o fluxo disponível para vários valores de pressão nos nós, descrita na Equação 1:

$$Q_i = Q_i^{req} (1 - a_i e^{-b_i H_i / H_i^*}) \quad (1)$$

Onde: Q_i – fluxo atual disponível no nó i ; Q_i^{req} – fluxo desejado no nó em questão; H_i – pressão disponível; H_i^* – pressão nominal requerida para satisfazer a demanda Q_i^{req} no nó i .

Os termos a_i e b_i são constantes para o nó i , podendo estes termos serem calibrados para cada nó de demanda ou simplesmente atribuídos valores de forma semi-arbitrária. Ang e Jowitt (2006) descrevem que, essencialmente, a interpretação física da relação pressão-demanda é expressa em função de um dispositivo pragmático que reflete o fato de que um déficit de pressão local na rede resultaria na ocorrência de uma falha local em entregar a demanda requerida. A título de exemplo, através dessa abordagem, Reddy e Elango (1989) exploraram uma relação pressão-demanda alternativa que era, essencialmente, como um emissor com $Q_i = K e_i (H_i)^p$, sendo $K e_i$ uma constante e p um expoente.

Gupta e Bhave (1996) mostraram que, para redes primárias, nas quais demandas em várias saídas são agrupadas em um nó, é importante estabelecer dois valores de nível de gradiente hidráulico na definição de uma relação entre pressão e fluxo disponível no nó. Para um valor de mínimo nível de gradiente hidráulico, atribui-se um H^{\min} , que corresponde ao valor para o qual o fornecimento para o ponto mais baixo na rede secundária começaria, e um valor de nível de gradiente hidráulico desejável, H^{\des} , para o qual o fornecimento para todos os pontos da rede secundária seria plenamente atendido. Contudo, a relação entre pressão e fluxo disponível no nó proposta por Bhave (1981) pode também ser utilizada para avaliação do desempenho de redes primárias através da variação suave do valor de H^{\min} .

Bao e Mays (1990) descrevem que, para uma melhor previsão do desempenho de uma rede que apresenta déficit, o fluxo nos nós e as pressões devem ser consideradas simultaneamente na formulação do modelo, ou, como descrito por Ang e Jowitt (2006), um bi-produto da análise e da elevação do nó de demanda em si tomada como sendo H^{\min} , sendo esse tipo de análise conhecido como análise de fluxo no nó. Bhave (1981) foi o primeiro a fazer essa consideração e, na análise descrita por ele, a relação entre o fluxo disponível e a demanda no nó é descrita a partir das equações a seguir, equações 2, 3 e 4:

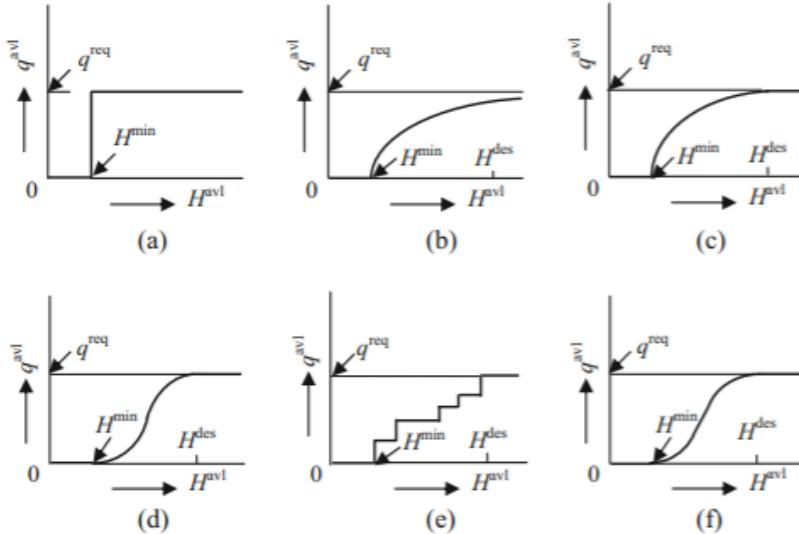
$$q_j^{avl} = q_j^{req}, \text{ se } H_j^{avl} \geq H_j^{\min} \quad (2)$$

$$0 < q_j^{avl} < q_j^{req}, \text{ se } H_j^{avl} = H_j^{\min} \quad (3)$$

$$q_j^{avl} = 0, \text{ se } H_j^{avl} \leq H_j^{\min} \quad (4)$$

Onde: q_j^{avl} – fluxo disponível no nó; q_j^{req} – demanda requerida no nó; H_j^{avl} – pressão disponível; H_j^{min} – pressão nominal requerida para satisfazer a demanda. As Equações 2, 3 e 4 descrevem, respectivamente, a condição de fluxo disponível adequada, condição de fluxo disponível parcial e ausência de fluxo disponível. No entanto, Sayyed, Gupta e Tanyimboh (2015) destacam que, na abordagem descrita através das equações acima e similar ao que ocorre em outras formulações ilustradas a seguir, o fluxo disponível nos nós não pode ser obtido diretamente para qualquer valor de nível de gradiente hidráulico. Sendo esse valor, portanto, calculado através de otimização ou através de repetidas análises, como exposto em Ackley *et al.* (2001). O comportamento descrito através das Equações 2, 3 e 4, bem como outras funções da relação pressão-fluxo, é ilustrado na Figura 2a.

Figura 2 – Diversas funções que descrevem a relação entre pressão e fluxo disponível



Fonte: Adaptado de Sayyed, Gupta e Tanyimboh (2015)

O modelo proposto por Wagner *et al.* (1988), ilustrado na Figura 2c, é bem instituído e recomendado por Gupta and Bhave (1996), bem como por Tanyimboh *et al.* (1997). No estudo em questão, foi proposto uma relação parabólica entre fluxo disponível e a demanda no nó, descrita através das Equações 5, 6 e 7:

$$q_j^{avl} = q_j^{req}, \text{ se } H_j^{avl} \geq H_j^{des} \quad (5)$$

$$0 < q_j^{avl} = q_j^{req} < q_j^{req} \left(\frac{H_j^{avl} - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}} \right)^{1/n_j} < q_j^{req}, \text{ se } H_j^{min} < H_j^{avl} < H_j^{des} \quad (6)$$

$$q_j^{avl} = 0, \text{ se } H_j^{avl} \leq H_j^{min} \quad (7)$$

Onde: H_j^{des} – pressão desejável no nó; n_j – coeficiente com valor frequentemente adotado como sendo igual a 2. Para uma rede secundária, a relação entre pressão e fluxo disponível sob condições de fluxo parcial pode ser escrita pelas Equação 8:

$$H_j^{avl} = H_j^{min} + R_j(q_j^{avl})^{n_j} \quad (8)$$

Onde:

$$R_j = \frac{H_j^{des} - H_j^{min}}{(q_j^{req})^{n_j}} \quad (9)$$

Gupta e Bhave (1996) mostraram que os valores de R_j e n_j podem ser obtidos através de uma análise detalhada do fluxo das redes secundárias. De acordo com Sayyed, Gupta e Tanyimboh (2015), o valor de n_j fica entre 1 e 2, dependendo da localização dos consumidores e da perda de carga nas tubulações da rede secundária. Ainda segundo esses autores, um valor médio de 1,5 para n_j é recomendado, no caso de ausência de uma análise detalhada da rede secundária.

No que diz respeito a solução computacional dos sistemas de equações resultantes, Tanyimboh and Templeman (2010) usaram o método de Newton-Raphson para desenvolver um procedimento de solução com convergência global. Giustolisi *et al.* (2008) e Wu *et al.* (2009) estenderam o algoritmo de gradiente global desenvolvido por Todini e Pilati (1987). Giustolisi e Laucelli (2011) propuseram um algoritmo de gradiente global melhorado. No entanto, o desenvolvimento do *software* necessário para fazer com que esses métodos funcionem de maneira confiável na simulação de redes da vida real é extremamente desafiador.

Consequentemente, vários métodos alternativos foram desenvolvidos, incluindo aqueles que são baseados no simulador hidráulico mais amplamente utilizado: o EPANET 2, este que utiliza uma abordagem guiada pela demanda. Siew e Tanyimboh (2012) modificaram o código fonte do EPANET para incorporar a formulação proposta no estudo de Tanyimboh e Templeman (2010) e deram a essa versão o nome de EPANET-PDX. Ozger e Mays (2003), Ang e Jowitt (2006), e Suribabu e Neelakantan (2011) propuseram análises iterativas baseadas no EPANET através da utilização da formulação descrita nas Equações 2, 3 e 4, onde, nessa

análise, adiciona-se reservatórios artificiais nos nós com déficit de pressão. Jinesh Babu e Mohan (2012) utilizaram reservatórios artificiais com válvula de controle de fluxo para garantir que o fluxo para os reservatórios não excedesse a respectiva demanda do nó.

No entanto, de acordo com Gorev e Kodzhesirova (2013), todos os métodos que têm como base a formulação descrita nas Equações 2, 3 e 4 apresentam uma baixa potencialidade de propriedades de convergência. Em seu estudo, esses autores consideram um conjunto de elementos artificiais composto por uma válvula de controle de fluxo, um tubo, uma válvula de retenção e um reservatório. Entretanto, a metodologia empregada no presente estudo, sugerida por Sayyed, Gupta e Tanyimboh (2015), aperfeiçoa esse método através da substituição do tubo e do reservatório artificiais por um emissor e melhora a acurácia das simulações hidráulicas introduzindo uma relação entre pressão e fluxo disponível no nó mais genérica.

O MHDPres proposto por Sayyed, Gupta e Tanyimboh (2015) possui dois estágios de execução. No primeiro estágio, são inseridos elementos fictícios para simular a demanda dependente da pressão nos nós e, no estágio 2, executa-se a simulação para o estado estático ou período estendido (simulação dinâmica). Os pesquisadores propuseram que seja adicionado nestes nós (DN) uma válvula de retenção (CV), uma válvula de controle de fluxo (FCV) e um emissor (EN), como mostrado na Figura 3. O FCV restringirá o fluxo até o máximo desejado, o emissor simulará condições de fluxo parcial e o CV no nó de demanda evitará fluxos reversos. Esta inclusão pode ser realizada diretamente na interface gráfica do EPANET 2 ou automaticamente através de um programa computacional que inclua estes elementos nos dados de entradas (arquivo INP). Para concluir a simulação, o sistema modificado é analisado por meio EPANET 2.

Figura 3 – Configuração do conjunto de elementos artificiais adicionados aos nós com déficit de pressão



Fonte: Adaptado de Sayyed, Gupta e Tanyimboh (2015)

A execução do algoritmo pode ser descrita pelos seguintes procedimentos:

- 1 – Adicionar dois nós próximos a cada nó de demanda, um trecho com uma CV com resistência insignificante (isto é, o comprimento do tubo possui um valor muito pequeno) entre o original e o primeiro nó adicionado, uma FCV entre o primeiro e o segundo nós adicionados.
- 2 – Zerar a demanda base em todos os nós.
- 3 – Definir a elevação nos dois fictícios igual à do nó de demanda.

- 4 – Definir as configurações de cada FCV para o respectivo nó de demanda.
- 5 – Informar o coeficiente de emissor Cd do segundo nó adicionado para o respectivo nó de demanda.
- 6 – Definir o expoente do emissor γ para o valor desejado.
- 7 – Realizar a análise executando o EPANET.

A simulação é realizada através do *toolkit* do EPANET e o modelo tem seu comportamento descrito por meio das Equações 10, 11 e 12.

$$q_j^{avl} = C_d(H_j^{avl} - H_j^{min})^\gamma; H_j^{avl} \geq H_j^{min} \quad (10)$$

$$C_d = \frac{q_j^{req}}{(H_j^{des} - H_j^{min})^{\frac{1}{n_j}}} \quad (11)$$

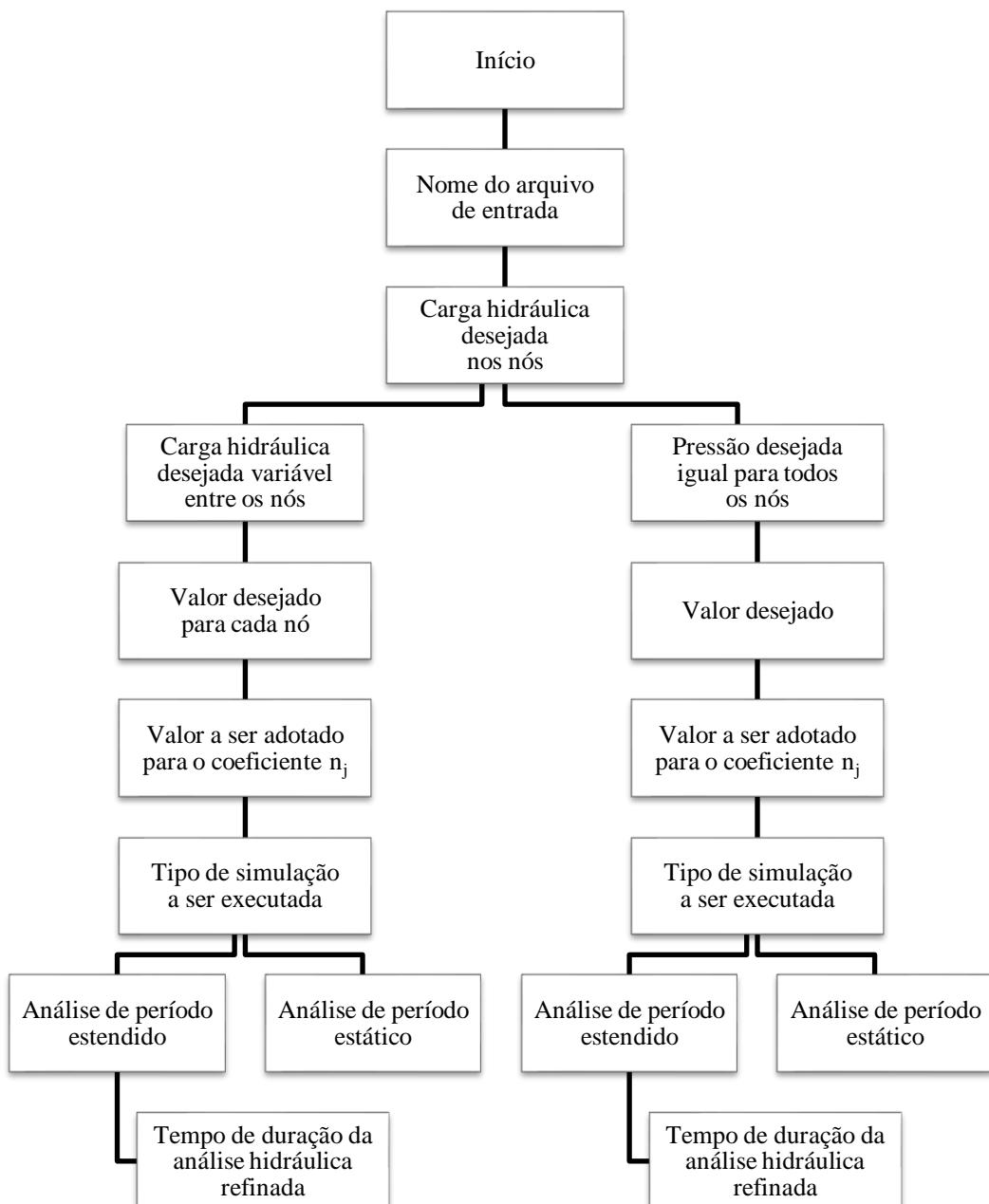
$$\gamma = \frac{1}{n_j} \quad (12)$$

Onde: Cd – coeficiente do emissor do nó j; H_j^{avl} – carga hidráulica disponível do nó j; H_j^{des} – carga hidráulica desejável do nó j; H_j^{min} – carga hidráulica mínima do nó j; n_j – parâmetro da vazão nodal; q_j^{avl} – fluxo disponível do nó j; q_j^{req} – fluxo requerido do nó j; e γ – expoente do emissor.

4. METODOLOGIA

No presente estudo, para obtenção dos resultados, foi feita primeiramente a análise através do MHDDem, utilizando o EPANET 2. Em seguida, foi feita a análise através do MHDPres (SAYYED; GUPTA; TANYIMBOH, 2015), onde, para tal, foi utilizado o algoritmo sugerido por Gupta *et al.* (2018). As etapas de execução do algoritmo são descritas no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma das etapas de execução do algoritmo



Fonte: Autor (2019)

A seguir, descreve-se as considerações feitas na escolha dos dados de entrada adotados na execução das análises utilizando o algoritmo.

Para todas as análises, adotou-se um valor de n_j igual a 1,85 (ver Equação 12), similar ao empregado por Sayyed, Gupta e Tanyimboh (2015) e Mahmoud, Savic e Kapelan (2017), que realizaram análises similares as propostas neste trabalho.

Buscando encontrar uma alternativa para tornar, de fato, representativa a simulação da rede real, optou-se por realizar um estudo com valores de pressão desejada diferentes para todos os nós, sendo esta determinada através da utilização de uma carga hidráulica calculada ao somar 10 mca (pressão mínima de cada nó) ao valor da cota do nó mais elevado do setor. Deste modo, parte-se do princípio de que, teoricamente, caso seja atendida essa condição de pressão desejada para o nó de condição mais crítica (por estar na cota mais elevada), todos os outros nós apresentariam valores de pressão superiores ao mínimo adotado usualmente, ou seja, 10 mca. Ao utilizar este valor de carga hidráulica como dado de entrada para cada um dos nós, o algoritmo automaticamente calcula o valor de pressão desejada no nó através da subtração da correspondente cota do nó deste valor de carga hidráulica.

A fim de aplicar os diferentes modelos de simulação que são objetos de estudo do trabalho em questão, foi criada uma rede fictícia que será utilizada como exemplo para introduzir a discussão dos resultados obtidos, de modo que seja possível descrever de forma mais clara, como estes são apresentados para todas as análises. Além disso, esta rede apresenta uma configuração que induz a um comportamento onde observa-se a geração de pressões negativas nos nós e, portanto, objetiva-se também por meio desta investigar de que forma a metodologia de demanda guiada pela pressão aplicada no presente estudo irá modelar a rede.

No exemplo em questão, a predisposição a este comportamento é estimulada a partir da simples definição de nós de demanda cujas cotas são mais altas do que a cota do reservatório criando uma situação onde, na prática, não seria possível atender os consumos destes nós. Em seguida, por fim, apresenta-se a análise dos resultados obtidos para o estudo de caso do sistema de distribuição de água do loteamento de alto padrão, cujas características são descritas detalhadamente nos Resultados.

O segundo estudo de caso é o sistema de distribuição de água do condomínio horizontal Quintas da Colina, localizado na cidade de Caruaru-PE, cuja rede é distribuída em dois setores, conforme ilustra a Figura 5. Este sistema foi escolhido por apresentar problemas de abastecimento em pontos de consumo com baixa pressão. A população atendida é estimada em 1848 habitantes, a partir do número de residências e uma taxa de ocupação domiciliar de 4,2 pessoas por habitação (IBGE, 2000).

A rede de distribuição é abastecida por um reservatório superior, capacidade útil de 21,33 m³, e possui uma extensão total de 6103 metros, sendo composta por tubos de PVC com diâmetros DN 50, DN 75 e DN 100. Considerando um consumo per capita de 150 L/hab./dia, a vazão máxima diária foi estimada em 5,77 L/s. Todas as características da rede são descritas com maiores detalhes nas Tabelas disponíveis no Apêndice A.

Figura 5 – Vista superior do Condomínio Quintas da Colina



Fonte: Adaptado de Bing Aerial (2019)

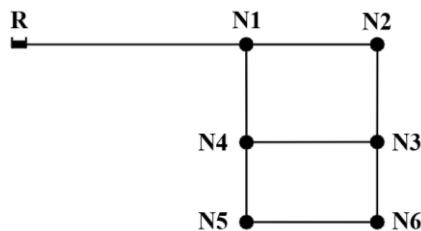
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, apresenta-se, primeiramente, os resultados obtidos através das análises realizadas para a rede fictícia utilizada como exemplo e, por fim, descreve-se os resultados obtidos através dos estudos realizados para a rede de um sistema de distribuição de água do loteamento de alto padrão.

5.1. Rede fictícia

A rede, modelada no EPANET 2, é representada de maneira esquemática na Figura 5, sendo as características dos nós descritas na Tabela 1 e, no que diz respeito às propriedades das tubulações, para todos os trechos foram mantidos os valores padrões que o programa define, a saber: comprimento igual a 1000 m, diâmetro de 100 mm e rugosidade igual a 100.

Figura 6 – Representação esquemática da rede fictícia



Fonte: Autor (2019)

Tabela 1 – Características dos nós da rede fictícia

Identificador do Nô	Cota (m)	Consumo-Base (l/s)
Nô 1	10,000	2,000
Nô 2	10,000	2,000
Nô 3	15,000	3,000
Nô 4	15,000	3,000
Nô 5	20,000	4,000
Nô 6	20,000	4,000
R	19,000	-

Fonte: Autor (2019)

Como pode-se observar na Tabela 1, os nós N5 e N6 encontram-se numa cota mais elevada do que a cota do reservatório de forma a induzir o comportamento supramencionado de geração de pressões negativas. Conforme esperado, as análises permitiram identificar a

ocorrência de pressões negativas nos nós, porém de maneiras bem diferentes para cada uma das abordagens adotadas no presente estudo, como pode ser visto a seguir.

Para execução da análise de vazão guiada pela pressão, seguindo o raciocínio previamente descrito, adotou-se uma carga hidráulica desejada de 30 mca como dado de entrada para execução do algoritmo. Os resultados para as análises executadas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das análises executadas para a rede fictícia

ID	Nó	Cota (m)	Dem. (L/s)	Pressão desejada (mca)	MHDDem (EPANET 2)	MHDPres (SAYYED; GUPTA; TANYIMBOH, 2015)	
					Pressão disponível (mca)	Pressão disponível (mca)	Fluxo disponível (L/s)
N1	10	2,00	20		-83,00	5,84	1,028
N2	10	2,00	20		-99,67	5,43	0,988
N3	15	3,00	15		-113,76	0,43	0,438
N4	15	3,00	15		-112,67	0,47	0,462
N5	20	4,00	10		-123,89	-4,54	0,000
N6	20	4,00	10		-123,91	-4,56	0,000
Σ		18,00				Σ	2,916

Fonte: Autor (2019)

Conforme apresentado na Tabela 2, optou-se por não expor os valores de fluxo disponível nos nós para o MHDDem (EPANET 2), tendo em vista que este modelo assume que as demandas são completamente satisfeitas independentemente da pressão. Tendo como base essa proposição, o modelo obtém resultados que distam bastante da situação real, como os valores de pressão disponível nos nós. Além disso, destaca-se a incoerência dessa consideração principalmente com relação aos nós N5 e N6, pois a configuração da rede impede que as demandas destes nós seja atendida, como assume o modelo. Em vista disso, é reforçada a premissa apresentada por Siew e Tanyimboh (2012) de que esta consideração se configura como sendo o principal fator limitante do modelo.

Para os demais nós da rede (N1, N2, N3 e N4), situados numa cota abaixo da cota do reservatório, era esperado que as análises retornassem valores positivos de pressão, o que seria um indicativo de que foi alcançada uma melhor aproximação do que, de fato, ocorre na situação real. De acordo com os dados apresentado na Tabela 2, o MHDPres (SAYYED; GUPTA; TANYIMBOH, 2015) mostrou-se como sendo mais eficaz, principalmente pelo fato de que ele

foi capaz de reproduzir as situações de fluxos parciais (menores do que a demanda do nó), bem como os respectivos valores de pressão disponível.

Ao contrário do que considera MHDDem (EPANET 2), dos 18 L/s de demanda total da rede, apenas 2,916 L/s seria atendido, correspondendo a uma drástica diferença percentual de 83,8%. Vale a ressalva de que, na prática, o resultado obtido através da modelagem de vazão dirigida pela demanda obviamente não seria aceito como satisfatória pelo projetista. No entanto, apesar de não se tratar de uma rede real, o exemplo serve para destacar que a modelagem de vazão dirigida pela pressão faz considerações muito mais condizentes com a realidade, exemplificado pelo fato de que o modelo foi capaz de definir corretamente a condição de que o fluxo disponível para os nós N5 e N6 seria 0, sendo este o resultado mais coerente com a configuração da rede.

5.2. Rede do loteamento de alto padrão

As avaliações foram realizadas separadamente para os dois setores do estudo de caso. Para o Setor 1, a vazão total de projeto é de 2,23 L/s. O valor da cota do nó mais elevado é de 603,20 m. Portanto, a carga hidráulica utilizada como dado de entrada foi 613,20 m. Para o Setor 2, a vazão total de projeto é de 3,54 L/s. O valor da cota do nó mais elevado é de 601,95 m. Deste modo, a carga hidráulica utilizada como dado de entrada foi 611,95 m. Os resultados das simulações com os modelos MHDDem (EPANET 2) e MHDPres (SAYYED; GUPTA; TANYIMBOH, 2015), obtidos separadamente para cada um dos setores estão apresentados na Tabela 3. Os resultados são apresentados de maneira mais detalhada nas tabelas do Apêndice B.

Tabela 3 – Resultados das análises executadas para a rede do estudo de caso

ID Setor	Carga hidráulica (mca)	Vazão total (L/s)		Diferença (%)
		MHDDem (EPANET 2)	MHDPres (SAYYED; GUPTA; TANYIMBOH, 2015)	
1	613,20	2,23	1,87	16,01
2	611,95	3,54	3,16	10,80
			Σ	26,81

Fonte: Autor (2019)

Como no exemplo da rede fictícia, o MHDPres (SAYYED; GUPTA; TANYIMBOH, 2015) se mostrou eficaz no sentido de ser capaz de reproduzir as condições de fluxos parciais e, com isso, quantificar de maneira mais precisa os déficits de demanda. Desta forma, permite-se que seja feito um comparativo entre os modelos de uma forma quantitativa através, por exemplo, do cálculo diferença percentual entre valores de vazão total observada entre estes. Através desta comparação, constata-se que, eventualmente, mais de $\frac{1}{4}$ da vazão prevista na fase de projeto pode não ser, de fato, atendida na prática.

Destaca-se ainda que, para os valores de dados de entrada considerados, 53 dos 73 nós da rede (considerando os dois setores) apresentaram valores de pressão acima do valor objetivo (10 mca) e seus respectivos valores de fluxo disponível se aproximaram de maneira bastante satisfatória dos valores de demanda pré-estabelecidos em projeto, podendo, portanto, ser considerado como um bom modelo de representação para o que acontece na prática com esta rede. Entretanto, observa-se também uma limitação do modelo no sentido de que, ao utilizar a válvula de controle de fluxo para limitar o fluxo disponível no nó a um valor máximo igual a demanda, o modelo não reproduz a tendência natural de escoamento da água para os pontos de menor energia, o que pode fazer com que, na prática, esse valor máximo seja superado.

6. CONCLUSÃO

O emprego de modelos de simulação hidráulica em projetos, dimensionamento e calibração de sistemas de distribuição de água é imprescindível. Devido a sua importância, é essencial que o modelo adotado seja capaz de prever o comportamento das redes de forma mais realista. Para tal, apesar de o EPANET 2 ser o *software* normalmente utilizado para estas análises, o modelo de vazão guiada pela pressão se mostrou mais eficaz em redes com déficit de pressão.

Na análise de redes onde se espera a ocorrência de pressões negativas nos nós, o modelo de simulação hidráulica dirigido pela demanda (MHDDem) foi capaz de reproduzir, de fato, a ocorrência dessas pressões negativas, porém de maneira inconsistente ao constatar que esse fenômeno seria observado em todos os nós, o que, na prática, não acontece. O modelo de vazão guiada pela pressão (MHDPres) consegue evitar essa errônea constatação, apresentando pressões negativas apenas nos nós onde era esperado que essas ocorressem, representando, portanto, uma metodologia mais condizente com a realidade.

Através de uma proposta relativamente simples de adicionar um conjunto de elementos artificiais aos nós de demanda, executando as simulações através de um simulador hidráulico “tradicional”, a metodologia do modelo dirigido pela pressão consegue contornar a principal limitação do modelo de vazão guiada pela demanda, que consiste na consideração de que a demanda nos nós é completamente satisfeita, independentemente da pressão no nó. Com isso, através dos resultados obtidos para esse modelo, foi possível quantificar o déficit de fluxo disponível em cada um dos nós e, com isso, estimar a vazão que está alimentando a rede como um todo.

A diferença dos resultados dos modelos dirigidos pela vazão e pressão evidencia a importância da adoção de uma metodologia diferenciada para analisar sistemas reais com déficit de pressão, que considere explicitamente a relação entre demandas nodais e pressão, tendo em vista a discrepância considerável entre os valores das vazões demandadas pelo modelo tradicional e pelo MHDPres. Entretanto, destaca-se que os modelos de simulação hidráulica disponíveis na literatura ainda não atendem complementarmente as exigências desses sistemas.

REFERÊNCIAS

- ACKLEY, J. R. L. et al. Head-driven analysis of water distribution systems. **Water software systems: theory and applications**, v. 1, p. 183-192, 2001.
- ANG, Wah Khim; JOWITT, Paul W. Solution for water distribution systems under pressure-deficient conditions. **Journal of water resources planning and management**, v. 132, n. 3, p. 175-182, 2006.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION et al. Committee Report: Trends in water distribution system modeling. **Journal-American Water Works Association**, v. 106, n. 10, p. 51-59, 2014.
- BAO, Yixing; MAYS, Larry W. Model for water distribution system reliability. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 116, n. 9, p. 1119-1137, 1990.
- BHAVE, Pramod R. Node flow analysis distribution systems. **Transportation engineering journal of ASCE**, v. 107, n. 4, p. 457-467, 1981.
- BHAVE, Pramod R. Analysis of flow in water distribution networks. In: **Analysis of flow in water distribution networks**. Technomic Publishing, 1991.
- BING. **Bing Aerial**. Disponível em: <<https://www.bing.com/maps/aerial#>>. Acesso em: 03 mai. 2019.
- BRASIL. IBGE. **Censo Demográfico, 2000**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 11 nov. 2018.
- CAREY, Malachy; HENDRICKSON, Chris. Bounds on expected performance of networks with links subject to failure. **Networks**, v. 14, n. 3, p. 439-456, 1984.
- COELHO, Sérgio Teixeira; ALEGRE, Helena; LOUREIRO, Dália. **Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água**. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, 2006.
- CULLINANE, M. John; LANSEY, Kevin E.; MAYS, Larry W. Optimization-availability-based design of water-distribution networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 118, n. 3, p. 420-441, 1992.
- ELHAY, Sylvan et al. A robust, rapidly convergent method that solves the water distribution equations for pressure-dependent models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 2, p. 04015047, 2015.
- FUJIWARA, Okitsugu; DE SILVA, Amal U. Algorithm for reliability-based optimal design of water networks. **Journal of Environmental Engineering**, v. 116, n. 3, p. 575-587, 1990.
- FUJIWARA, Okitsugu; GANESHARAJAH, Tharmarajah. Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks. **Water Resources Research**, v. 29, n. 8, p. 2917-2924, 1993.

FUJIWARA, Okitsugu; LI, Jun. Reliability analysis of water distribution networks in consideration of equity, redistribution, and pressure-dependent demand. **Water resources research**, v. 34, n. 7, p. 1843-1850, 1998.

GERMANOPOULOS, George. A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. **Civil Engineering Systems**, v. 2, n. 3, p. 171-179, 1985.

GIUSTOLISI, Orazio; LAUCHELLI, Daniele. Water distribution network pressure-driven analysis using the enhanced global gradient algorithm (EGGA). **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 137, n. 6, p. 498-510, 2010.

GIUSTOLISI, Orazio; SAVIC, Dragan; KAPELAN, Zoran. Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 5, p. 626-635, 2008.

GOREV, Nikolai B.; KODZHESPIROVA, Inna F. Noniterative implementation of pressure-dependent demands using the hydraulic analysis engine of EPANET 2. **Water resources management**, v. 27, n. 10, p. 3623-3630, 2013.

GUPTA, Aditya et al. Leakage reduction in water distribution systems with efficient placement and control of pressure reducing valves using soft computing techniques. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 7, n. 2, p. 1528-1534, 2016.

GUPTA, Rajesh; ABDY SAYYED, M. A. H.; TANYIMBOH, Tiku T. Discussion of “New Pressure-Driven Approach for Modeling Water Distribution Networks” by Herman A. Mahmoud, Dragan Savić, and Zoran Kapelan. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 6, p. 07018006, 2018.

GUPTA, Rajesh; BHAVE, Pramod R. Comparison of methods for predicting deficient-network performance. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 122, n. 3, p. 214-217, 1996.

HONG, H. P.; ALLOUCHE, E. N.; TRIVEDI, M. Optimal scheduling of replacement and rehabilitation of water distribution systems. **Journal of infrastructure systems**, v. 12, n. 3, p. 184-191, 2006.

JINESH BABU, K. S.; MOHAN, S. Extended period simulation for pressure-deficient water distribution network. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 26, n. 4, p. 498-505, 2011.

JUN, Liu; GUOPING, Yu. Iterative methodology of pressure-dependent demand based on EPANET for pressure-deficient water distribution analysis. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 1, p. 34-44, 2012.

KALUNGI, Paul; TANYIMBOH, Tiku T. Redundancy model for water distribution systems. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 82, n. 3, p. 275-286, 2003.

- KANG, Doosun; LANSEY, Kevin. Novel approach to detecting pipe bursts in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 1, p. 121-127, 2012.
- KRUSZYŃSKI, Wojciech. Computer modeling of selected water quality parameters in water distribution systems. **Inżynieria Ekologiczna**, v. 2016, n. 48, p. 125-129, 2016.
- KUN, Du et al. Inversion model of water distribution systems for nodal demand calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 9, p. 04015002, 2015.
- LAUCELLI, Daniele; GIUSTOLISI, Orazio. Vulnerability assessment of water distribution networks under seismic actions. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 6, p. 04014082, 2014.
- MAHMOUD, Herman A.; SAVIĆ, Dragan; KAPELAN, Zoran. New pressure-driven approach for modeling water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 8, p. 04017031, 2017.
- MANSOOR, M. A. M.; VAIRAVAMOORTHY, K. Need for pressure dependent demand in analysing failure of pipe networks. **Advances in water supply management**, p. 217-225, 2003.
- MARTIN, D. W.; PETERS, Gwendoline. The application of Newton's method to network analysis by digital computer. **Journal of the institute of Water Engineers**, v. 17, n. 2, p. 115, 1963.
- MARTINS, V. A. et al. Modelagem Computacional como ferramenta para Estudos de Eficiência Energética no Saneamento. Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água João Pessoa (Brasil). 2006.
- MURANHO, J. et al. Pressure-dependent demand and leakage modelling with an EPANET extension–WaterNetGen. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 632-639, 2014.
- OZGER, Sukru Serkan; MAYS, L. W. **A semi-pressure-driven approach to reliability assessment of water distribution networks**. 2003. Tese de Doutorado. Arizona State University.
- REDDY, L. Srinivasa; ELANGO, K. Analysis of water distribution networks with head-dependent outlets. **Civil Engineering Systems**, v. 6, n. 3, p. 102-110, 1989.
- RIIS, Thomas Sjømoen. **Modeling water distribution systems-integration between SCADA systems and hydraulic network simulation models**. 2016. Dissertação de Mestrado. NTNU.
- ROSSMAN, Lewis A. Discussion of “solution for water distribution systems under pressure-deficient conditions” by Wah Khim Ang and Paul W. Jowitt. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 133, n. 6, p. 566-567, 2007.

ROSSMAN, Lewis A. Epanet 2 users manual, us environmental protection agency. **Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH**, v. 45268, 2000.

SAYYED, Mohd Abbas H. Abdy; GUPTA, Rajesh; TANYIMBOH, Tiku T. Noniterative application of EPANET for pressure dependent modelling of water distribution systems. **Water resources management**, v. 29, n. 9, p. 3227-3242, 2015.

SHAMIR, Uri Y.; HOWARD, Charles DD. Water distribution systems analysis. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 94, n. 1, p. 219-234, 1968.

SIEW, Calvin; TANYIMBOH, Tiku T. Pressure-dependent EPANET extension. **Water Resources Management**, v. 26, n. 6, p. 1477-1498, 2012.

SURIBABU, C. R. et al. Balancing reservoir based approach for solution to pressure deficient water distribution networks. **International Journal of Civil and Structural Engineering**, v. 2, n. 2, p. 639-647, 2011.

PARK, Suwan et al. Development of computational algorithms for pump operations and their applications to the system dynamics modelling of a water supply system. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 34, n. 2, p. 162-183, 2017.

TABESH, M.; JAMASB, M.; MOEINI, R. Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses. **Urban Water Journal**, v. 8, n. 2, p. 93-102, 2011.

TANYIMBOH, T. T. et al. Discussion and Closure: comparison of methods for predicting deficient-network performance. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 123, n. 6, p. 369-370, 1997.

TANYIMBOH, Tiku; TEMPLEMAN, Andrew B. Seamless pressure-deficient water distribution system model. **Proceedings of the ICE-Water Management**, v. 163, n. 8, p. 389-396, 2010.

TAO, Tao et al. Burst detection using an artificial immune network in water-distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 10, p. 04014027, 2013.

TODINI, E. A more realistic approach to the ‘extended period simulation’ of water distribution networks. **Advances in water supply management**, p. 173-184, 2003.

TODINI, Ezio. On the convergence properties of the different pipe network algorithms. In: **8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium**. 2006. p. 1-16.

TODINI, E.; PILATI, S. A gradient method for the solution of looped pipe networks. **Computer applications in water supply**, v. 1, p. 1-20, 1988.

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 3, p. 277-285, 1999.

UDO, A., OZAWA, T. Steady state analysis of pipe networks considering reduction of outflow in the case of low water pressures. **Water software systems: Theory and applications**, v. 1, B. Coulbeck, and J. P. Rance, eds., p. 173–182, 2001.

WAGNER, Janet M.; SHAMIR, Uri; MARKS, David H. Water distribution reliability: simulation methods. **Journal of water resources planning and management**, v. 114, n. 3, p. 276-294, 1988.

WU, Zheng Yi. Discussion of “Solution for Water Distribution Systems under Pressure-Deficient Conditions” by Wah Khim Ang and Paul W. Jowitt. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 133, n. 6, p. 567-568, 2007.

YANG, Xueyao; BOCCELLI, Dominic L. Bayesian approach for real-time probabilistic contamination source identification. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 8, p. 04014019, 2013.

APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DA REDE DO ESTUDO DE CASO

Identificador do Trecho	Trechos			Setor I		
	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Identificador do Nó	Nós	Cota (m)	Consumo (l/s)
Tubulação T0	0,0	100	Nó N1	599,0	0,00	
Tubulação T1	6,3	100	Nó N2	599,0	0,01	
Tubulação T2	26,5	100	Nó N3	598,8	0,08	
Tubulação T3	146,0	100	Nó N4	601,6	0,09	
Tubulação T4	52,0	100	Nó N5	601,3	0,05	
Tubulação T5	32,5	75	Nó N6	602,0	0,14	
Tubulação T6	61,0	75	Nó N7	602,9	0,17	
Tubulação T7	58,7	75	Nó N8	603,2	0,17	
Tubulação T8	61,4	50	Nó N9	603,1	0,15	
Tubulação T9	58,5	50	Nó N10	601,1	0,06	
Tubulação T10	32,0	50	Nó N11	599,0	0,03	
Tubulação T11	36,7	50	Nó N12	597,8	0,02	
Tubulação T12	57,1	50	Nó N13	598,5	0,11	
Tubulação T13	130,9	50	Nó N14	593,0	0,06	
Tubulação T14	71,5	50	Nó N15	595,7	0,03	
Tubulação T15	219,0	50	Nó N16	592,1	0,10	
Tubulação T16	259,1	50	Nó N17	590,2	0,13	
Tubulação T17	33,3	50	Nó N18	590,8	0,01	
Tubulação T18	258,4	50	Nó N19	590,0	0,14	
Tubulação T19	52,7	50	Nó N20	590,1	0,02	
Tubulação T20	221,4	50	Nó N21	591,2	0,10	
Tubulação T21	27,0	50	Nó N22	600,6	0,07	
Tubulação T22	8,5	50	Nó N23	600,1	0,04	
Tubulação T23	51,8	50	Nó N24	598,1	0,08	
Tubulação T24	22,5	50	Nó N25	597,7	0,04	
Tubulação T25	36,8	50	Nó N26	596,9	0,06	
Tubulação T26	34,2	50	Nó N27	596,0	0,05	
Tubulação T27	42,9	50	Nó N28	595,0	0,02	
Tubulação T28	25,8	50	Nó N29	597,0	0,01	
Tubulação T29	54,4	50	Nó N30	594,6	0,02	
Tubulação T30	25,6	50	Nó N31	598,7	0,01	
Tubulação T31	117,0	50	Nó N32	593,5	0,05	
Tubulação T32	25,5	50	Nó N33	600,4	0,01	
Tubulação T33	131,5	50	Nó N34	594,1	0,06	
Tubulação T34	30,0	50	Nó N35	600,0	0,04	
Tubulação T35	24,9	50	Nó N36	600,5	0,01	
			RNF R	609,7	-2,23	

Fonte: Autor (2019)

Identificador do trecho	Setor II				Nós	Consumo (l/s)		
	Trechos		Diâmetro (mm)	Identificador do nó				
	Comprimento (m)							
Tubulação T1	6,5	100	Nó N2	599,0	0,01			
Tubulação T2	19,7	100	Nó N3	599,2	0,09			
Tubulação T3	8,5	50	Nó N4	599,3	0,07			
Tubulação T4	136,7	50	Nó N5	598,1	0,09			
Tubulação T5	46,0	50	Nó N6	597,0	0,08			
Tubulação T6	105,8	50	Nó N7	594,9	0,08			
Tubulação T7	61,3	50	Nó N8	593,4	0,1			
Tubulação T8	134,2	50	Nó N9	587,8	0,07			
Tubulação T9	72,3	100	Nó N10	598,1	0,09			
Tubulação T10	74,9	75	Nó N11	599,9	0,23			
Tubulação T11	65,5	75	Nó N12	600,5	0,18			
Tubulação T12	58,5	75	Nó N13	601,8	0,18			
Tubulação T13	61,1	50	Nó N14	602,0	0,16			
Tubulação T14	59,8	50	Nó N15	601,9	0,15			
Tubulação T15	58,5	50	Nó N16	600,8	0,13			
Tubulação T16	61,4	50	Nó N17	597,7	0,08			
Tubulação T17	102,9	50	Nó N18	591,8	0,05			
Tubulação T18	142,5	50	Nó N19	594,1	0,07			
Tubulação T19	187,8	50	Nó N20	592,9	0,09			
Tubulação T20	198,0	50	Nó N21	591,7	0,12			
Tubulação T21	40,2	50	Nó N22	588,9	0,02			
Tubulação T22	238,2	50	Nó N23	588,9	0,14			
Tubulação T23	44,5	50	Nó N24	586,7	0,02			
Tubulação T24	233,8	50	Nó N25	588,9	0,12			
Tubulação T25	321,6	50	Nó N26	586,0	0,16			
Tubulação T26	37,2	50	Nó N27	599,8	0,15			
Tubulação T27	99,8	50	Nó N28	595,1	0,16			
Tubulação T28	99,7	50	Nó N29	592,0	0,13			
Tubulação T29	84,0	50	Nó N30	590,1	0,04			
Tubulação T30	77,9	50	Nó N31	592,5	0,04			
Tubulação T31	127,3	50	Nó N32	594,7	0,06			
Tubulação T32	160,7	50	Nó N33	596,5	0,08			
Tubulação T33	72,3	50	Nó N34	598,0	0,09			
Tubulação T34	101,5	50	Nó N35	598,2	0,1			
Tubulação T35	67,7	50	Nó N36	596,3	0,07			
Tubulação T36	66,7	50	Nó N37	595,8	0,03			
Tubulação T37	39,6	50	Nó N38	598,3	0,02			
			RNF R	609,7	-3,54			

Fonte: Autor (2019)

APÊNDICE B – RESULTADOS DAS PARA A REDE DO ESTUDO DE CASO

Dados dos nós		Setor I Resultados dos modelos				
		MHDDem (EPANET 2)	MHDPres (SAYYED; GUPTA; TANYIMBOH, 2015)			Fluxo disponível (L/s)
Nós	Cota (m)	Demandas (L/s)	Pressão disponível (m)	Pressão desejada (m)	Pressão disponível (m)	
N1	599	0,003	10,7	14,2	10,70	0,002
N2	599,00	0,014	10,69	14,2	10,70	0,012
N3	598,8	0,076	10,86	14,4	10,87	0,065
N4	601,6	0,087	7,9	11,6	7,96	0,071
N5	601,3	0,049	8,15	11,9	8,22	0,04
N6	602	0,139	7,38	11,2	7,47	0,111
N7	602,9	0,167	6,38	10,3	6,49	0,13
N8	603,2	0,167	6,02	10	6,15	0,128
N9	603,05	0,149	5,98	10,15	6,17	0,114
N10	601,05	0,064	7,91	12,15	8,12	0,052
N11	599	0,030	9,96	14,2	10,17	0,025
N12	597,8	0,016	11,16	15,4	11,37	0,014
N13	598,5	0,114	10,44	14,7	10,65	0,096
N14	592,95	0,058	15,98	20,25	16,20	0,051
N15	595,7	0,031	13,23	17,5	13,45	0,027
N16	592,1	0,096	16,91	21,1	17,10	0,086
N17	590,2	0,129	18,97	23	19,11	0,116
N18	590,8	0,015	18,37	22,4	18,51	0,013
N19	589,95	0,137	19,26	23,25	19,39	0,124
N20	590,1	0,023	19,11	23,1	19,24	0,021
N21	591,2	0,098	18,15	22	18,25	0,088
N22	600,6	0,074	8,79	12,6	8,87	0,061
N23	600,1	0,038	9,27	13,1	9,36	0,031
N24	598,1	0,084	11,22	15,1	11,32	0,072
N25	597,7	0,037	11,61	15,5	11,71	0,032
N26	596,9	0,055	12,4	16,3	12,50	0,048
N27	595,95	0,045	13,35	17,25	13,45	0,04
N28	595	0,019	14,3	18,2	14,40	0,017
N29	596,95	0,011	12,35	16,25	12,45	0,01
N30	594,6	0,024	14,7	18,6	14,80	0,021
N31	598,7	0,011	10,61	14,5	10,71	0,01
N32	593,5	0,052	15,82	19,7	15,92	0,046
N33	600,4	0,011	8,97	12,8	9,06	0,009
N34	594,1	0,058	15,28	19,1	15,37	0,051
N35	600	0,038	8,96	13,2	9,17	0,031
N36	600,5	0,011	8,46	12,7	8,67	0,009
Σ		2,23			Σ	1,874

Fonte: Autor (2019)

Setor II						
			Resultados dos modelos			
Dados de entrada			MHDDem (EPANET 2)	MHDPres (SAYYED; GUPTA; TANYIMBOH, 2015)		
Nós	Cota (m)	Demandas (L/s)	Pressão disponível (m)	Pressão desejada (m)	Pressão disponível (m)	Fluxo disponível (L/s)
N2	599	0,013	10,68	12,95	10,68	0,012
N3	599,2	0,086	10,43	12,75	10,44	0,077
N4	599,3	0,072	10,31	12,65	10,33	0,065
N5	598,1	0,091	11,3	13,85	11,35	0,081
N6	597	0,075	12,36	14,95	12,41	0,068
N7	594,9	0,083	14,4	17,05	14,46	0,076
N8	593,4	0,097	15,88	18,55	15,94	0,089
N9	587,8	0,067	21,47	24,15	21,54	0,063
N10	598,1	0,092	11,41	13,85	11,45	0,083
N11	599,9	0,229	9,34	12,05	9,44	0,201
N12	600,5	0,178	8,59	11,45	8,72	0,153
N13	601,8	0,178	7,2	10,15	7,35	0,149
N14	601,95	0,158	6,68	10	6,92	0,13
N15	601,9	0,150	6,56	10,05	6,84	0,122
N16	600,8	0,130	7,6	11,15	7,90	0,108
N17	597,7	0,082	10,69	14,25	10,99	0,071
N18	591,8	0,051	16,59	20,15	16,89	0,046
N19	594,1	0,071	14,29	17,85	14,59	0,063
N20	592,9	0,091	15,55	19,05	15,83	0,082
N21	591,7	0,118	16,89	20,25	17,14	0,108
N22	588,9	0,020	19,69	23,05	19,94	0,018
N23	588,9	0,140	20,04	23,05	20,19	0,131
N24	586,7	0,022	22,24	25,25	22,39	0,021
N25	588,9	0,116	20,16	23,05	20,29	0,108
N26	585,95	0,160	23,21	26	23,31	0,15
N27	599,8	0,148	9,57	12,15	9,63	0,13
N28	595,1	0,162	14,11	16,85	14,19	0,148
N29	591,95	0,130	17,21	20	17,30	0,12
N30	590,1	0,042	19,06	21,85	19,15	0,039
N31	592,5	0,039	16,66	19,45	16,75	0,036
N32	594,7	0,063	14,5	17,25	14,58	0,058
N33	596,5	0,080	12,86	15,45	12,92	0,072
N34	598	0,086	11,56	13,95	11,59	0,078
N35	598,2	0,104	11,31	13,75	11,35	0,093
N36	596,3	0,067	13,21	15,65	13,24	0,061
N37	595,8	0,033	13,7	16,15	13,74	0,03
N38	598,3	0,020	11,21	13,65	11,25	0,018
Σ		3,541			Σ	3,158

Fonte: Autor (2019)