

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Estudos de calibração de redes de abastecimento de água utilizando o acoplamento dos
softwares R e EPANET**

Matheus David Guimarães Barbedo

Itajubá (MG)

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Matheus David Guimarães Barbedo

Estudos de calibração de redes de abastecimento de água utilizando o acoplamento dos softwares R e EPANET

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva

Itajubá (MG)

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**Estudos de calibração de redes de abastecimento de água utilizando o
acoplamento dos softwares R e Epanet**

Exame de defesa em 11 de Fevereiro de 2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva - UNIFEI
Orientador

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva - UNIFEI
Avaliador interno

Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho - UFU
Avaliador externo

Dedico este trabalho a Deus que até aqui me sustentou com sua poderosa mão

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que é o autor da vida e me dá forças para estar concluindo este curso.

Agradeço a minha maior incentivadora, minha esposa Thayná Barbedo pelo apoio irrestrito, carinho e incentivo e que me apoiou em todas as etapas

Agradeço os meus pais Luiza e Benedito pelo apoio e o incentivo durante o curso e que não mediram esforços para me ajudar.

Agradeço os meus irmãos Sarah e Levi que sempre estiveram ao meu lado, me ajudaram e acreditaram que eu seria capaz de chegar até aqui.

Agradeço a minha sobrinha Ana Beatriz pelo carinho e por sempre me trazer alegria

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva, pela orientação, dedicação, paciência e seus conhecimentos repassados durante todo o desenvolvimento do trabalho, além da grande amizade formada.

Agradeço o Prof. Dr. Victor Eduardo de Mello Valério pela imensa ajuda, competência, paciência e profissionalismo.

Agradeço aos amigos pela lealdade, especialmente ao Alex Takeo Yasumura Lima Silva.

Agradeço À Unifei por proporcionar todos os momentos de aprendizados e conquistas.

Agradeço aos docentes e discentes do POSMARH pelo acolhimento.

Agradeço ao NUMMARH – Núcleo de modelagem em simulação em meio ambiente e recursos hídricos da UNIFEI.

Agradeço ao Projeto REDECOPE Finep – MCT (Ref. 0983/10) Ministério da Ciência e Tecnologia intitulado “Desenvolvimento de tecnologias eficientes para a gestão hidroenergética em sistemas de abastecimento de água” e Programa Pesquisador Mineiro da FAPEMIG pelo PPM - 00755-16.

Agradeço a Fundação de Amparo a pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro, pois esta pesquisa foi elaborada com o seu apoio.

RESUMO

Diante da indiscutível demanda de recursos hídricos, em termos de qualidade e quantidade cada vez mais crescentes em centros urbanos, os sistemas de abastecimento de água, em especial as redes de água têm um papel importante em termos de infraestrutura urbana. A previsão do comportamento destas estruturas hidráulicas usando modelagem e simulação é importante para gestores de diversos setores, sejam públicos e privados. Ao longo dos anos, constantes mudanças físicas e operacionais ocorrem nas redes como, por exemplo, alteração de asperezas físicas das tubulações, necessitando-se de ajustes dinâmicos bem como de modelos matemáticos para prever seu comportamento hidráulico, para modificar e melhorar seus parâmetros. A calibração inversa da rede de distribuição de água é o processo de ajustes de parâmetros não mensuráveis com base nas medidas de parâmetros tais como pressão e vazão. Existem inúmeras metodologias para esta finalidade, entretanto não se tem conhecimentos de pesquisas de calibração com a utilização do *software* EPANET acoplado ao *software* R , explorando os potenciais de avaliação hidráulica o primeiro e a análise de dados do segundo. Deste modo o objetivo do presente trabalho foi avaliar a potencialidade original de uso destas duas ferramentas para a finalidade de calibração. Para alcançar este objetivo a metodologia aplicou este acoplamento em uma rede teórica desenvolvida para o estudo. Os resultados demonstraram-se havendo bom ajuste entre valores de referência considerados medidos, e os gerados pela simulação. Conclui-se que existe potencialidade de uso desta ferramenta para novos estudos e futuramente em aplicações em redes de abastecimento de água reais.

Palavras-chave: Calibração, Acoplamento de *softwares*, *software* EPANET, *Software* R, Análise estatística, Redes de abastecimento de água

ABSTRACT

In view of the indisputable demand for water resources, in terms of quality and quantity increasingly increasing in urban centers, water supply systems, especially such as water networks, play an important role in terms of urban infrastructure. Predicting the behavior of hydraulic structures using modeling and simulation is important for managers of different types, both public and private. Over the years, constant physical and operational changes occur in networks, such as changes in the physical roughness of pipelines, requiring dynamic adjustments as well as mathematical models to predict their hydraulic behavior in order to modify and improve their parameters. Inverse calibration of the water distribution network is the process of adjusting non-measurable parameters based on parameter measurements such as pressure and flow. There are methodologies for this source, however there is no knowledge of calibration research using the EPANET software coupled to the R, exploring the hydraulic evaluation resources of the first and a data analysis of the second. Thus, the objective of the present work was to evaluate the original potential of using these two tools for a calibration adjustment. To achieve this objective, the methodology was to apply this coupling in a theoretical network developed for the study. The results proved to be good, having a good fit between the reference values considered measured and those generated by the simulation. It is concluded that there is potential to use this tool for new studies and, in the future, for applications in real water supply networks.

Palavras-chave: Calibration, Software coupling, *software* EPANET, *software* R, Statistical analysis, Water distribution network

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração de um sistema de abastecimento de água em planta e perfil	13
Figura 2 – Exemplo de rede ramificada.....	14
Figura 3 – Exemplo de uma rede malhada.	14
Figura 4 – Desenho da Rede e gráfico de Isolinhas de pressão no EPANET 2.0.....	24
Figura 5 – Tela principal do R	25
Figura 6 – Tela principal do RStudio.	26
Figura 7 – Fluxograma das etapas de metodologia do estudo.....	31
Figura 8 – Exemplo de traçado aleatório realizado na interface inicial do EPANET	32
Figura 9 – Gráfico de isolinhas de pressão de rede aleatória	33
Figura 10 – Tabela com as informações dos nós da rede aleatória	33
Figura 11 – Tabela com as informações dos nós da rede aleatória	34
Figura 12 – Interface principal do RStudio executada nos exercícios práticos.....	35
Figura 13 – Ilustração do traçado da rede proposta para o estudo.	35
Figura 14 – Passos 1, 2, 3, 4 e 5 realizados na presente etapa.....	42
Figura 15 – Passos 6,7,8, e 9 realizados na presente etapa.....	43
Figura 16 – Fluxograma do algoritmo de calibração.....	47
Figura 17 – Tabela com as informações dos trechos da rede virtual.....	49
Figura 18 – Tabela com as informações dos nós da rede irtual.....	49
Figura 19 – Gráficos de isolinhas de pressão referente aos nós da rede.....	50
Figura 20 – Gráfico do erro absoluto por cenário.....	51
Figura 21 – Gráfico de rugosidades do cenário 10.....	52
Figura 22– Gráfico do erro absoluto por cenário179.....	52
Figura 23 – Rugosidades do cenário 832	52
Figura 24– Rugosidades do cenário 1502.....	52
Figura 25– Rugosidades do cenário 2684.....	52
Figura 26 – Rugosidades do cenário 3074	52
Figura 27 – Rugosidades do cenário 4683.....	53
Figura 28 – Rugosidades do cenário 5069	53
Figura 29 – Rugosidades do cenário 6423	53
Figura 30 – Rugosidades do cenário 7314.....	53

Figura 31– Rugosidades do cenário 8162.....	53
Figura 32– Rugosidades do cenário 9753	53
Figura 33 – Rugosidades cenários 10,3074,4683 e 9753.....	54
Figura 34 – Comparativo entre a pressão base e a pressão simulada no cenário 10.....	55
Figura 35 – Comparativo entre a pressão base e a pressão simulada no cenário 3074.....	55
Figura 36 – Comparativo entre a pressão base e a pressão simulada no cenário 4683.....	56
Figura 37 – Comparativo entre a pressão base e a pressão simulada no cenário 9753.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pressão nos nós da rede virtual.....	48
Tabela 2 – Cálculo dos erros em porcentagem no cenário 9753.....	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Avanço dos trabalhos de calibração em redes de 2003 até 2020.....	18
Quadro 2 – Valores estabelecidos para cotas (metros) e consumo-base (Litro/segundo) do reservatório e nós	36
Quadro 3 – Comprimento (metros), diâmetro (milímetro) e rugosidade das tubulações.....	37
Quadro 4 – Descrição resumida das funções do pacote <i>epanet2toolkit</i>	39

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo geral.....	12
2.2	Objetivos específicos	12
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1	Concepção de um sistema de abastecimento de água.....	13
3.2	Tipos de redes de abastecimento de água	14
3.3	Perdas nos sistemas de distribuição de água.....	15
3.4	Introdução teórica a calibração de sistemas de abastecimento de água.....	17
3.5	EPANET 2.0 aplicado a modelagem e simulação hidráulica.....	22
3.6	R e RStudio.....	24
3.7	Introdução a análise estatística em redes de abastecimento de água.....	27
3.8	Aplicações do R ao Epanet.....	28
3.9	Calibração de redes de abastecimento de água com os softwares R e Epanet.....	30
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	Etapa 1: Treinamento de uso dos softwares R e Epanet	31
4.2	Etapa 2: Definição de rede virtual para acoplamento dos softwares.....	35
4.3	Etapa 3: Acoplamento dos dois softwares através de um pacote do R aplicado a rede proposta	37
4.4	Etapa 4: Simulações computacionais de calibração da rede virtual definida.....	40
4.5	Etapa 5: Análise dos resultados da calibração feita pelo acoplamento dos softwares.....	41
5.	RESULTADOS	42
5.1	Descrição do algoritmo de calibração de rede de distribuição com o R e o Epanet.....	42
5.1.1	Descrição geral das etapas do algoritmo.....	42
5.1.2	Descrição específica de operacionalização do algoritmo.....	45
5.2	Aplicação para a rede virtual.....	48
5.2.1	Análise dos dados.....	50

6. CONCLUSÃO.....	62
REFERÊNCIAS.....	63

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso hídrico indispensável para quase todas as atividades do homem sobre a terra, sejam agropecuária, urbana ou industrial. No Brasil as perdas de água tratada nos sistemas de abastecimento são muito elevadas, chegando a ser mais de 70 % em alguns estados da região Norte no ano de 2018.

Nos anos de 2014 e 2015 houve uma crise hídrica severa no Brasil. Principalmente na região sudeste ela trouxe inúmeros prejuízos. Na visão de Santos & Silva (2013) ainda que as empresas prestadoras de serviços de saneamento invistam na prestação de melhores serviços voltados para a população, grande parte das redes de água é abandonada e má administrada, o que evidencia a necessidade e uma reforma no sistema de suprimento de água.

De acordo com Oliveira et al (2019) países com padrão de excelência em distribuição de água como EUA e Austrália têm indicadores de perdas menores do que 15%. No Brasil, em 2018, o índice de perdas de faturamento total foi 37,06% e o índice de perdas na distribuição, de 38,45%. Como resultado disso, 6,5 bilhões de m³ de água tratada não foram faturadas pelas empresas de saneamento do Brasil em 2018 e se esse volume fosse faturado geraria uma receita de R\$ 12 bilhões no ano de 2018, mostrando que existe um longo caminho a ser percorrido em busca da melhora deste indicador tão importante (TRATA BRASIL,2020).

Considerando a necessidade de reduzir a perda de água tratada nos sistemas de abastecimento, as técnicas de simulação hidráulica que estão em constante avanço, são de extrema importância para planejar, projetar e diagnosticar possíveis falhas nos sistemas.

Neste sentido O EPANET é um *software* computacional de código aberto e gratuito, que realiza modelagens e simulações hidráulicas, desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos, esse programa permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico em redes pressurizadas de distribuição de água, sendo o mais utilizado no mundo para tal finalidade. É uma ferramenta de apoio na análise dos sistemas de distribuição que auxilia no conhecimento sobre o transporte e o destino da água para o consumo (ROSSMAN, 2009).

O R é um *software* computacional de código aberto e gratuito de análise estatística e gráfica que possui linguagem de programação própria em R, além de possuir um conjunto de ferramentas para manipulação de dados, realização de cálculos e apresentação gráfica através do seu ambiente de desenvolvimento integrado RStudio, ambiente esse que possui mais de 15

mil pacotes e bibliotecas com as mais diversas aplicações que permitem comunicar com outros *softwares*. (HENNING et al., 2016).

Pelo fato dos dois *softwares* serem gratuitos, com código aberto, há incentivo á pesquisa, visto que existem *softwares* de ambas as funções e qualidade, cujas licenças são caras. Neste sentido, um método para utilizar os dois *softwares* em conjunto pode trazer resultados promissores para a comunidade científica.

Desta forma, neste tema apresenta-se a proposta que a presente pesquisa pretende trabalhar, com base no trabalho desenvolvido por Arandia e Eck (2018) em *An R Package for EPANET simulations*, que permite acoplar ambos os *softwares* no ambiente de desenvolvimento integrado denominado RStudio.

Pode-se acrescentar que o acoplamento dos *softwares* Epanet e R e aplicação para a finalidade de calibração de redes de distribuição de água não foi encontrado na literatura e é o principal foco e contribuição do trabalho que poderá dar subsídio para estudos de controle de perdas, haja vista que os processos de modelagem e calibração auxiliam nas tomadas de decisão, permitindo o planejamento, execução e operação de ações para o combate às perdas de água, resultando na melhoria do seu gerenciamento.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho objetiva avaliar a potencialidade do uso do acoplamento dos *Softwares* R (RStudio) e EPANET para avaliar a calibração de redes de abastecimento de água.

2.2 Objetivos específicos

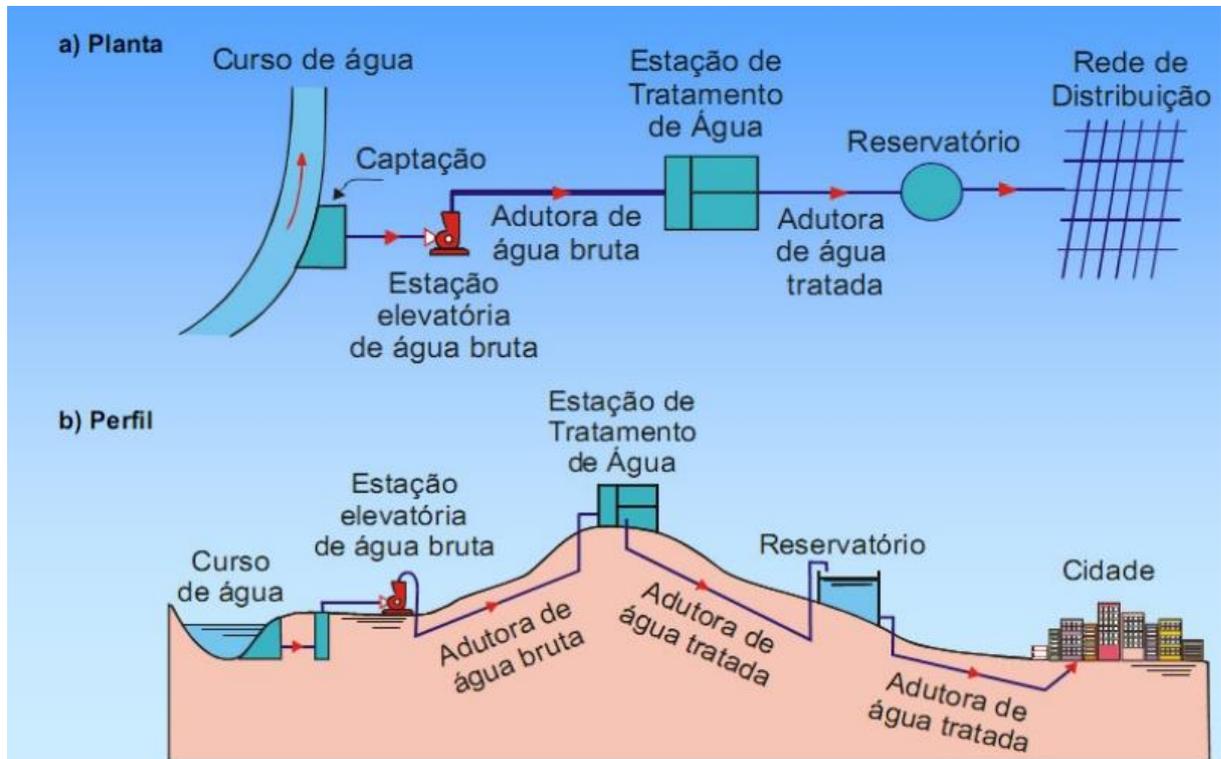
- a) Criar uma rede teórica para aplicação dos softwares acoplados;
- b) Realizar o acoplamento dos *Softwares* R e EPANET aplicado á calibração;
- c) Avaliar as potencialidades do uso dos *softwares* R e Epanet para a calibração de modelos de rede de distribuição de água.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Concepção de um sistema de abastecimento de água

Um sistema de abastecimento de água, como é ilustrado na Figura 1, é composto por um conjunto de tubulações, conectores, reservatórios e bombas hidráulicas. O objetivo desse sistema é levar a água até os pontos de consumo das cidades nas condições sanitárias, vazão e pressão exigidas pelas normas.

Figura 1: Configuração de um sistema de abastecimento de água em planta e perfil



Fonte: Fernandes (2020)

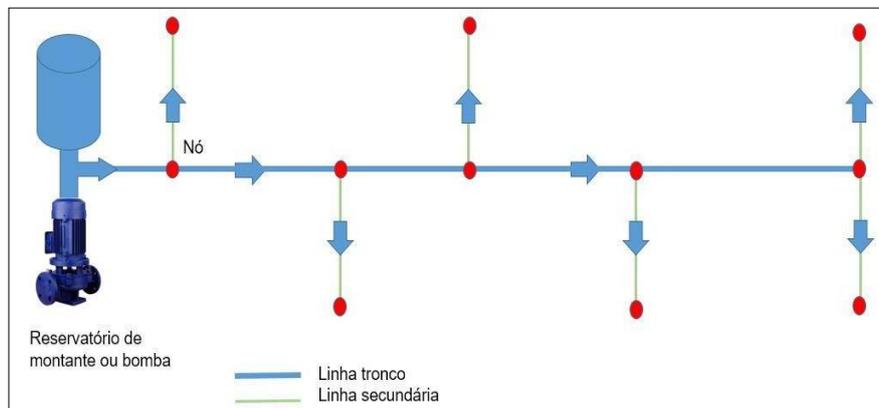
Segundo Tsutiya (2006), seu dimensionamento deve levar em conta fatores como a topografia, tipo de manancial disponível no local, população a ser atendida e a sua estimativa de crescimento, de modo que o sistema seja capaz de atender adequadamente a população durante muitos anos conforme. Os mananciais para abastecimento podem ser poços profundos e/ou rasos, lagos, rios e reservatórios formados por barragens.

3.2 Tipos de Redes de distribuição de água

Uma rede de abastecimento de água é o conjunto de tubulações, bombas, válvulas e reservatórios em um sistema hidráulico (SILVA et al., 2007). Elas podem ser classificadas de acordo com o seu traçado, a alimentação dos reservatórios, zonas de pressão e de acordo com o número de condutos distribuidores na mesma rua.

Na Figura 2 ilustra-se o esquema de uma rede do tipo ramificada. Este tipo de concepção tem como propriedade principal ter o sentido da vazão conhecido e único em qualquer trecho, possuindo sempre uma linha principal chamada tronco. Neste modelo, caso haja um rompimento desta linha, toda a rede será afetada.

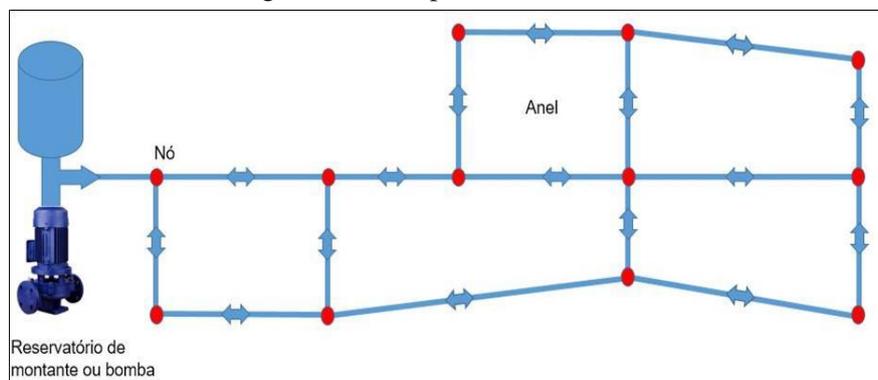
Figura 2 - Exemplo de rede ramificada.



Fonte: Freire (2016)

Na Figura 3 está esquematizada uma rede malhada. Este tipo de rede tem como propriedade principal possuir mais de um caminho para água chegar até um mesmo ponto de consumo. Neste caso, existe mais de um caminho para a água chegar ao mesmo ponto, pois o sentido das vazões pode ser invertido, sendo esta possibilidade condicionada aos fatores de demanda a montante ou a jusante (PORTO, 2006)

Figura 3 - Exemplo de uma rede malhada.



Fonte: Freire (2016)

Um dos principais problemas enfrentados pelas companhias de abastecimento em redes de distribuição diz respeito a elevadas perdas de água tratada. Algumas situações levam ao elevado índice dessas perdas, entre elas, a influência da pressão destaca-se como uma problemática recorrente.

A Norma Brasileira NBR12218 (2017) estabelece o limite mínimo de pressão dinâmica em 100 kPa (aproximadamente 10 m.c.a.) e o limite máximo de pressão estática em 500 kPa (aproximadamente 50 m.c.a.). No entanto nos locais de grande variação topográfica a ocorrência de rompimentos da rede devido a grandes pressões ainda é recorrente.

Segundo Motta (2010), as válvulas redutoras de pressão devem ser empregadas como em circunstâncias específicas, devendo ser feito um estudo mais aprofundado da rede através de programas de modelagem hidráulica de forma a auxiliar na tomada de decisão nos diversos aspectos.

3.3 Perdas nos sistemas de distribuição de água

Segundo o relatório do instituto Trata Brasil (2020) no Brasil, cerca de 39,7 milhões de pessoas não tiveram acesso a água tratada no ano de 2018, e as perdas de água tratada no ano de 2018 chegaram a 6,5 bilhões de m³. Para se ter a noção da grandeza desse desperdício, ele corresponde a 7 vezes a capacidade do Sistema Cantareira ou 7.144 piscinas olímpicas perdidas ao dia (TRATA BRASIL, 2020).

Nas últimas décadas, devido ao desenvolvimento das cidades e centros industriais, a distribuição de água potável sofreu grandes mudanças, levando à rápida disseminação das redes de abastecimento de água, e em muitos casos, de projeto inadequado, aliado à falta de dados sobre a água como (pressão e vazão) e do sistema de abastecimento, como tipo de tubo, diâmetro, Minimizar a perda no sistema de distribuição de água tornou-se uma tarefa complexa (CANNAROZZO et al .; 2006).

Estudos em escala mundial apontam, que as perdas no sistema de distribuição representam cerca de 30 a 40% da água produzida, ocasionado pela deterioração de seus componentes temporalmente, devido à ausência de manutenção constante (FONTANA; GIUGNI; PORTOLANO, 2012) (MUTIKANGA; SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2013) (DA SILVA, 2019), (SILVA, 2019).

As perdas de água em sistemas de abastecimento correspondem a diferença entre o volume de água fornecido ao sistema e o consumo autorizado (ReCESA, 2008). Elas podem ser divididas, segundo Kanakoudis e Muhammetoglu (2014) em aparentes ou comerciais, isto é, a água não faturada devido a ligações clandestinas, falhas em hidrômetros, contabilizações erradas do consumo de água e demais usos não autorizados de água. Os autores citam como soluções para as perdas aparentes o uso de medidores mais exatos, maior fiscalização e legalização de ligações clandestinas e a automatização da contabilização do consumo de água.

As perdas físicas (ou reais) correspondem a valores não calculados devido a vazamentos no sistema (da coleta à distribuição) e consumo acima do estritamente necessário devido a procedimentos operacionais inadequados (incluindo limpeza de filtros na ETA e descarga para limpeza da rede de distribuição). As perdas não físicas (ou aparentes) correspondem a valores utilizados por ligações secretas ou não registradas, acrescidos de valores não especificados devido a medidores descontinuados ou submedidos, fraude de medidores e outras causas (Silva et al., 1998).

A pressão nas tubulações é a principal causadora das perdas reais, haja vista que em muitos casos não há um controle e acaba-se por gerar danos nas tubulações devido as sobrepressões. Estas acabam sendo as principais responsáveis pelos vazamentos nas redes de abastecimento de água.

Uma forma de monitorar e estimar a quantidade de perda é monitorar a pressão da rede, para que uma análise de resposta confiável e rápida possa ser realizada (ABDULSHAHEED; MUSTAPHA; GHAVAMIAN, 2017). Com a implantação da rede, novas tecnologias de monitoramento surgiram, bem como o melhor controle dos órgãos ambientais devido às grandes perdas no processo de distribuição (NAM et al .; 2019; CHRISTODOULOU et al .; 2010; TANYIMBOH; TIETVAINEM; Saleh , ano de 2011).

Cannarozzo et al (2006) enfatizam que o desgaste do sistema de distribuição de energia está diretamente relacionado ao número de falhas na rede, levando a maiores custos operacionais e prejudicando os indicadores de desempenho. Sobre a importância de minimizar o nível de perdas na rede de abastecimento de água, o mundo chegou a um consenso para reduzir as perdas.

Nos últimos anos, empresas e pesquisadores têm buscado soluções para minimizar as perdas e impactos causados pelo desperdício de grandes quantidades de água. Em suma, o método mais comumente utilizado baseia-se na quantidade total de água perdida, na

localização do ponto de vazamento e na busca de métodos futuros de controle de vazamentos. (PUUST et al., 2009; NISIC et al.; 2007; ALKASSEH et al.; 2013).

3.4 Introdução teórica a calibração de sistemas de abastecimento de água

Segundo Zanfei et al (2020) modelos de simulação hidráulica são amplamente utilizados para analisar o comportamento da água em sistemas de distribuição, devido ao alto grau de incerteza e à falta de detalhes do sistema. Um gerenciamento confiável pode ser alcançado apenas com um modelo corretamente calibrado.

Segundo Walski (1983) o processo de calibração pode ser entendido como a minimização entre as diferenças entre os resultados da simulação e medições reais. Silva (2003) apud SHAMIR & HOWARD (1977) define que a calibração de redes de água consiste em determinar as características físicas e operacionais de um sistema existente.

Savic et al. (2009) definem que a calibração dos modelos de distribuição de água pode ser entendida como um processo que ajusta os parâmetros da rede, como rugosidade do tubo e demanda nodal.

Rathi et al (2020), Do et al (2016) e Vassiljev et al. (2015) definem que a calibração de um modelo de sistemas de distribuição de água é definida como o processo de ajuste dos parâmetros de rede para que a saída do modelo de computador corresponde às medições de campo. Para ser confiável, um modelo hidráulico requer um processo de calibração que modifica os parâmetros mais sensíveis. Neste sentido Ormsbee (1989) sugeriu um esquema geral de sete etapas, cujo procedimento de calibração da seguinte forma:

- 1) identificação do uso pretendido do modelo
- 2) estimativas iniciais dos parâmetros do modelo;
- 3) coleta de dados de calibração;
- 4) avaliação do modelo e resultados;
- 5) calibração em nível macro;
- 6) sensibilidade;
- 7) calibração de micro-nível.

A seguir é apresentada a evolução das aplicações de calibração com trabalhos com um intervalo de tempo de 2003 até 2020.

Quadro 1 – Avanço dos trabalhos de calibração em redes de 2003 até 2020

Silva (2003)	Propôs uma rotina computacional para implementação dos algoritmos genéticos com o propósito de calibração de redes reais com vazamentos expressivos.
Savic et al. (2009)	Fizeram uma revisão das abordagens de calibração do modelo e considerando desafios e direções futuras.
Santos (2010)	Realizou a calibração de uma rede de distribuição de água da cidade de Itajubá-MG utilizando o modelo proposto por SILVA (2003).
Tabesh et al. (2011)	Realizaram um procedimento de otimização que é desenvolvido para calibração de ambos os tipos de simulação hidráulica de modelos, análises orientadas à demanda e dependentes de pressão, usando algoritmo genético.
Zhang et al. (2012)	Propuseram um modelo de calibração via algoritmo genético codificado junto com um solucionador de rede (EPANET 2.0) para ajustar os coeficientes de rugosidade do tubo e multiplicadores de demandas nodais até que os critérios predefinidos sejam atendidos.

Dini e Tabesh (2013)	Pesquisaram um novo método de calibração de redes de distribuição de água via algoritmos de otimização da colônia de formigas, (ACO) e compararam os resultados com outros métodos existentes.
ABE (2014)	Propôs um sistema de calibração automático utilizando técnicas de redes neurais artificiais para aprimorar os resultados dos sistemas de calibração.
Sanz et al. (2015)	Propôs uma abordagem de detecção e localização de vazamento a ser acoplada a uma calibração metodológica que identifica parâmetros distribuídos geograficamente a abordagem consistiu em comparar os parâmetros calibrados com seus valores históricos para avaliar se as alterações nesses parâmetros são causadas por uma evolução do sistema ou pelo efeito de vazamento.
Khedr et al. (2015)	Pesquisaram sobre o problema de calibração correspondente com ferramentas de otimização e comparar as soluções de calibração em termos de qualidade (proximidade aos dados medidos) e valores dos parâmetros de calibração.
Vassiljev et al. (2015)	Estudaram se as diferenças entre a demanda em tempo real e a demanda típica podem influenciar os resultados da calibração, além de propor alguns métodos para minimizar essa influência.
Goulart (2015)	Estudou o aprimoramento de alguns módulos do algoritmo de Calibração proposto por Silva (2003) e aplicou em uma rede real de Cambuí-MG.

Santos (2016)	Estudou a aplicação e aprimoramento de rotina de calibração de redes de distribuição de água por meio da calibração em estudo de caso real na cidade de São Lourenço-MG.
Do et al. (2016)	Apresentaram uma abordagem para calibração dos fatores multiplicadores de demanda sob uma condição inadequada, onde o número de medições é menor do que o número de variáveis de parâmetro.
Diaz et al. (2017)	Pesquisaram a calibração dentro de um parâmetro multiperíodo conjunto e abordagem de estimativa de estado, onde os parâmetros do modelo (ou seja coeficientes de rugosidade) e as variáveis hidráulicas devem ser calculadas a partir das medidas disponíveis em momentos diferentes.
Bockzar et al. (2017)	Estudaram o procedimento de calibração de um modelo de rede de abastecimento de água usando dois métodos: o calibrador EPANET e um algoritmo usando software MATLAB.
Minaee et al. (2019)	Propuseram uma metodologia de calibração sequencial para qualquer modelo de qualidade da água usando estimativas específicas de alcance de parâmetros do modelo, o que ajudaria na melhor previsão das características da qualidade da água do rio.

Nakamura et al.(2019)	Propuseram a calibração de um modelo de qualidade da água “Análise de Bacias Críticas Ottocodificadas” (ABaCO) em uma seção do Rio Lambari, o localizado na cidade de Poços de Caldas, Minas Gerais, Brasil, e é considerado qualitativamente crítico pela “Agência Nacional de Águas” (ANA).
Shao et al. (2019)	Pesquisaram um algoritmo de otimização para projeto de amostragem que cujo algoritmo tenta minimizar a incerteza de previsão de calibração através de um sensor.
Zanfei et al. (2020)	Estudaram um procedimento multi-objetivo para calibrar demandas de água e distribuição de rugosidade do tubo no contexto de um problema mal colocado, onde o número de medições é menor do que o número de variáveis.
Rathi (2020)	Estudou as complexidades e desafios envolvidos na calibração da cidade de Nagpur na Índia e também descreve todo o processo de coleta de dados necessários para a calibração da rede.

A evolução dos trabalhos de calibração mostrou que o processo de calibração é desafiador. Os resumos dos trabalhos foram apresentados nas tabelas e alguns destaques são comentados. Segundo Silva (2003) existe a necessidade de elaborar uma modelagem matemática para um sistema físico e também a identificação dos parâmetros a serem determinados pela calibração.

Silva (2003) propôs um modelo baseado em um processo iterativo de duas etapas em que os parâmetros de calibração e de vazamentos, são determinados conjuntamente.

Trata-se de um trabalho de grande impacto, pois foram testadas novas abordagens metodológicas de calibração e aplicações e aplicações foram feitas em rede teórica e duas redes reais na Cidade de São Carlos – SP. Trata-se de um dos trabalhos pioneiros no Brasil

de aplicação de metodologia de calibração com redes reais e Algoritmos Genéticos.

Savic et al. (2009) Fizeram uma revisão de abordagens de calibração e apontaram como direções futuras como as modelagens e algoritmos. Os trabalhos futuros apontam para a modelagem e algoritmos.

Destaca-se que ambos os trabalhos de Tabesh et al. (2011), Zhang et al. (2012) e Dini e Tabesh (2013) usam ferramentas técnicas de otimização. Dois deles usam os algoritmos genéticos e um deles algoritmo baseado em Colônia de Formigas. Os principais parâmetros abordados nestes trabalhos foram rugosidades e demandas. Este último parâmetro também destacado no trabalho de Vassiljev et al. (2015). Já em 2014 no trabalho de ABE (2014) que além de técnicas de otimização observou-se a introdução de o uso de ferramenta de redes neurais artificiais para aplicações em calibração de redes.

Destacam-se também alguns trabalhos de calibração e redes de distribuição de água com ou uso de algoritmos genéticos em aplicações em termos de importância de aplicações em redes reais e brasileiras como por exemplo o trabalho de Goulart (2015) e Santos (2016)

Já na abordagem de Sans et. Al. (2015), da mesma forma como por exemplo no trabalho de Silva (2003), existe uma tendência de abordagem de vazamento associados aos modelos de calibração, pois a relação entre estes e avaliação simultânea é importante. O Epanet normalmente foi um dos principais ferramentas de simulação hidráulica usada nos trabalhos de calibração destacando-se no trabalho de Bockzar et al. (2017) que utilizou o Matlab, uma das várias ferramentas que podem ser associadas ao Epanet.

Zanfei et al. (2020) mencionam que esforços futuros irão resolver o problema dos custos computacionais (como memória, processamento) , que são intensivos para uma grande rede e também envolverá o problema da presença de vazamentos e das medições ruído em uma rede real. Este destaca o uso de ferramenta de otimização multiobjetivo que, nos últimos anos, tem sido tendência para o uso em simulação e otimização em redes de distribuição de água.

3.5 EPANET 2.0 aplicado a modelagem e simulação hidráulica

Considerando a necessidade de reduzir a perda de água tratada no sistema de abastecimento de água, modelar, simular e aplicar a calibração hidráulica, as técnicas de modelagem e simulação por computador são métodos eficazes para estudar o

comportamento dos fluidos (ZANCA et al., 2019). Na visão de Almeida (2021) com o intuito de se obter uma prévia do funcionamento de uma rede e para analisar suas características e vários problemas de operação bem como rupturas, o ato de modelar e simular um sistema de distribuição de água é bem difundido tanto na indústria como no meio acadêmico.

Softwares como o EPANET, são utilizados para este fim e estudos atuais abordam a utilização do EPANET acoplado a outras linguagens de programação, bem como o uso de ferramentas estatísticas para se obter uma melhor resposta da modelagem (ARANDIA; ECK, 2018). O EPANET foi lançado pela primeira vez em 1993 pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (US EPA). O *software* foi desenvolvido por Lew Rossman, para simular a dinâmica hidráulica e de qualidade de sistemas de distribuição de água (SALOMONS; HATCHETT; ELIADES, 2018)

O EPANET rapidamente tornou-se padrão para os projetos e gestão de sistemas de redes de distribuição de água. (MENEPACE *et al.*;2018; ARANDIA;ECK 2018). Trata-se de um dos programas mais testados, analisados e confiáveis para estudos hidráulicos pois possui mais de 2000 citações no Google Acadêmico, o que o torna uma referência no assunto (ARANDIA;ECK, 2018; ECK,2016).

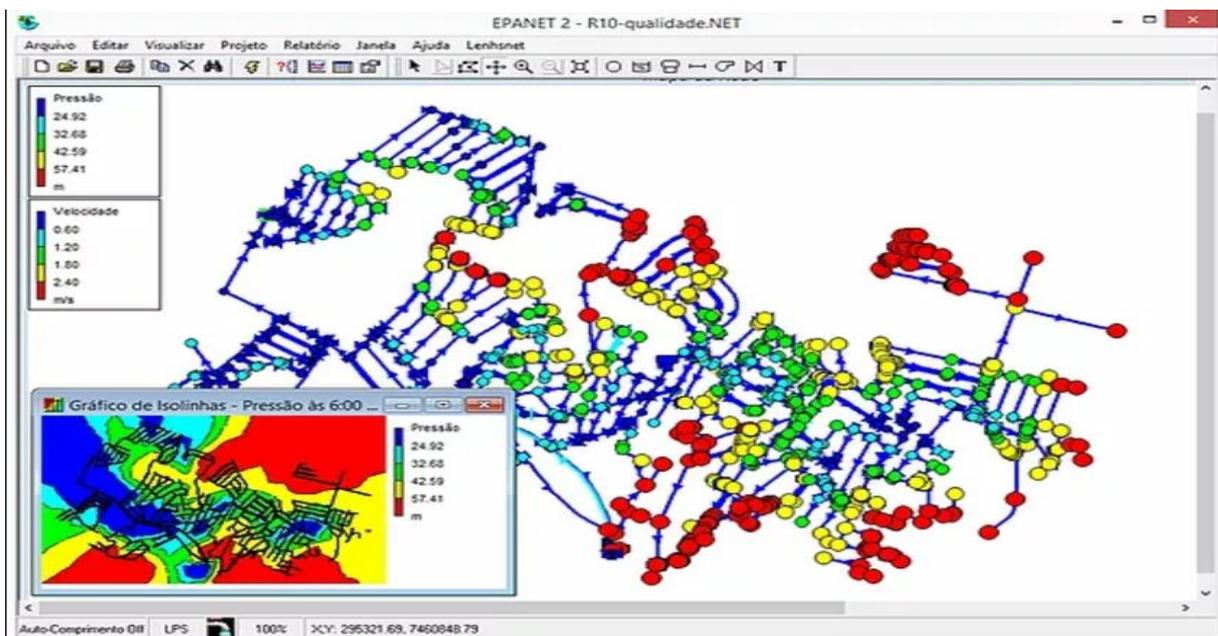
Quando foi desenvolvido, o objetivo do EPANET era servir como uma ferramenta de pesquisa para entender a dinâmica dos constituintes da água potável, levando em consideração as reações que ocorrem no interior da tubulação (SALOMONS; HATCHETT; ELIADES, 2018). O *software* contempla uma versão Americana (2.2) a mais atualizada até a realização desta pesquisa, ao qual foi desenvolvida pela Environmental Protection Agency (EPA) que é a agência estatal norte-americana encarregada pelo Congresso dos Estados Unidos da América de proteger os seus recursos naturais. A versão é compatível com praticamente todas as versões do sistema operacional *Microsoft® Windows*, e possui um manual de utilização que pode ser encontrado no sítio eletrônico da (EPA). Diuana e Ogawa (2015) destacaram as principais ferramentas que podem ser usadas nas modelagens pelo software EPANET, dentre elas:

- Modelagem dos principais tipos de válvulas, dentre elas: Regulador de fluxo; Perda de carga fixa; Suporte de pressão; Redutor de pressão; Controle de perda de carga;
- Número ilimitado de componentes de rede;
- Cálculo da perda de pressão por Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou ChezyManning;

- Cálculo das perdas locais;
- Modelagem de bombas, cálculo de custo e energia;
- Modelagem de reservatórios - níveis fixos e variáveis;
- Simulação da relação pressão-vazão de saída do equipamento de descarga (sprinkler);

De acordo com Silva et al. (2007). Após a entrada dos dados, o programa permite obter o valor da vazão no trecho, a pressão atuante nos nós, a altura do nível da água em cada reservatório para simulação. Além disso, é possível visualizar os resultados gerados por meio de mapas em diversas cores, tabelas de dados, mapas de contorno ou mapas de séries temporais (SILVA et al., 2007). A Figura 4 ilustra o gráfico de isolinhas de pressão da rede.

Figura 4 – Desenho de Rede e gráfico de Isolinhas de pressão no EPANET 2.0



Fonte: EDS Engenharia (2020).

Para Silva (Silva, 2014), em comparação com outros programas de simulação hidráulica, o EPANET se destaca por estar disponível gratuitamente e possuir código aberto, que pode fornecer modificações e interações com outros pacotes de computação de acordo com as necessidades dos usuários, característica muito importante para o desenvolvimento desta pesquisa.

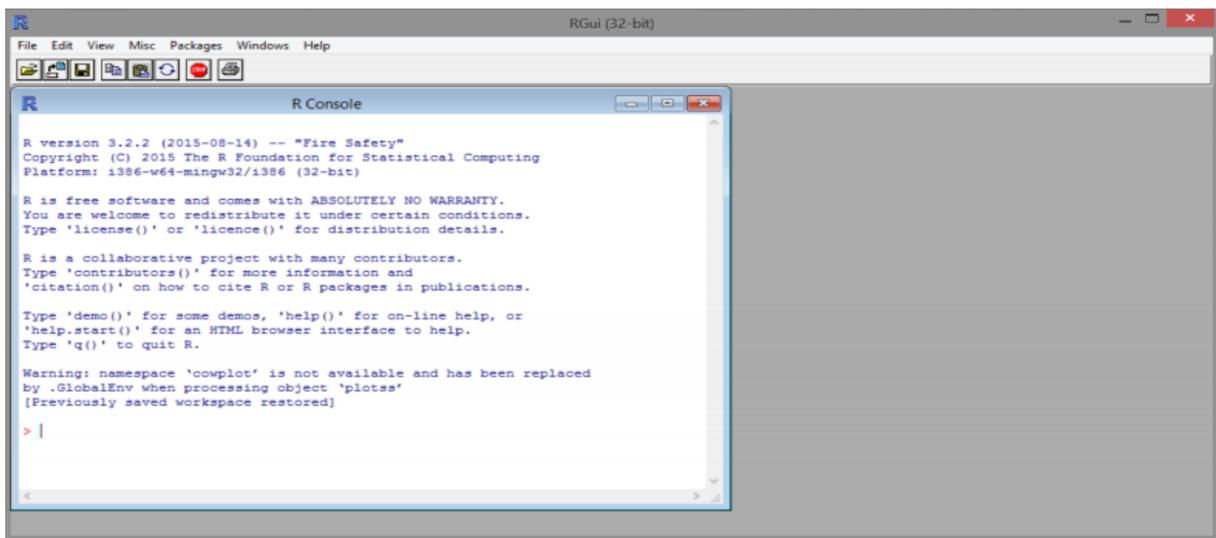
3.6 R e RStudio

Inicialmente desenvolvido por Ihaka e Gentleman em (1996) O R é um ambiente de software de código aberto multiplataforma que implementa uma linguagem própria de programação em R, que conta com os recursos de análise estatística e gráfica dos dados.

Além disso possui código aberto, o que permite utilizá-lo sem custos de licença e contempla versões para *MacOS*, *Windows* e *Linux*.

A linguagem de programação em R é bem desenvolvida, que inclui várias funcionalidades e instalações, incluindo funções recursivas definidas pelo usuário, condições, loops e dados de entrada e saída. (VAIDYA, 2017). A tela principal do software R é ilustrada na Figura 5 a seguir.

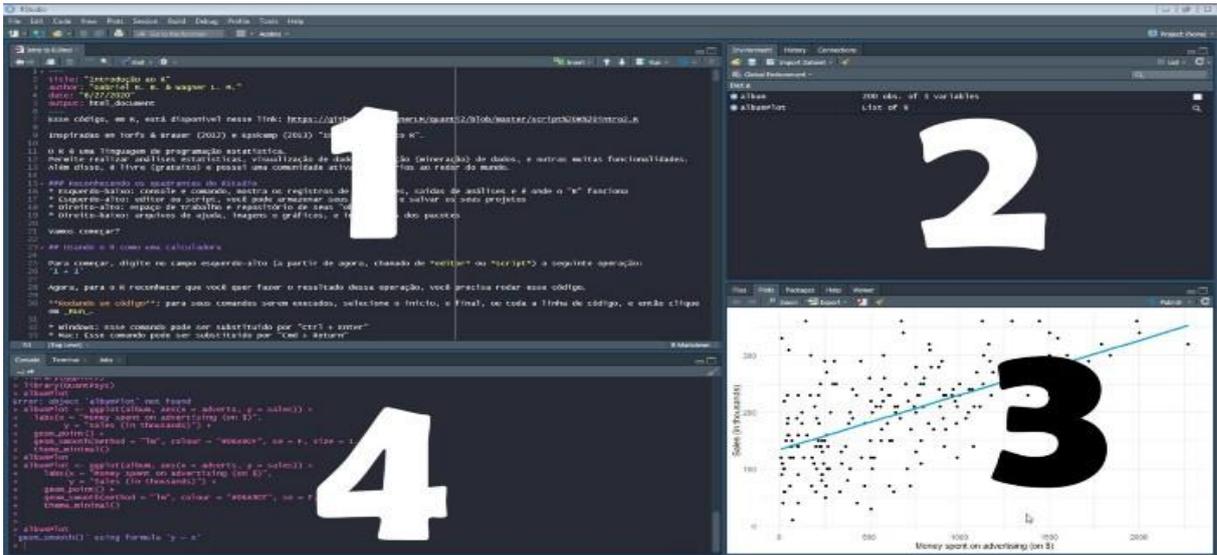
Figura 5 - Tela principal do R



Fonte: adaptado de R (2021).

Para aprimorar a usabilidade do R, foram desenvolvidas interfaces gráficas, entre elas o RStudio (RACINE, 2012). O RStudio é um IDE (ambiente de desenvolvimento integrado) que reúne diversas funcionalidades, tornando mais amigáveis e funcionais aos usuários a importação de dados, visualização de comandos, funções, resultados e gráficos, além da geração de documentos (HENNING et al., 2016). A Figura 6 ilustra a interface principal do RStudio, com um gráfico de regressão linear.

Figura 6 - Tela principal do RStudio.



Fonte: Medium (2020).

Segundo Konrath et al. (2018) a janela denominada 1 refere-se ao *Source*, onde são elaborados e executados os códigos de programação salvos em extensão R; a segunda registra o histórico das funções e ações aplicadas; a terceira parte refere-se ao *console*, equivalente ao disponibilizado no *software* original R; e na última parte (4) são expostos os pacotes contemplados, gráficos elaborados e ação de ajuda. O principal repositório para produtos de software desenvolvidos pela comunidade R, conhecidos como pacotes, é o Comprehensive R Archive Network, denominado CRAN (PLAKIDAS et al.; 2017)

O programa abrange um grande número de pacotes complementares gratuitos desenvolvidos por pesquisadores e membros da comunidade do Core Team, que podem ser encontrados no servidor CRAN - o repositório oficial, responsável por armazenar a versão e modernização do código (CRAN, 2020). Também é possível encontrar pacotes R por meio do serviço de hospedagem GitHub, que disponibiliza repositórios de projetos públicos ou privados para software de código aberto. (GITHUB, 2020).

A gama de outros pacotes de software disponíveis na comunidade R é um dos maiores diferenciais. Estima-se que mais de 12.700 pacotes de software podem ser acessados para diferentes funções. Esses pacotes de software permitem que os usuários resolvam problemas avançados relacionados a diferentes áreas do conhecimento, ajudando assim a desenvolver pesquisas em diferentes campos. (SOUSA et al., 2020; KONRATH et al., 2018)

Dentre os pacotes, Konrath et al. (2018) menciona o pacote *Shiny*, que facilita a criação de aplicações interativas na web que podem ser utilizadas na apresentação de dados de maneira interativa com inovadores recursos de visualização além de oferecer uma interessante interface gráfica para disponibilizar aplicações para as pessoas que não têm familiaridade com R.

Maurer (2020) desenvolveu o pacote *Hydraulics*, disponível para *download* na plataforma CRAN, que contempla funções para cálculos hidráulicos básicos relacionados ao fluxo de água em tubos circulares pressurizados. Dentre as funções estão inclusos cálculos de perda de atrito através da resolução da equação de Darcy-Weisbach para parâmetros de perda de carga, velocidade ou diâmetro e plotagem do diagrama de Moody.

O Serviço Geológico dos Estados Unidos distribui o data Retrieval pacote desenvolvido pelos autores (Hirsch e Cicco, 2015) para recuperar hidrológicos e dados de qualidade da água da web. O pacote WQ de Jassby e Cloern (2015) fornece funções para processar e explorar dados, particularmente dados de qualidade da água, de monitoramento ambiental. Turner e Galelli (2016) desenvolveram o pacote para projetar, analisar e operar estoques de abastecimento de água através de reservatórios.

Eck (2016) desenvolveu o pacote EpanetReader, que possui a função de complementar as análises de arquivos de dados do EPANET em objetos R, visando contribuir para lista de pacotes R disponíveis para modelagem de recursos hidráulicos.

Pode-se dizer que as principais funções fornecidas pelo EpanetReader possuem o intuito de analisar os arquivos textos gerados pelo EPANET na plataforma R (ECK, 2016).

Além da leitura, o pacote contempla funções genéricas para manipulação e visualização de objetos resultantes da decodificação de arquivos, possui funcionalidades de ajuda que facilitam a plotagem, e permite a geração de gráficos a partir de pequenos dados de entrada, auxiliando na análise visual dos projetos (ECK, 2016).

Segundo Eck (2016) uma das vantagens de prosperar o pacote na plataforma R é que ela permite a interação do mesmo com outros pacotes disponíveis na comunidade, fator que reforça sua utilidade e torna o EpanetReader uma ferramenta interessante para contribuir em projetos hidráulicos.

3.7 Introdução a análise estatística em redes de abastecimento de água

Ao introduzir a análise probabilística na pesquisa, a mesma pode ter uma interface de respostas mais próximos da realidade em termos de redes de abastecimento de água (SURENDRAN; MAHARAJ, 2018). Os resultados obtidos variam bastante, e a análise estatística pode ajudar a aumentar a possibilidade de uma resposta mais confiável (MELIA et al. 2013

Chen e Guikema (2020) apontam que o uso de análise estatística é uma ferramenta importante para o processamento de dados de entrada na análise de redes de distribuição de água.

Xu et al. (2018); Nam et al. (2019) apontaram que as técnicas estatísticas computacionais parecem ser uma ferramenta importante para o melhor processamento dos resultados obtidos no monitoramento de sistemas de distribuição. Nessas análises, são utilizados dados como vazão e pressão obtidos pelo monitoramento da rede, e os resultados mostram que o tempo de resposta é melhorado em relação ao sistema de intervenção tradicional, portanto, torna-se ótimos auxílios para as tomadas de decisão.

Para melhorar a velocidade de resposta da análise estatística, são utilizadas linguagens de programação acopladas a outros *softwares* de modelagem e simulação como o EPANET, de forma a fornecer um melhor ambiente para a análise estatística dos dados.

O uso da linguagem R é amplamente utilizado, pois a linguagem pode ser utilizada para melhor expressar e explicar o processamento de dados espaço-temporais e a análise do desempenho da rede de abastecimento de água (ROSSMAN 2000; LUBOMIR; CELAR, 2016). Segundo Suzuki e Shimodaira (2006) a linguagem R é *open source* e compatível com as plataformas mais importantes (como Windows, Linux MacOS).

3.8 Aplicações do R ao Epanet

Esta técnica de acoplar dois *softwares* já foi realizada por alguns autores e eles obtiveram êxito, ao qual citamos Faria, Calijuri e Oliveira (2009) que combinaram o SPRING e o EPANET 2.0 para a simulação de pressão e vazão de redes hidráulicas. Os programas comunicam entre si para analisar a rede hidráulica teórica (virtual), ao qual a rede é desenhada em detalhe no *software* EPANET, e os seus parâmetros são semelhantes aos da rede real para obter resultados estatísticos do grau de dispersão. Deste modo o objetivo do uso destes dois *softwares* para avaliação da potencialidade de aplicação na rede teórica foi aqui avaliado. A

utilização da modelagem computacional para analisar o comportamento de redes de abastecimento de água serviu como fator preponderante para a elaboração desta pesquisa, que utilizou do trabalho de Arandia e Eck (2018) que descreve o pacote *Epanet2toolkit* - desenvolvido para fazer simulações hidráulicas com os softwares R e EPANET trabalhando em conjunto.

Segundo Arandia e Eck (2018) o *Epanet2toolkit* foi projetado como um invólucro para o EPANET, ou seja, suas funções no R possuem o mesmo nome que as funções no EPANET quando solicitado pela API (interface de programação de aplicativos) do *Microsoft® Windows*, mas divergem em contextos de função e parâmetros de retorno. O mecanismo de funcionamento é igual para todas as funções: basicamente o pacote exporta as funções do EPANET API para o programa R, efetua a análise dos argumentos, verifica os códigos de erros e retorna os valores requisitados (ARANDIA; ECK, 2018).

O *epanet2toolkit* precisa ser instalado na biblioteca do R para que o usuário desfrute de suas funções. Para isto ocorrer, basta acionar a função *install.packages*, original do programa. Depois de instalado, é necessário executar a função *library* para carregá-la na biblioteca todas as vezes em que houver uma nova inicialização do R.

A variedade de funções no pacote exige a interação entre os programas, como no caso da função *ENepanet* - utilizada para rodar uma simulação hidráulica completa e escrever os resultados em um arquivo de relatório (.rpt) - necessita-se de um arquivo de entrada no formato “.inp” gerado pelo EPANET (ARANDIA; ECK, 2018). De acordo com o manual do EPANET desenvolvido por (Rossman,2000) o *software* possui também, a capacidade de interação com diversos programas através dos arquivos texto “.inp”, que contem todas as características hidráulicas e, de controle de qualidade da água na rede.

Segundo Arandia e Eck (2018) o primeiro passo para acessar ou mudar as propriedades da rede hidráulica é inicializar o código a com função que ativa o motor para leitura de arquivos EPANET, denominada *ENopen*. Ressalta-se que, depois de realizadas as interações desejadas, o sistema deve ser encerrado através da função *ENClose*.

As funções *ENget** e *ENset** possuem grande importância para desenvolver estudo das redes e geralmente são utilizadas em conjunto. Basicamente a primeira tem como intuito retornar o valor de algum parâmetro da rede, como exemplo: o comprimento de uma tubulação, enquanto a segunda permite modificar este valor (ARANDIA; ECK, 2018).

Além de simulações hidráulicas, o *epanet2toolkit* aborda simulações de qualidade da água. Ambos os casos podem ser analisados passo a passo ou para período de tempo prolongado, porém a compatibilidade entre as funções deve ser respeitada (ARANDIA; ECK, 2018).

Segundo Arandia e Eck (2018), as funções do *Epanet2toolkit* podem ser utilizadas em conjunto com as disponíveis no R, desencadeando uma gama de aplicações dinâmicas, como a criação de sistemas de calibração definidos em um modelo de otimização ou elaboração de códigos para previsões de demandas através de simulações estocásticas. O pacote também contempla uma rede hidráulica denominada “Net1” que pode ser usada como protótipo em estudos e possui uma suíte de testes, acessível por meio da inserção do símbolo “?” antes do comando desejado (ARANDIA; ECK, 2018).

A simplicidade dos comandos, que são chamados através de funções únicas e vasta alternativa de interações disponíveis no pacote abrem um leque de expectativas para aplicação do *Epanet2toolkit* no sentido de pesquisas na área da hidráulica.

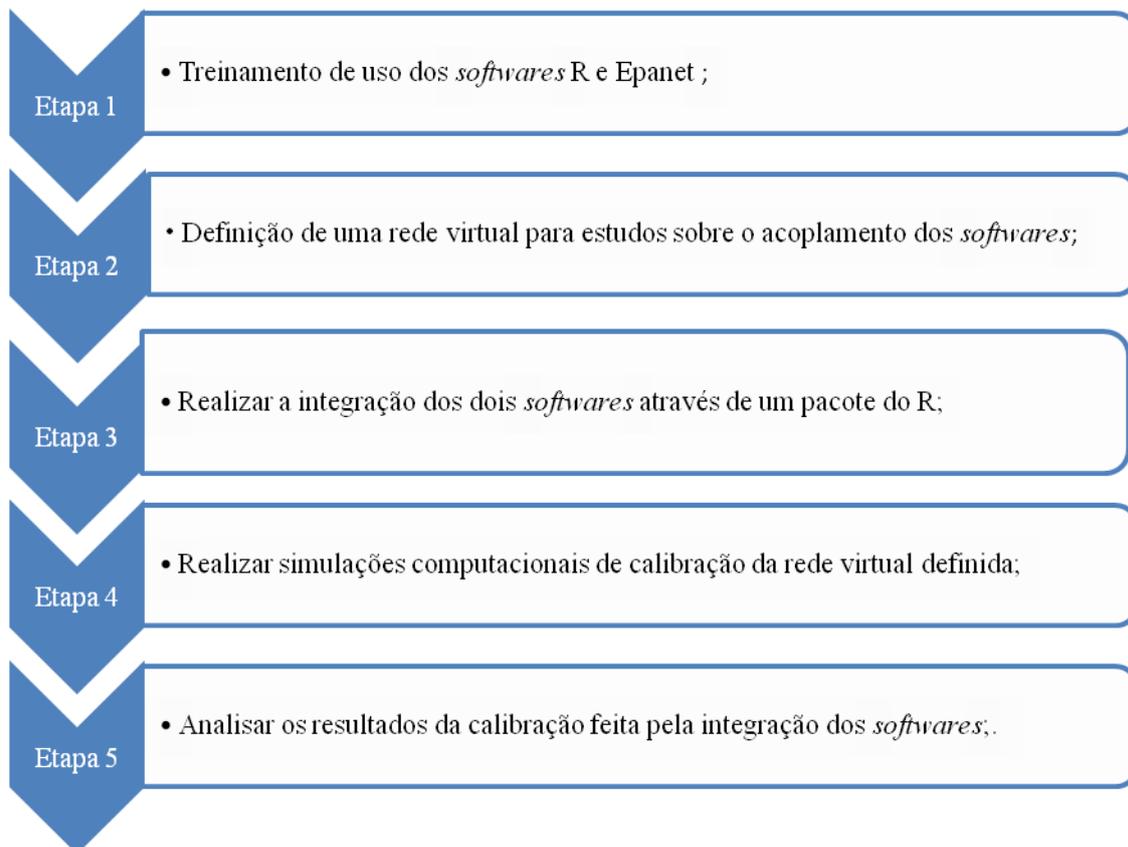
3.9 Calibração de redes de abastecimento de água com os softwares R e Epanet

Neste tópico será abordado o tema central da pesquisa, que é a calibração de redes de abastecimento de água utilizando os *softwares* Epanet e R. Infundáveis buscas sobre pesquisas nessa temática foram feitas, porém não foram encontradas na literatura pesquisas sobre calibração utilizando os *softwares* R e Epanet nas principais bases de busca de periódicos e repositórios de universidades. Este fato incentiva ainda mais a pesquisa.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada na pesquisa foi dividida em seis etapas, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma das etapas de metodologia do estudo



Fonte: o Autor (2021)

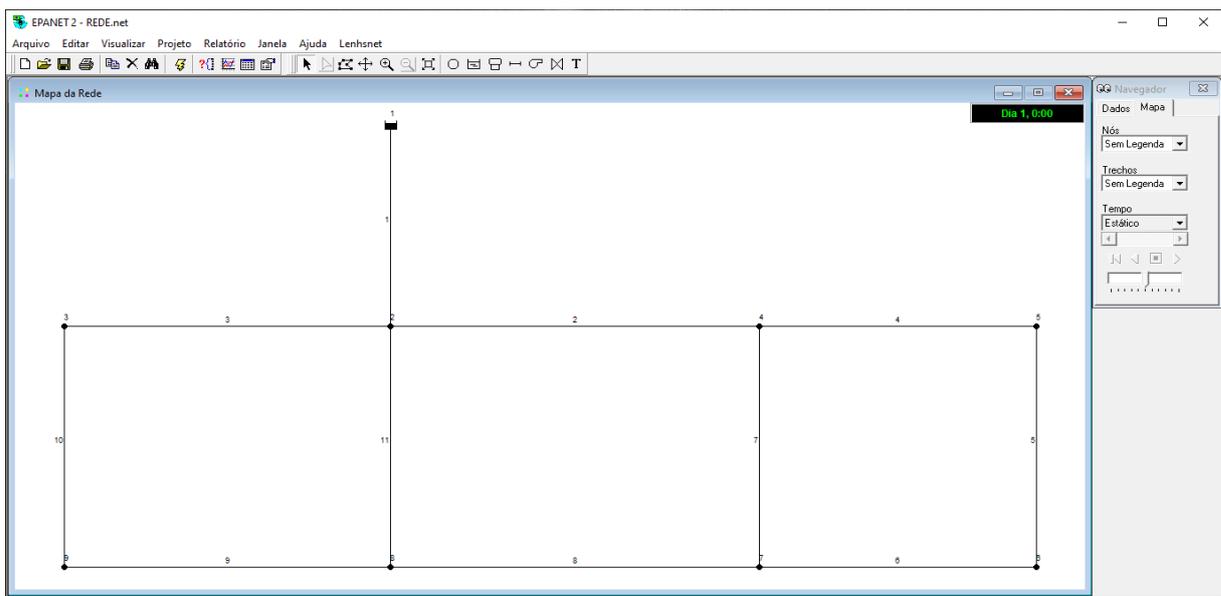
4.1 Etapa 1: Treinamento de uso dos softwares R e Epanet

A etapa um foi responsável pelo estudo do programa de simulação hidráulica EPANET bem como o estudo do *software* de análise estatística e gráfica, denominado R. Em primeiro estudou-se o *software* EPANET, ao qual foi feito o *download* da versão americana (2.2) do sítio eletrônico do (EPA) Environmental Protection Agency e instalado no sistema operacional Microsoft® Windows 10.

Após a instalação do Epanet, foi possível abrir a sua interface principal, dando início aos estudos aplicados ao mesmo. Utilizou-se do manual oficial do EPANET elaborado por ROSSMAN (2009) e do material obtido através do grupo de pesquisa NUMMARH (Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), para ampliação dos conhecimentos sobre o programa.

O *software* contempla diversas ferramentas que podem ser usadas em modelagens hidráulicas. Dentre elas, foram utilizadas neste estudo os procedimentos de: elaboração de traçados de rede (Figura 8), modificação da posição dos nós, estimativa de consumo base em cada nó, variação no diâmetro e rugosidade das tubulações, e inclusão de diferentes dados referentes aos reservatórios, visualização de tabelas e gráficos com as principais propriedades da rede desenhada.

Figura 8- Exemplo de traçado aleatório realizado na interface inicial do EPANET.

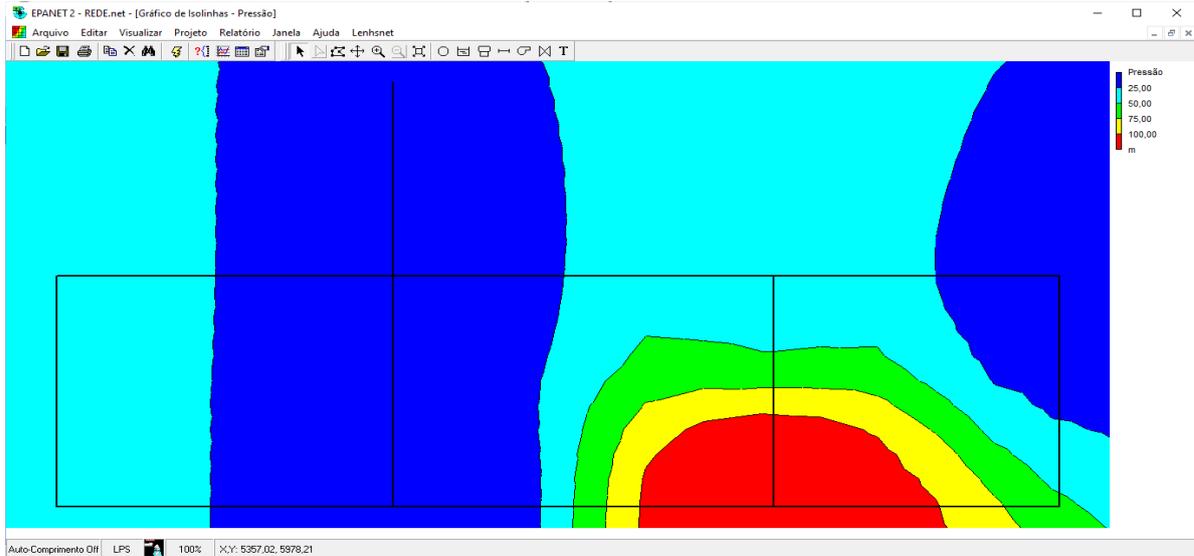


Fonte: o Autor (2021).

Pode-se observar o desenho de um traçado simples, contendo apenas um reservatório e seis nós subsequentes. Além do traçado foram inseridos valores de cotas dos nós e reservatório.

Depois da inserção dos parâmetros de entrada foi executada a simulação que calculou a cota piezométrica em cada nó e a velocidade nos trechos. Ressalta-se que a velocidade referente aos tubos foi obtida por meio de gráficos de isolinhas, tabela de dados e mapas coloridos conforme ilustrados a seguir nas Figuras 9, 10 e 11.

Figura 9 – Gráfico de isolinhas de pressão de rede aleatória



Fonte: o Autor (2021).

Figura 10 – Tabela com as informações dos nós da rede aleatória

Identificador do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Qualidade
Nó 2	960	2	0	2,00	969,02	9,02	0,00
Nó 3	930	1	0	1,00	966,94	36,94	0,00
Nó 4	920	1	0	1,00	965,89	45,89	0,00
Nó 9	930	1	0	1,00	966,21	36,21	0,00
Nó 8	960	2	0	2,00	966,15	6,15	0,00
Nó 7	850	1	0	1,00	965,63	115,63	0,00
Nó 5	950	1	0	1,00	965,32	15,32	0,00
Nó 6	950	1	0	1,00	965,31	15,31	0,00
RNF 1	1000	#N/A	0	-10,00	1000,00	0,00	0,00

Fonte: o Autor (2021).

Figura 11 – Tabela com as informações dos trechos da rede aleatória

Identificador do Trecho	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam	Coef.R.Parede	Vazão LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km	Fator de Atrito	Taxa de Reaçã mg/L/d	Qualidade	Estado
Tubulação 1	1000	100	100	0	0	10,00	1,27	30,98	0,038	0,00	0,00	Open
Tubulação 2	1000	100	100	0	0	2,90	0,37	3,13	0,045	0,00	0,00	Open
Tubulação 7	1000	100	100	0	0	0,75	0,10	0,26	0,055	0,00	0,00	Open
Tubulação 8	1000	100	100	0	0	-1,10	0,14	0,52	0,052	0,00	0,00	Open
Tubulação 9	1000	100	100	0	0	-0,33	0,04	0,06	0,062	0,00	0,00	Open
Tubulação 10	1000	100	100	0	0	-1,33	0,17	0,74	0,051	0,00	0,00	Open
Tubulação 3	1000	100	100	0	0	-2,33	0,30	2,08	0,047	0,00	0,00	Open
Tubulação 11	1000	100	100	0	0	-2,77	0,35	2,87	0,045	0,00	0,00	Open
Tubulação 4	1000	100	100	0	0	1,15	0,15	0,57	0,052	0,00	0,00	Open
Tubulação 5	1000	100	100	0	0	0,15	0,02	0,01	0,070	0,00	0,00	Open
Tubulação 6	1000	100	100	0	0	-0,85	0,11	0,32	0,054	0,00	0,00	Open

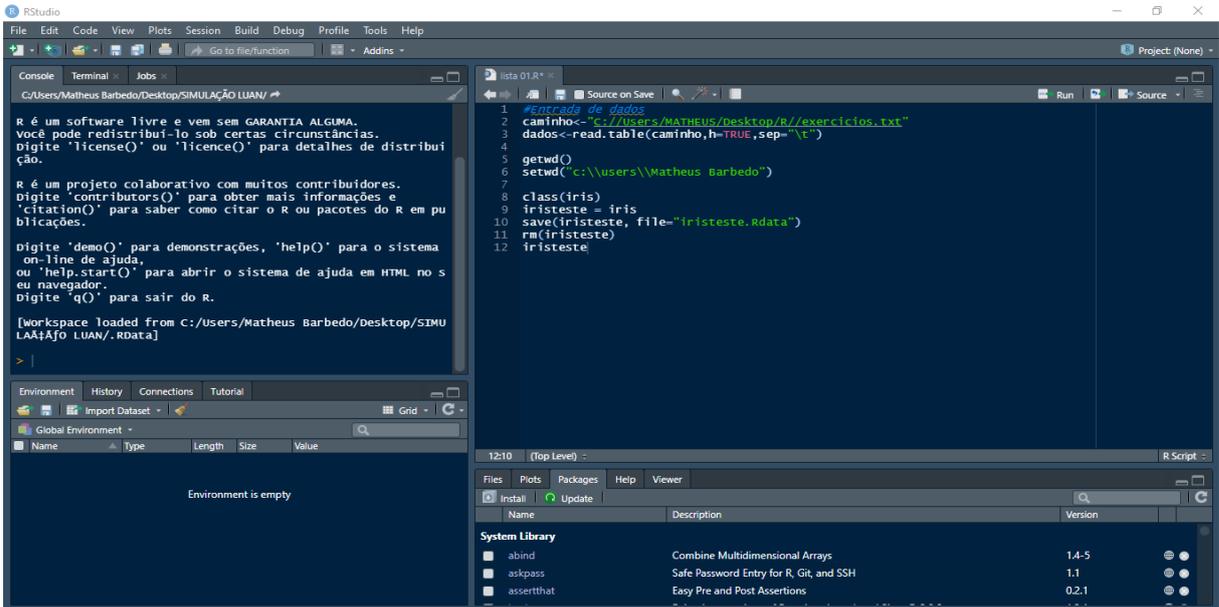
Fonte: o Autor (2021).

Por fim, utilizou-se das informações disponíveis nos materiais estudados para estabelecer novas simulações com adaptações mais complexas. Essa fase foi essencial para expandir o conhecimento sobre o programa EPANET, empregado no desenvolvimento deste estudo.

Em seguida, foi estudado o potencial da linguagem R e seu ambiente integrado para computação estatística (software) em um ambiente que pode ser usado para operações em linguagem R, o RStudio foi selecionado para pesquisa. O material utilizado para ampliar o conhecimento sobre as funções do software e da linguagem R foi a apostila "Ciência de dados com R: Introdução" de Oliveira et al. (2018) vinculado ao Instituto de Pesquisa e Análise de Dados (IBPAD). A apostila apresenta os conhecimentos teóricos da linguagem R e, através de exercícios práticos, permite o desenvolvimento de conceitos de programação, nomeadamente: leitura e operação de dados, ligação e escrita de comandos, obtenção de informação virtual e geração de gráficos.

Foi feito o download do RStudio na sua versão gratuita na sessão de download do sitio eletrônico do desenvolvedor e após a instalação iniciou-se os estudos aplicados ao mesmo. Além disso, esta etapa foi responsável pela conquista da familiaridade com a utilização de pacotes adicionais disponíveis na comunidade R. A Figura 12 ilustra a interface principal do RStudio, onde foram executadas as sequências de comandos e realizados os exercícios práticos.

Figura 12 - Interface principal do RStudio executada nos exercícios práticos.

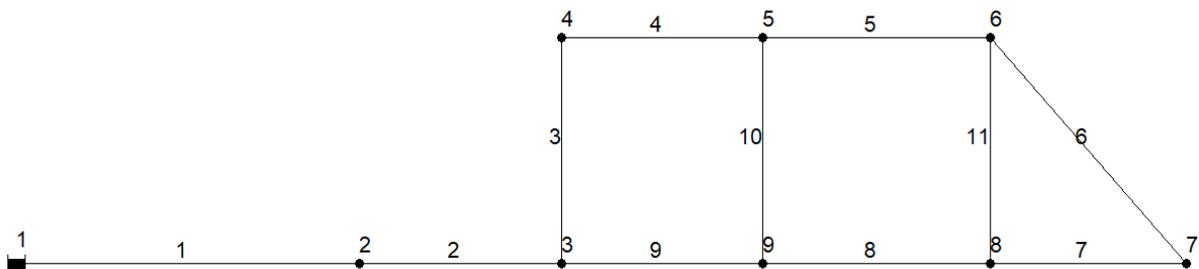


Fonte: o Autor (2021).

4.2 Etapa 2: Definição da rede virtual para o acoplamento dos softwares

Na segunda etapa, foi elaborada a rede teórica do trabalho pelo programa EPANET. O primeiro passo foi desenhar a rede teórica no EPANET. No total a rede possui um reservatório, oito nós e onze trechos de tubulação, que foram numerados sequencialmente conforme o desenvolvimento do traçado conforme a figura 13. As coordenadas de cada nó foram arredondadas para números inteiros, visando o alinhamento das tubulações.

Figura 13 – Ilustração do traçado da rede proposta para o estudo.



Fonte: o Autor (2021)

O intuito desta etapa foi elaborar uma rede teórica (fictícia) o mais próximo possível de uma rede real. As redes reais no Brasil, mais especificamente no estado de Minas Gerais, que possui topografia acidentada, tem como características pressões baixas e altas. A rede proposta foi desenhada com diâmetros no intervalo de 50 até 200 mm que são os mais comuns em redes brasileiras e contou com um reservatório de nível final, oito nós e 11 trechos de tubulação, sendo considerada de pequeno porte, pois o seu propósito foi verificar a eficiência da calibração utilizando os dois *softwares*. As cotas de elevação dos nós e reservatório definidas de forma a simular um escoamento da esquerda para direita (traçado). Deste modo, pode-se dizer que os primeiros nós possuem valores de cotas do terreno superiores aos últimos, conforme demonstra o quadro 2. Basicamente estes números foram reduzidos parcialmente conforme o decorrer do traçado, Também foi definido o consumo base em cada nó para seja possível obter dados de vazão no projeto. Com o intuito de trabalhar com pressões próximas da realidade, foram modificados os valores mais sensíveis a pressão como a cota e o consumo base, de maneira que a pressão nos nós variasse de 15 mca até 90 mca.

Quadro 2 - Valores estabelecidos para cotas (metros) e consumo-base (Litro/segundo) do reservatório e nós.

Identificador do nó	Cota (m)	Consumo Base (L/s)
Reservatório 1	940	-18,00
Nó 2	900	2,00
Nó 3	891	4,00
Nó 4	865	2,00
Nó 5	865	1,00
Nó 6	830	1,00
Nó 7	784	1,00
Nó 8	850	6,00
Nó 9	850	1,00

Fonte: o Autor (2021).

O quadro 3 demonstra os valores estabelecidos para os parâmetros das tubulações. A segunda fase consistiu na inserção dos parâmetros dos tubos. O material escolhido para quase toda a tubulação foi o plástico PVC, que segundo Porto (2006) possui coeficiente de rugosidade de Hazen Willians equivalente a 150. O PVC foi escolhido pois trata-se de um material

eficiente, com boa resistência e que reduz significativamente os custos do projeto da rede. O comprimento dos trechos e seus respectivos diâmetros também foram estimados de forma a simular uma rede real. As tubulações próximas ao reservatório tendem a abastecer todo o restante do traçado, por este motivo foram adotados diâmetros maiores à montante (parte esquerda do traçado) comparados com os diâmetros a jusante (parte direita do desenho).

Quadro 3 - Comprimento (metros), diâmetro (milímetro) e rugosidade das tubulações.

Identificador do trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade
Tubulação 1	1000	150	150
Tubulação 2	800	100	150
Tubulação 3	1000	75	150
Tubulação 4	1000	100	150
Tubulação 5	1000	100	150
Tubulação 6	700	50	150
Tubulação 7	900	50	150
Tubulação 8	800	75	150
Tubulação 9	800	75	150
Tubulação 10	1000	150	150
Tubulação 11	1000	75	150

Fonte: o Autor (2021)

Depois de definir os parâmetros de entrada foi realizado a simulação hidráulica para o período de tempo estático e foi verificado se os valores obtidos para velocidade e vazão nas tubulações estavam condizentes com o pressuposto. Por fim, foi gerado um gráfico com as pressões referentes aos nós, encerrando a etapa de proposição da rede teórica.

4.3 Etapa 3: Acoplamento dos dois softwares através de um pacote do R aplicado a rede proposta

Na terceira etapa foi realizado o acoplamento entre o EPANET e o R para a rede proposta. Para isto, utilizou-se o trabalho An R Package for EPANET simulations, escrito por Arandia e Eck (2018) para absorção dos conhecimentos sobre a utilização do pacote epanet2toolkit, desenvolvido para reconhecer o EPANET em plataforma RStudio.

Segundo Arandia e Eck (2018) o epanet2toolkit foi projetado como um invólucro para o EPANET, ou seja, suas funções no R possuem o mesmo nome que as funções no EPANET quando solicitado pelo API (interface de programação de aplicativos) do Microsoft® Windows, mas divergem em contextos de função e parâmetros de retorno.

O mecanismo de funcionamento é igual para todas as funções: basicamente o pacote exporta as funções do EPANET API para o programa R, efetua a análise dos argumentos, verifica os códigos de erros e retorna o valor requisitado (ARANDIA; ECK, 2018).

O `epanet2toolkit` precisar ser instalado na biblioteca do R para que o usuário desfrute de suas funções, para isto ocorrer basta acionar a função `install.packages`, original do programa. Depois de instalado é necessário executar a função `library` para carregá-lo da biblioteca em todas as vezes em que houver uma nova inicialização do R.

A variedade de funções no pacote exige a interação entre os programas, como no caso da função `ENepanet` - utilizada para rodar uma simulação hidráulica completa e escrever os resultados em um arquivo de relatório (`.rpt`) - necessita-se de um arquivo de entrada no formato `“.inp”` gerado pelo EPANET (ARANDIA; ECK, 2018).

Segundo Arandia e Eck (2018) o primeiro passo para acessar ou mudar as propriedades da rede hidráulica é inicializar o código a com função que ativa o motor para leitura de arquivos EPANET, denominada `ENopen`, ressalta-se que depois de realizado as interações desejadas, o sistema deve ser encerrado através da função `ENClose`

As funções `ENget*` e `ENset*` possuem grande importância para desenvolver estudo das redes e geralmente são utilizadas em conjunto. Basicamente a primeira tem como intuito retornar o valor de algum parâmetro da rede, como exemplo: o comprimento de uma tubulação, enquanto a segunda permite modificar este valor (ARANDIA; ECK, 2018).

Além de simulações hidráulicas o `epanet2toolkit` aborda simulações de qualidade da água, ambos os casos podem ser analisados de forma passo a passo ou para período de tempo prolongado, porém a compatibilidade entre as funções deve ser respeitada (ARANDIA; ECK, 2018).

Segundo Arandia e Eck (2018) as funções do `epanet2toolkit` podem ser utilizadas em conjunto com as disponíveis no R, desencadeando uma gama de aplicações dinâmicas, como a criação de sistemas de calibração definidos em um modelo de otimização ou elaboração de códigos para previsões de demandas através de simulações estocásticas. O pacote também contempla uma rede hidráulica denominada `“Net1”` que pode ser usada como protótipo em estudos e possui uma suíte de testes, acessível por meio da inserção do símbolo `“?”` antes do comando desejado (ARANDIA; ECK, 2018).

A simplicidade dos comandos, que são invocados através de funções únicas e vasta alternativa de interações disponíveis no pacote abrem um leque de expectativas para aplicação do epanet2toolkit no contexto de estudos hidráulicos. O quadro 4 abrange resumidamente todas as funções provenientes do epanet2toolkit.

Quadro 4 - Descrição resumida das funções do pacote *epanet2toolkit*.

Função	Descrição
<i>Simulação completa</i>	
ENepanet()	Carrega uma simulação completa.
<i>Para abrir e fechar mecanismo do EPANET</i>	
ENopen()	Abre o mecanismo do EPANET.
ENclose()	Fecha o mecanismo do EPANET.
<i>Para simulação de período prolongado</i>	
ENSolveH()	Executa a simulação hidráulica.
ENSolveQ()	Executa a simulação de qualidade de água.
<i>Para simulação hidráulica passo a passo</i>	
ENopenH()	Carrega o sistema hidráulico analítico.
ENinitH()	Inicializa o sistema antes da simulação.
ENrunH()	Executa uma análise hidráulica de período único.
ENnextH()	Período de tempo até o próximo evento hidráulico.
ENcloseH()	Fecha o sistema hidráulico analítico.
<i>Simulação da qualidade de água (QA) passo a passo</i>	
ENopenQ()	Configura para análise de QA.
ENinitQ()	Inicializa análise QA.
ENrunQ()	Calcula os resultados de QA no atual momento.

ENnextQ()	Avança a simulação de QA para o próximo período de tempo hidráulico.
ENstepQ()	Avança a simulação de QA uma etapa de tempo.
ENcloseQ()	Fecha a análise de QA.
<i>Escrevendo em arquivos</i>	
ENsaveH()	Salve o resultado hidráulico em arquivo binário.
ENsaveinfile()	Salve os dados atuais em arquivo .inp
ENreport()	Escreve o relatório da simulação em arquivo de texto.
<i>Recuperando e configurando valores de parâmetros</i>	
ENget*()	Funções que recuperam informações da rede.
ENset*()	Funções que definem valores de parâmetros de rede.

Fonte: Adaptado de ARANDIA e ECK (2018).

A instalação foi realizada a partir do comando `install.packages` e o repositório utilizado para baixar o pacote foi o Revolution Analytics. Depois de instalado o pacote ficou salvo na memória do RStudio, o que possibilitou carregá-lo sempre que houve uma nova inicialização do programa.

Depois de instalado foi possível usufruir das funções disponíveis no pacote `epanet2toolkit`, obtidas a partir do material de Arandia e Eck (2018), para manipular redes hidráulicas elaboradas no EPANET no ambiente de desenvolvimento integrado RStudio.

4.4 Etapa 4 : Simulações computacionais de calibração da rede virtual definida

Calibrar um modelo hidráulico é uma tarefa desafiadora porque considera a participação de um grande número de parâmetros incertos.

No trabalho com o acoplamento do software R e Epanet, os dados hidráulicos são gerados a partir do Epanet e o R será usado para tratar as informações e processar, ao qual Será a rede será calibrada ajustando o coeficiente de rugosidade C.

Como a rede usada é uma rede teórica (adotaremos os valores reais sendo os valores simulados no Epanet) e posteriormente serão comparados com os valores gerados a cada simulação no RStudio.

Será avaliada a comparação entre valores medidos e simulados a partir de uma função objetivo, que efetuará a diferença entre os valores medidos e simulados, e quando atingir o valor mais próximo do simulado no Epanet, a rugosidade será dita calibrada.

4.5 Etapa 5: Análise dos resultados da calibração feita pelo acoplamento dos softwares

Para avaliar os resultados da calibração, são normalmente estabelecidos critérios que dependem do método de calibração a ser empregado. Nesta caso serão estabelecidos critérios para comparação das variáveis de estado e decisão de modo a verificar se a associação das ferramentas foi feita de maneira adequada que serão baseados nos critérios estabelecidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989), para os valores de pressão, o erro absoluto, que é a diferença entre o valor calibrado e o observado, deve estar dentro das seguintes faixas:

- ± 0.5 m para 85% das medidas de pressão;
- ± 0.75 m para 95% das medidas de pressão;
- ± 2.0 m para 100% das medidas de pressão;

As potencialidades do R são muitas, entretanto serão fixados limites que indicarão a eficiência do uso dos dois softwares associados.

5. RESULTADOS

5.1 Algoritmo de calibração de rede de distribuição com o R e Epanet

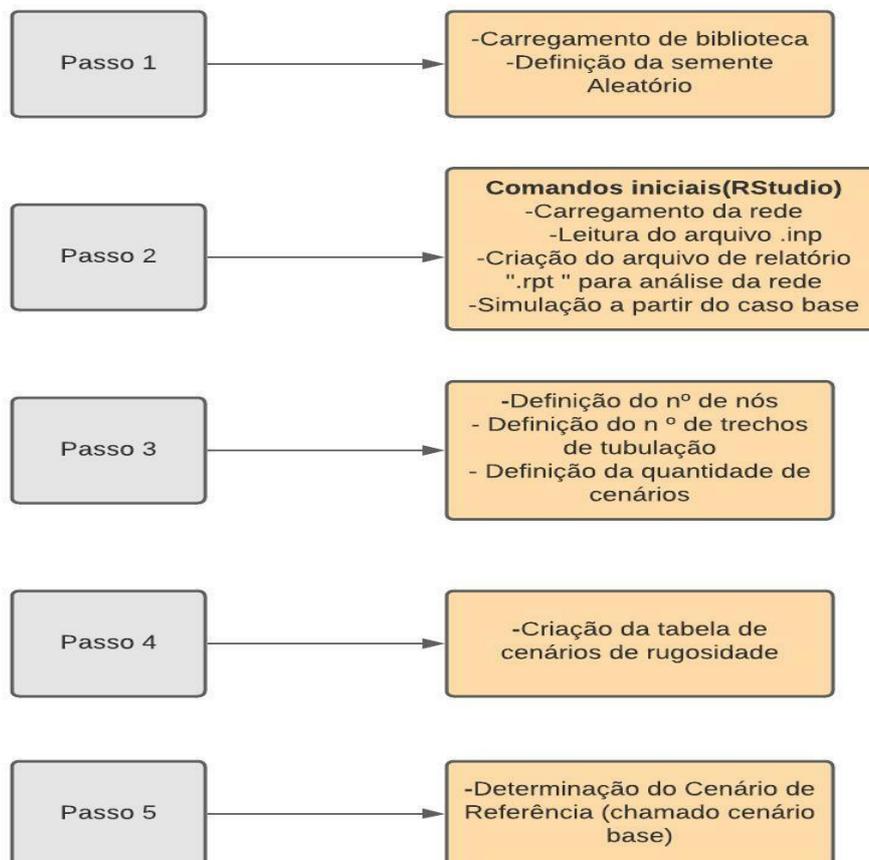
5.1.1 Descrição geral das etapas do algoritmo

Foi aplicado o acoplamento entre os programas diretamente na rede teórica proposta na etapa 2, que foi salva no formato de texto denominado “. inp” , para realizar o acoplamento e as simulações de calibração.

Depois de fixados os diâmetros, o parâmetro mais sensível para se alterar as pressões da rede é a rugosidade, devido a este fato foi decidido gerar cenários aleatórios de rugosidade para alterar a pressão.

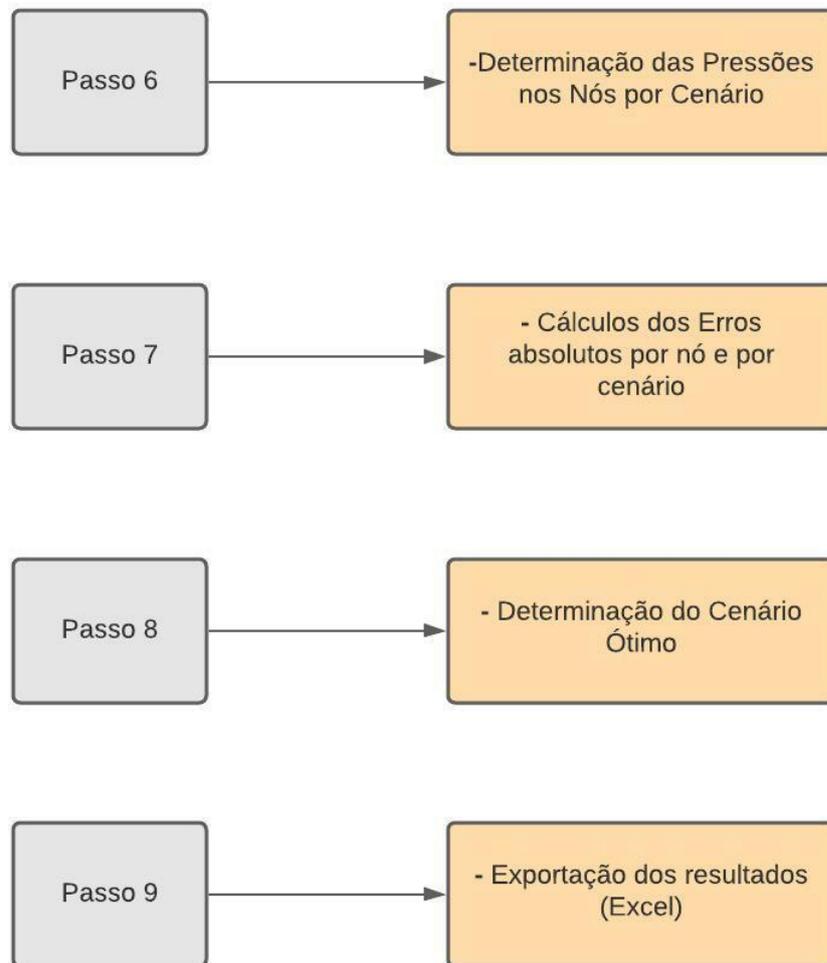
A aplicação foi dividida em 9 passos conforme ilustram as Figuras 14 e 15

Figura 14 - Passos 1,2,3,4 e 5 realizados na presente etapa.



Fonte: o Autor (2021)

Figura 15 - Passos 6,7,8 e 9 realizados na presente etapa.



Fonte: o Autor (2021)

Passo 1 : O primeiro passo foi exportar o arquivo da rede no EPANET em formato de tabela de dados (“.inp”), para ser reconhecido pela plataforma R. O modelo foi armazenado com o nome de “rededezembro21.inp”. Em seguida foi carregado o pacote “magrittr” de análise real e foi executado o comando “set.seed” que faz com que todos consigam reproduzir os mesmos valores aleatórios para gerar o coeficiente de rugosidade da fórmula de Hazen Williams de 100 até 150, que foram gerados na pesquisa.

Passo 2 : O segundo passo constituiu no carregamento de uma simulação completa através do comando “ENepanet” , comando que cria o arquivo “.rpt;” através do arquivo “.inp” que foi exportado do Epanet.O arquivo rpt .Os arquivos .inp são caracterizados como arquivos de dados e já os .rpt são arquivos de relatório de um projeto. Em seguida foi acionado o comando ENSolveH que executa uma simulação hidráulica e com isso foram gerados os valores de pressão base, que é a pressão da primeira simulação no Epanet, que foi adotada como a “pressão de referência”.

Passo 3 : O passo três constituiu na definição do número de nós da rede virtual que ao todo são 09 nós e o reservatório , bem como o número de tubulações da rede (trechos) que são 11 e por fim foram adotados 10000 testes (cenários) para a calibração.

Passo 4 : Um *data frame* é semelhante a uma matriz mas as suas colunas têm nomes e podem conter dados de tipo diferente, como números, letras, vetores, etc. O passo quatro consistiu na criação do *data frame* “tabela_cenários”. Foram criados 10000 rugosidades aleatórias para cada trecho, dentro da faixa estipulada do valor da rugosidade de 100 a 150 dos 11 trechos da rede, pois cada trecho de tubulação tem uma rugosidade diferente.

Passo 5 : No passo 5 foi criado o *data.frame* “pressao_base”, com os valores de pressão do cenário de referência, também chamado cenário base que é o cenário da simulação da simulação da rede no Epanet, com o intuito de ser comparado com os 10000 cenários propostos.

Passo 6 : No passo 6 foi criado o *data frame* “pressão_cenarios” ao qual através da comunicação do R com o epanet foram geradas as pressões nos 8 nós da rede com as 10000 rugosidades aleatórias que foram geradas. Portanto, foram gerados 80.000 valores de pressão com o intuito de serem comparados com os valores de pressão fornecidos da simulação da rede no Epanet.

Passo 7 : No passo 7 foram criados os *data.frames* do “erro_absoluto_por_no” e “erro_absoluto_por_cenario” em módulo, pois nos resultados foram gerados alguns valores de pressão negativa. O erro consiste na diferença entre o valor de pressão que foi simulado no Epanet(cenário base) e no valor que foi gerado para comparação. É chamado erro absoluto de um resultado medido ou calculado à diferença entre esse resultado e o valor verdadeiro da grandeza. O erro absoluto foi escolhido pela capacidade de considerar o erro de cada nó e cada cenário individualmente e calculou a diferença de pressão em cada nó e já o erro absoluto por cenário calculou a diferença de pressão em todos os nós da rede.

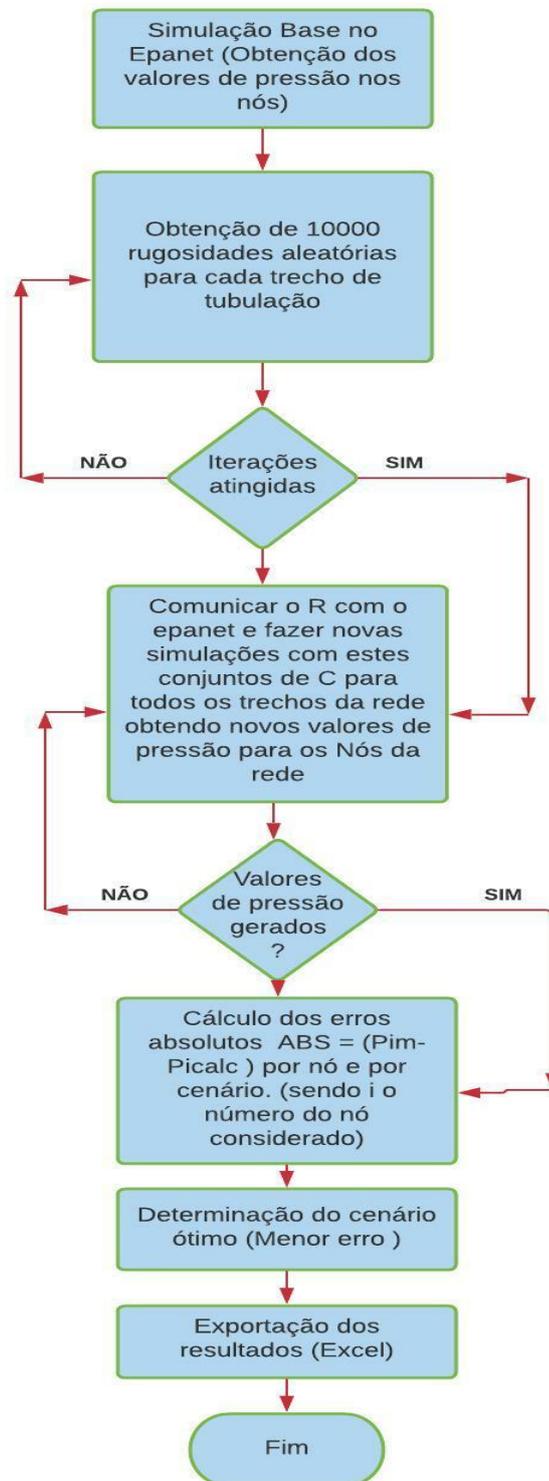
Passo 8 : No passo 8 foi criado o *data.frame* do cenário ótimo. Dentre os 10.000 cenários de rugosidades para as 11 tubulações geradas aleatoriamente, calculou-se o erro em todos os 10000 cenários (diferença entre a pressão base e a pressão com as rugosidades aleatórias) , e o cenário das rugosidades que possuiu o menor erro foi considerado o cenário ótimo. Com a geração do cenário ótimo foi geranda a calibração da rede virtual proposta.

Passo 9 : Por fim, no passo 9 foram exportados para o Excel no formado .xlsx os *data.frame* que foram criados nos passos 4, 5,6,7 e 8.

5.1.2 Descrição específica da operacionalização do Algoritmo

A Figura 16 ilustra a dinâmica de operacionalização do Algoritmo de calibração. O algoritmo é formado basicamente geração dos valores de pressão do cenário base e em seguida a sub-rotina (sequência de instruções do programa que executa uma tarefa específica) e por fim os resultados são exportados para o excel no formato .xlsx.

Figura 16 - Fluxograma do algoritmo de calibração



O processo se inicia com a simulação base feita na rede fictícia proposta em termos de pressões nos nós no *Software* Epanet. Estes resultados serviram de base para o início dos trabalhos e representam, por analogia, os valores que seriam medidos em campo, a partir de rugosidades que seriam as reais.

A partir daí são perturbadas as rugosidades em 10000 inicialmente representadas por novas iterações. Este procedimento foi realizado no *Software* R após feito o acoplamento entre o *Software* R e o Epanet. A faixa escolhida do coeficiente de rugosidade de Hazen Williams foi entre 110 e 150 pois as tubulações de Pvc com algum tempo de uso possuem coeficiente de rugosidade de Hazen Williams nessa faixa.

Geradas as rugosidades no *Software* R, estas foram enviadas para o Epanet pelo qual calcularam-se os novos valores de pressões relativos às novas rugosidades geradas para cada trecho da rede para um dos 10000 cenários iniciais.

Cada valor de pressão nova obtida é comparada com a pressão neste mesmo nó tendo como referência a simulação de base. Estes erros podem ser calculados por nós ou pela somatória de nós.

A partir das simulações foram obtidos os melhores cenários, relativos as pressões comparadas entre pressões geradas para determinado conjunto de rugosidades e a pressão base da rede fictícia. Na Figura 16 a seguir será apresentado o fluxograma do algoritmo de calibração.

De acordo com Santos (2016) um modelo é considerado calibrado quando o mesmo não produz um erro superior ao admissível. Neste sentido, o fluxograma anterior apresentou um algoritmo que utilizou símbolos gráficos para representar o raciocínio lógico a ser seguido para a resolução do problema proposto que é a calibração da rede proposta. Como primeiro passo, a rede foi desenhada no Epanet e, em seguida, foram obtidos os valores de pressão base fornecidos pelo *software*. Inicialmente trabalhou-se com 1.000 iterações (cenários de rugosidades aleatórias). No entanto foi verificado que o erro ficou consideravelmente alto, decidindo-se assim por 10.000 iterações.

Após as iterações atingidas foi criado um looping (estrutura de repetição) para o R armazenar os valores das rugosidades das tubulações e gerar novas pressões nos nós para cada cenário (ao todo 10.000).

Depois de gerados valores de pressão nos nós, os valores foram comparados com o valor da pressão base e foram geradas as tabelas com os resultados.

5.2 Aplicação do algoritmo a rede fictícia

Os resultados correspondentes a pressão dos nós obtidos através da primeira simulação da rede fictícia no Epanet foram organizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Pressão nos nós da rede virtual

Nó	Pressão (mca)
Reservatório	0
2	33,98
3	15,05
4	21,21
5	19,08
6	51,99
7	90,77
8	24,04
9	34,87

Fonte: o Autor (2021)

Figura 17 - Tabela com as informações dos trechos da rede virtual

EPANET 2 - rede para defesa.inp - [Tabela da Rede - Trechos]

Arquivo Editar Visualizar Projeto Relatório Janela Ajuda Lenhsnet

Identificador do Trecho	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.E.scoam	Coef.R.Parede	Vazão LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km	Fator de Atrito	Taxa de Reaçã mg/L/d	Qualidade	Estado
Tubulação 4	1000	100	150	0	0	-3.53	0,45	2,13	0,021	0,00	0,00	Open
Tubulação 5	1000	100	150	0	0	3,50	0,45	2,09	0,021	0,00	0,00	Open
Tubulação 3	1000	75	150	0	0	-5,53	1,25	19,84	0,019	0,00	0,00	Open
Tubulação 9	800	75	150	0	0	6,47	1,46	26,48	0,018	0,00	0,00	Open
Tubulação 8	800	75	150	0	0	4,50	1,02	13,53	0,019	0,00	0,00	Open
Tubulação 7	900	50	150	0	0	-0,34	0,17	0,81	0,027	0,00	0,00	Open
Tubulação 6	700	50	150	0	0	-1,34	0,68	10,31	0,022	0,00	0,00	Open
Tubulação 10	1000	75	150	0	0	0,97	0,22	0,78	0,024	0,00	0,00	Open
Tubulação 11	1000	50	150	0	0	-1,16	0,59	7,95	0,022	0,00	0,00	Open
Tubulação 1	1000	150	150	0	0	18,00	1,02	6,02	0,017	0,00	0,00	Open
Tubulação 2	800	100	150	0	0	16,00	2,04	34,91	0,017	0,00	0,00	Open

Fonte: o Autor (2021)

Figura 18 - Tabela com as informações dos nós da rede virtual

EPANET 2 - rede para defesa.inp - [Tabela da Rede - Nós]

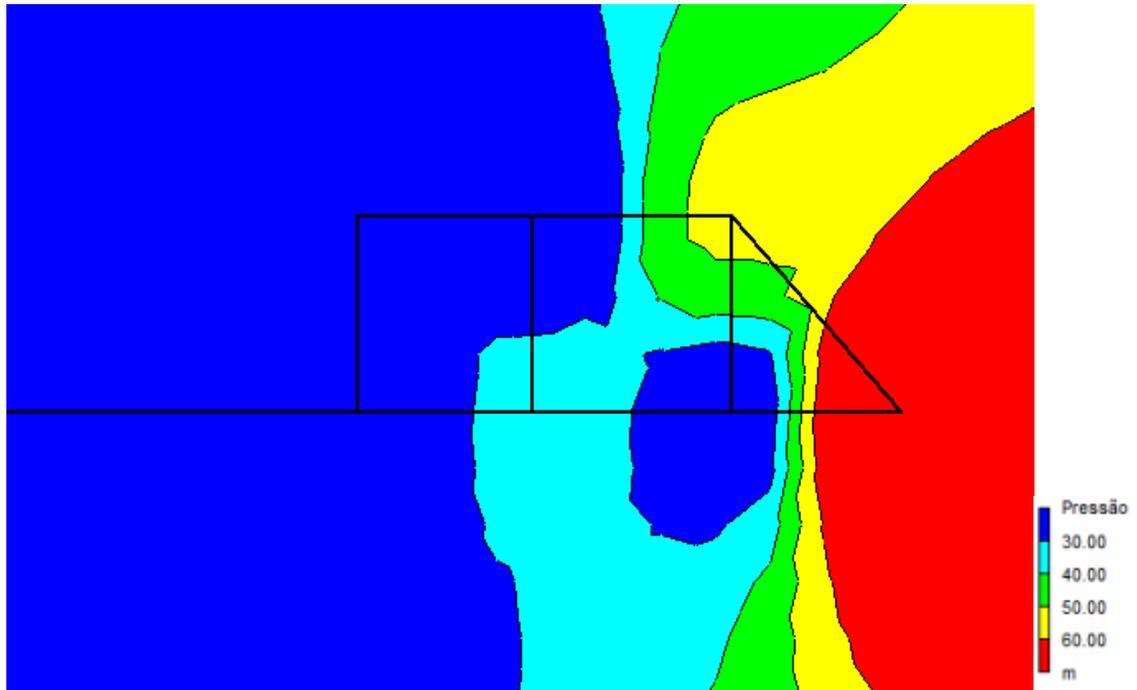
Arquivo Editar Visualizar Projeto Relatório Janela Ajuda Lenhsnet

Identificador do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Qualidade
Nó 5	865	1	0	1,00	884,08	19,08	0,00
Nó 6	830	1	0	1,00	881,99	51,99	0,00
Nó 4	865	2	0	2,00	886,21	21,21	0,00
Nó 3	891	04	0	4,00	906,05	15,05	0,00
Nó 9	850	1	0	1,00	884,87	34,87	0,00
Nó 8	850	6	0	6,00	874,04	24,04	0,00
Nó 7	784	1	0	1,00	874,77	90,77	0,00
Nó 2	900	2	0	2,00	933,98	33,98	0,00
RNF 1	940	#N/A	0	-18,00	940,00	0,00	0,00

Fonte: o Autor (2021)

A Figura 19 ilustra o gráfico de isolinhas referente a pressão resultante em cada nó da rede, gerado pelo EPANET após a simulação hidráulica. É possível perceber que os nós situados no início da rede (parte esquerda do desenho) possuem pressão inferior aos da direita. Situação plausível e similar a uma rede real em declive, em que a medida que nos afastamos do reservatório temos valores inferiores de cota do terreno, o que gera, simultaneamente, elevação de pressão nos nós

Figura 19 - Gráfico de isolinhas de pressão referente aos nós da rede.

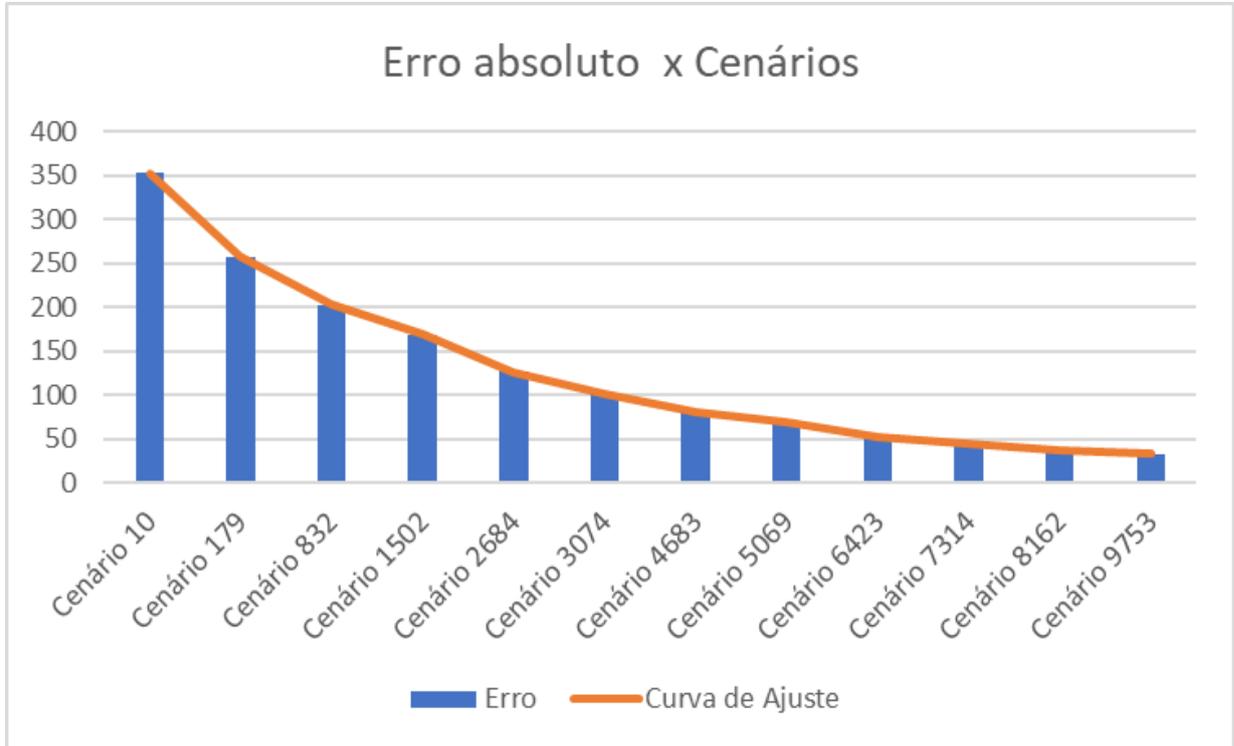


Fonte: o Autor (2021)

5.2.1 Análise dos dados

A figura 20 ilustra o gráfico do erro absoluto em função dos cenários. Os resultados evidenciam que do cenário 10 até o 5069 o erro teve uma queda significativa. Após o cenário 5069 o erro continua a abaixar porém de forma discreta, com valor mínimo na iteração 9753.

Figura 20 – Erro absoluto por cenário



Fonte: o Autor (2021)

O gráfico de dispersão mostra que o erro absoluto (diferença entre a pressão medida e a simulada) oscilou entre 352 e 32 mca.

As figuras 21 a 32 serão ilustrados os gráficos das Rugosidades aleatórias dos cenários 10,179,832,1502,2684,3074,4683,5069,6423,7314,8162 e 9753.

Figura 21 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 10

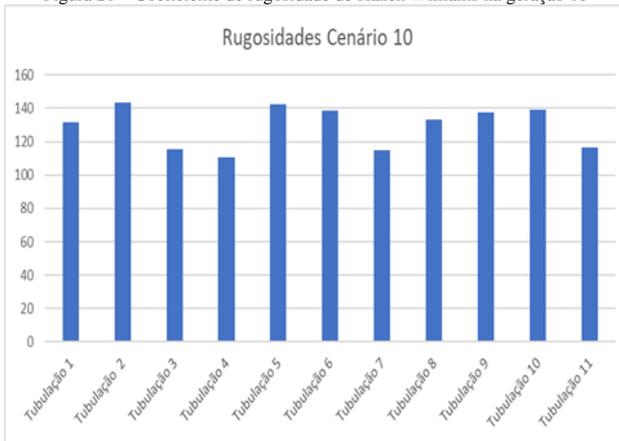


Figura 22 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 179

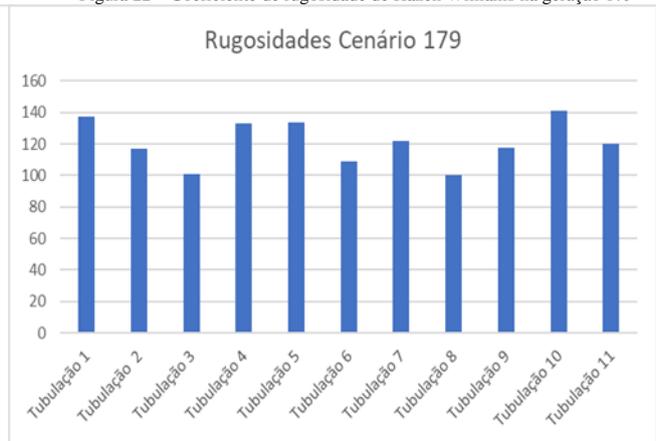


Figura 23 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 832

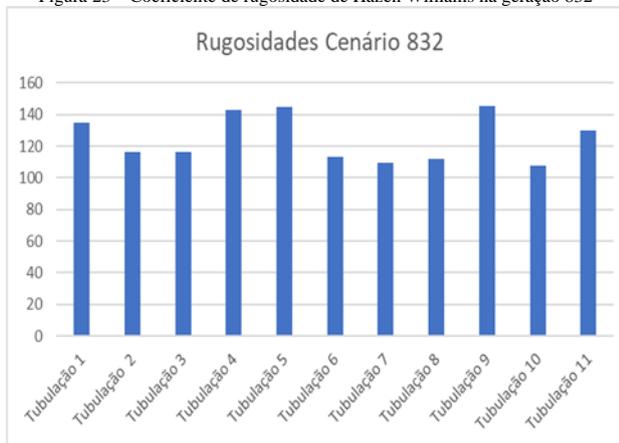


Figura 24 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 1502

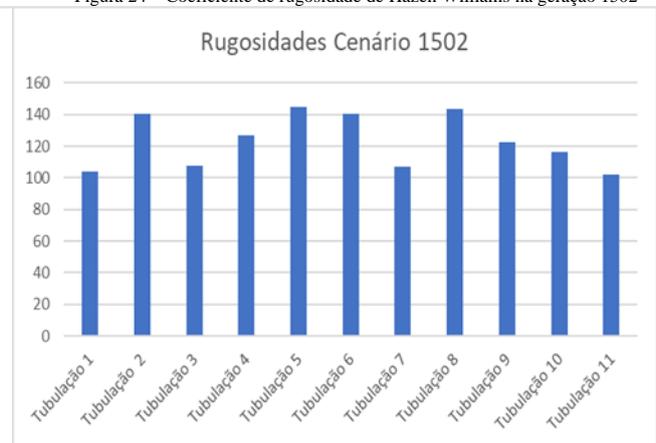


Figura 25 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 2684

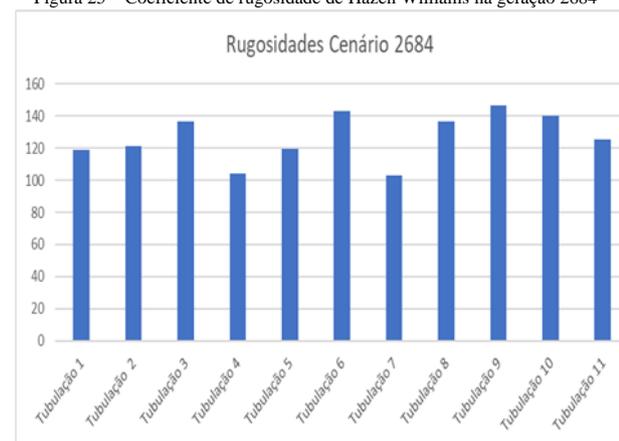
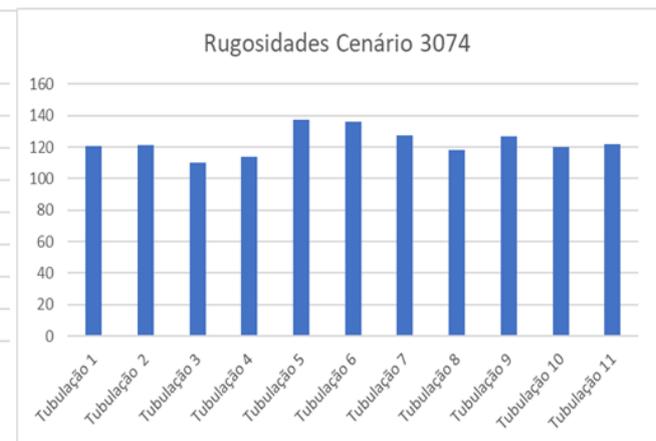


Figura 26 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 3074



Fonte: o Autor (2021)

Figura 27 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 4683

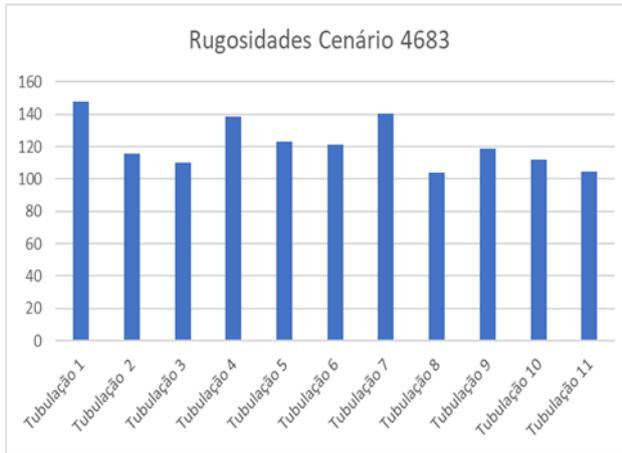


Figura 28 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 5069

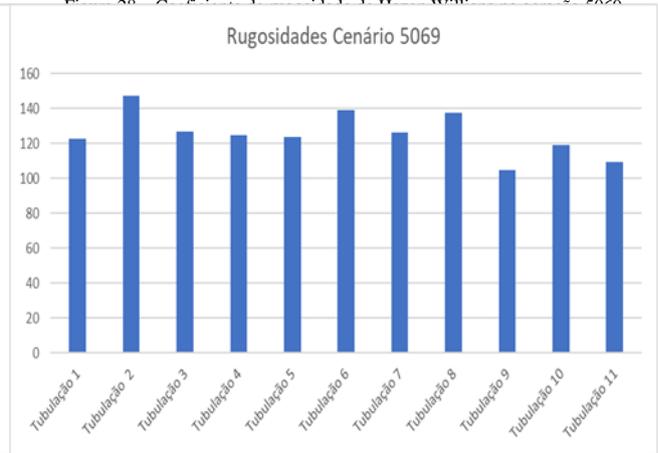


Figura 29 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 6423

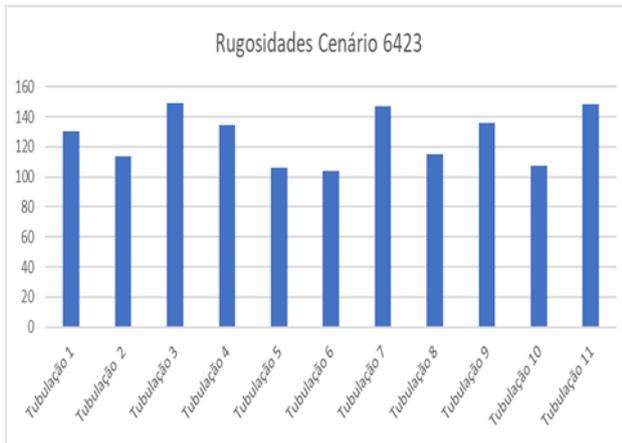


Figura 30 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 7314

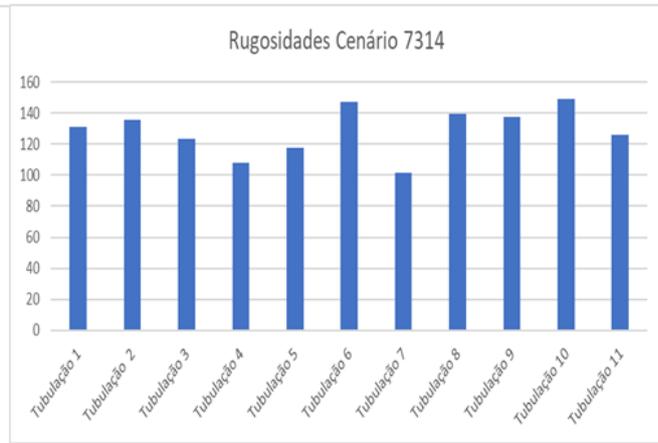


Figura 31 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 8162

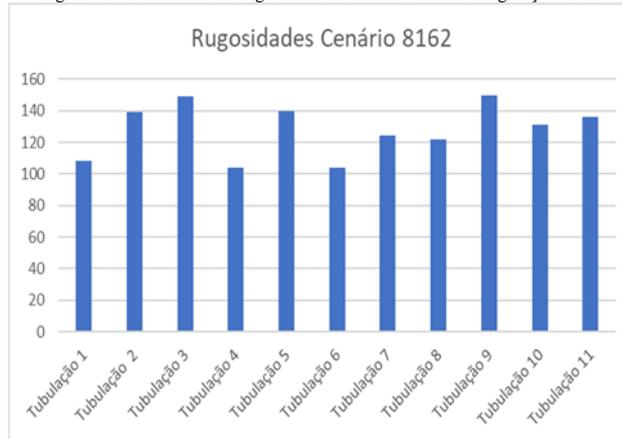
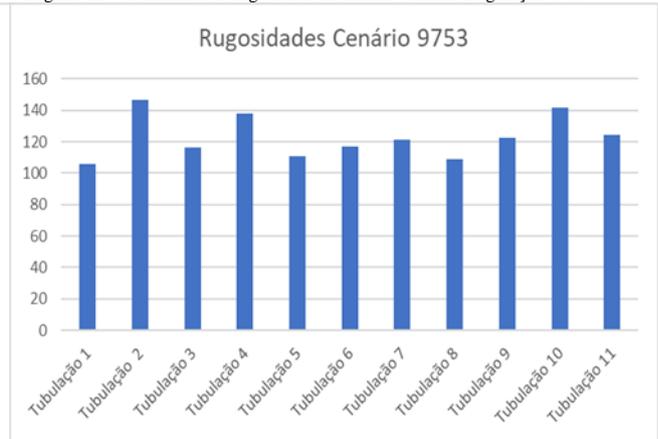
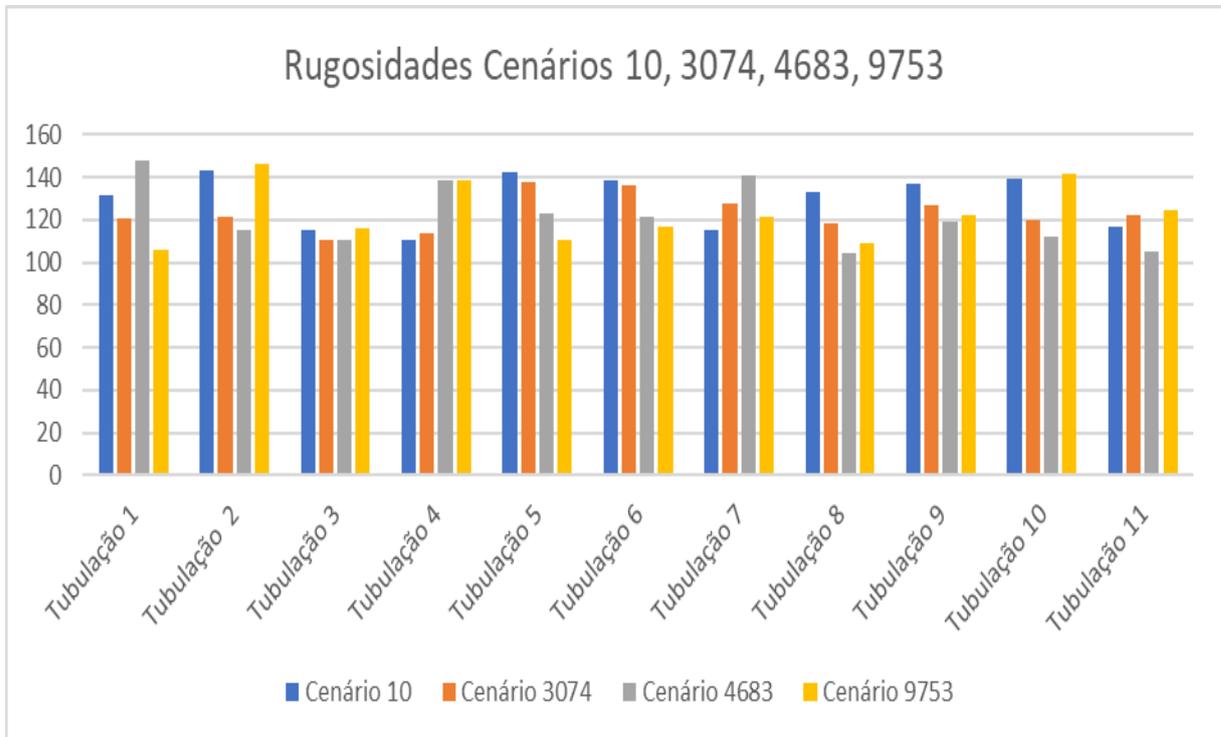


Figura 32 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Williams na geração 9753



Fonte: o Autor (2021)

Figura 33 – Coeficiente de rugosidade de Hazen Willians nas gerações 10,3074,4683 e 9753



Fonte: o Autor (2021)

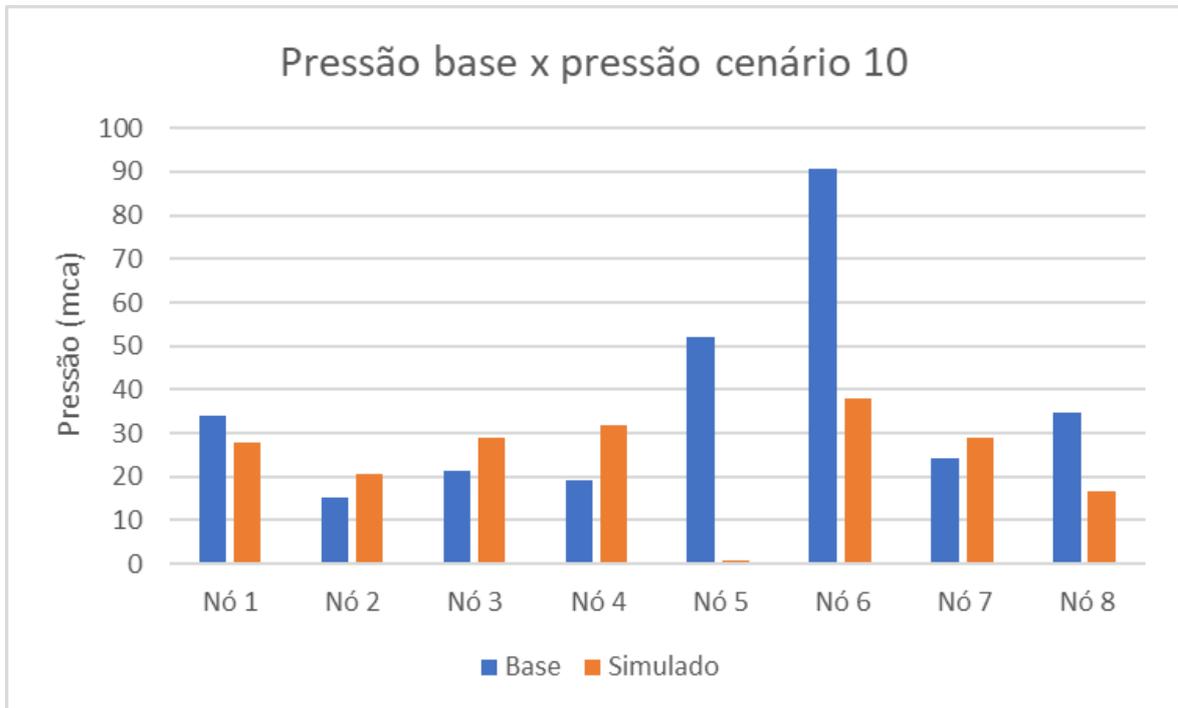
Observa-se na Figura 33 a observação da variação dos coeficientes de rugosidade de Hazen Willians ao longo das iterações. Conforme esperado nota-se a não linearidade na tendência da variação dos coeficientes de rugosidade de Hazen Willians que foram gerados aleatoriamente. Entretanto achou-se interessante avaliar esta evolução para ter idéia do reflexo de ajustes de pressões nos valores das rugosidades.

Nas figuras 34,35,36 e 37 são ilustrados os gráficos comparativos entre a pressão base e a pressão simulada com as rugosidades nos cenários 10, 3074,4683 e 9753.

A Figura 34 ilustra as diferenças de valores simulados de pressões para os nós e valores da simulação base, considerada de referência, equivalente a pressão de campo.

Com se trata-se das primeiras iterações (no caso 10) observa-se grandes variações de pressões medidas e simuladas, destacando se principalmente os nós 5, 6 e 8 com as maiores diferenças.

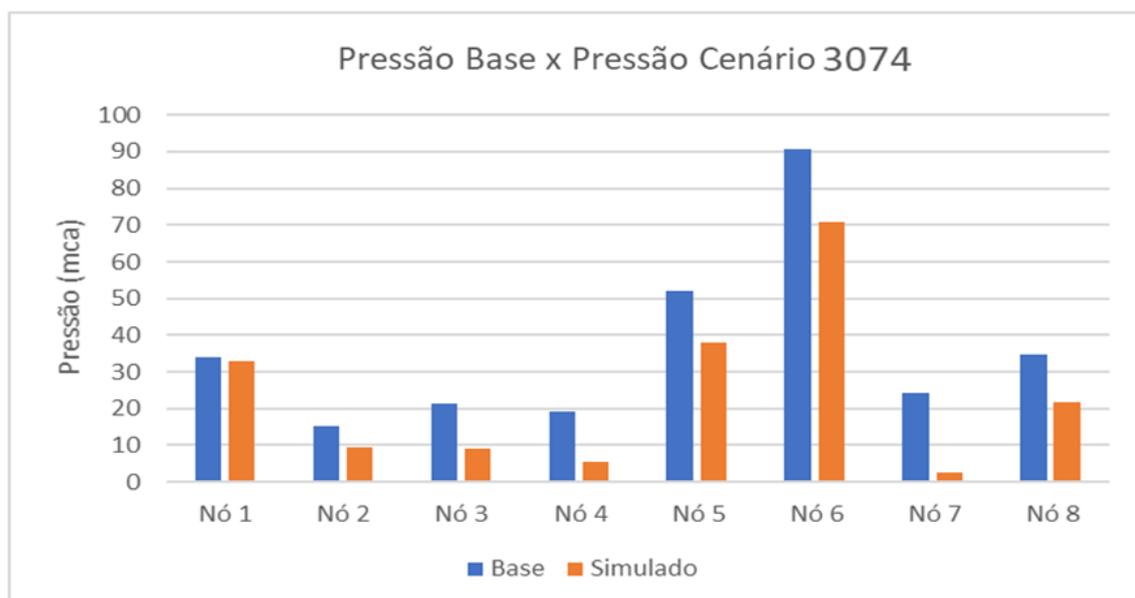
Figura 34–Comparativo entre a pressão base e a pressão simulada no cenário 10



Fonte: o Autor (2021)

Na Figura 35 já na iteração 3074 observa-se de forma geral um melhor ajuste nos nós 5 e 6, uma manutenção nas diferenças dos nós 8 e piora dos nós 4 e 7. Naturalmente estas variações são naturais em um processo de tentativa e erro.

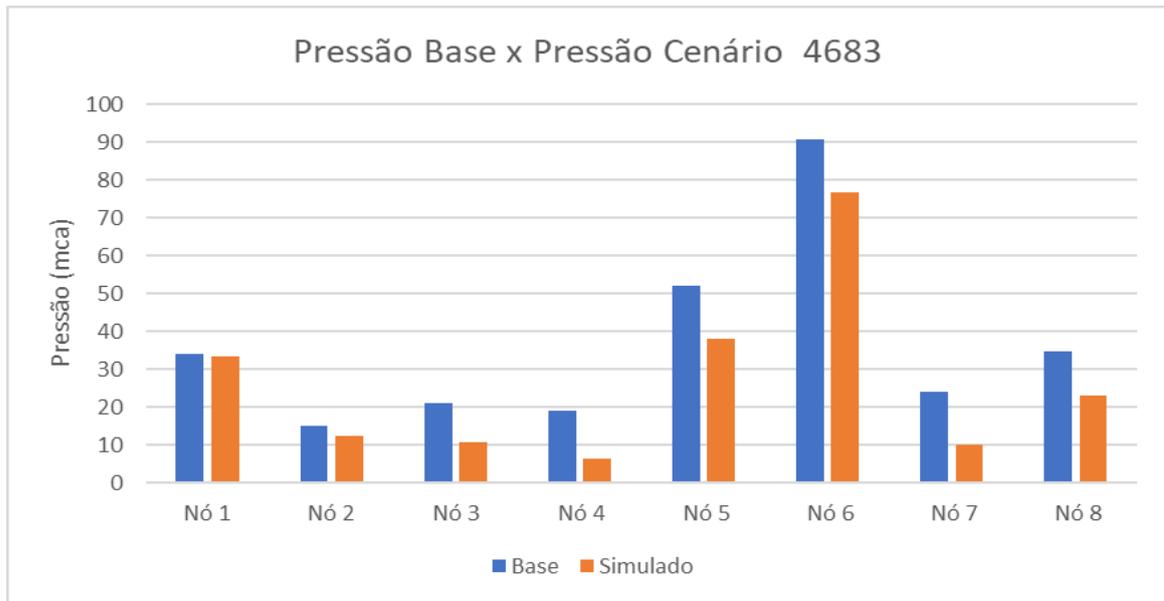
Figura 35 – Comparativo entre a pressão base e a pressão simulada no cenário 3074



Fonte: o Autor (2021)

A Figura 36 ilustra já uma manutenção da proximidade de valores de pressões medidos e simulados para os nós anteriormente citados e uma melhoria na proximidade dos valores dos nós 3 e 4.

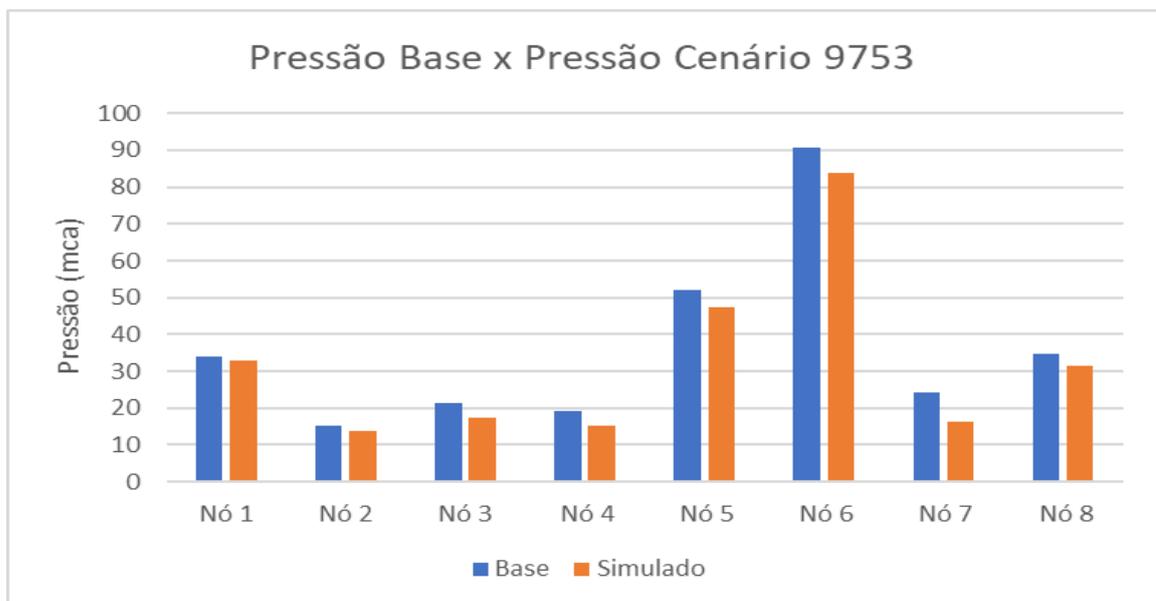
Figura 36 – Comparativo entre a pressão base e a pressão simulada no cenário 4683



Fonte: o Autor (2021)

Por sua vez a Figura 37 que conduziu aos melhores resultados relativos a iteração 9753 observa-se uma proximidade muito grande entre valores medidos e calculados para todos os nós.

Figura 37 – Comparativo entre a pressão base e a pressão simulada no cenário 9753



Fonte: o Autor (2021)

Através da análise dos gráficos dos erros, rugosidades e pressão é possível concluir que na medida em que o número de cenários foi aumentando o erro foi diminuindo até chegar no seu valor mínimo de 32 mca.

Na tabela 2 a seguir são apresentados os erros em porcentagem no cenário que os valores da pressão simulada mais se aproximaram da pressão base. Os erros foram calculados utilizando regrade três simples e constatou-se que o menor erro foi no valor de 3,21 % e o maior erro foi no valor de 32,40 %, e todos os erros ficaram em faixas aceitaveis para a calibração da rede.

Tabela 2 – Cálculo dos erros em porcentagem no cenário 9753

	Cálculo do erro	Erro (%)
Nó 1	$\frac{33,97-100}{(33,97-32,88)} \% - Y$	$100\% \times 1,09 = 33,97 Y$ $Y = 3,21 \%$
Nó 2	$\frac{15,04-100}{(15,04-13,75)} \% - Y$	$100\% \times 1,29 = 15,04 Y$ $Y = 8,57 \%$
Nó 3	$\frac{21,21-100}{(21,21-17,50)} \% - Y$	$100\% \times 3,71 = 21,21 Y$ $Y = 17,49 \%$
Nó 4	$\frac{33,97-100}{(33,97-32,88)} \% - Y$	$100\% \times 1,09 = 19,08 Y$ $Y = 21,38 \%$
Nó 5	$\frac{51,98-100}{(51,98-47,49)} \% - Y$	$100\% \times 4,49 = 51,98 Y$ $Y = 8,63 \%$
Nó 6	$\frac{90,77-100}{(90,77-83,67)} \% - Y$	$100\% \times 7,1 = 90,77 Y$ $Y = 7,82 \%$
Nó 7	$\frac{24,04-100}{(24,04-16,25)} \% - Y$	$100\% \times 7,79 = 24,04 Y$ $Y = 32,40 \%$
Nó 8	$\frac{34,86-100}{(33,86-31,49)} \% - Y$	$100\% \times 3,37 = 34,86 Y$ $Y = 9,66 \%$

Fonte: o Autor (2021)

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho objetivou-se avaliar a viabilidade de aplicação de metodologia de acoplamento da Ferramenta Epanet e R com o intuito de calibração de redes de distribuição de água para abastecimento.

Inicialmente a conseguiu-se fazer o acoplamento entre as duas citadas ferramentas computacionais com base no trabalho de Eck (2018).

Construiu-se com sucesso o acoplamento das duas rotinas computacionais com alguns aprimoramentos permitindo a apresentações de diversos resultados, incluindo saídas de pressões e erros.

A aplicação foi feita para uma rede fictícia proposta e se concluiu que o pacote se mostrou uma ferramenta eficaz na calibração de modelos de redes distribuição de água. A perturbação dos coeficientes de rugosidades C de Hazen-Willians foram conduzindo ao longo das iterações a ajustes de valores de pressões medidos e simulados. A evolução mostrou-se a capacidade da metodologia de ajuste ao longo das iterações, chegando a erros aceitáveis.

Os valores dos coeficientes de rugosidades C de Hazen-Willians sofreram alterações dentro dos esperado diante de diversas combinações aleatórias possíveis pelas simulações.

Deste modo avalia-se que promissora a metodologia, pois tanto R e Epanet são ferramentas poderosas e gratuitas que quando combinadas tem potencial enorme de aplicações em redes de distribuição de água e no caso em calibração de modelos.

Recomenda-se em trabalhos futuros testar maior número de iterações e usar técnicas de otimização mais aprimoradas, como por exemplo técnicas evolucionárias como os algoritmos genéticos. Poderiam ser feitos novos estudos de aplicação em redes reais e aproveitar as potencialidades de análises estatísticas do R. Mas em geral diante das limitações de tempo de uma dissertação mestrado os objetivos gerais foram alcançados.

REFERÊNCIAS

ABDULSHAHEED, A.; MUSTAPHA, F.; GHAVAMIAN, A. A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 69, p. 902–911, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116304373>. Acesso em: 18 jan. 2021.

ABE, Narumi. Proposição de calibração de redes de sistemas de abastecimento de água através de método híbrido. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ALKASSEH, J.; ADLAN, M.; ABUSTAN, I.; AZIZ, H.; HANIF, A. Applying minimum night flow to estimate water loss using statistical modeling: A case study in Kinta Valley, Malaysia. *Water Resources Management*, London, v. 27, n. 5, p. 1439-1455, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257672704_Applying_Minimum_Night_Flow_to_Estimate_Water_Loss_Using_Statistical_Modeling_A_Case_Study_in_Kinta_Valley_Malaysia. Acesso em: 11 mai. 2021.

ALMEIDA, E. P; Aplicação de análises estatísticas em redes de distribuição de água: Uma revisão sistemática da arte. 110 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público: Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 23. 2017.

ARANDIA, E.; ECJ, B. J. An R package for EPANET simulations. **Environmental modelling and software**, Utah, v. 107, p. 59-63, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815218300963>. Acesso em: 17 mar. 2021.

BOCZAR, Tomasz; ADAMIKIEWICZ, Norbert; STANISŁAWSKI, Włodzimierz. Calibration of parameters of water supply network model using genetic algorithm. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2017. p. 0 2007.

CANNAROZZO, Marcella et al. Statistical analysis of water main failures in the distribution network of an Italian municipality. In: *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*. 2008. p. 1-18.

CHEN, T. Y.; GUIKEMA, S. D. Prediction of water main failures with the spatial clustering of breaks. **Reliability Engineering and System Safety**, New York, v. 203, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832020306098>. Acesso em: 25 Mar. 2021.

CHRISTODOULOU, S.; AGATHOKLEOUS, A.; CHARALAMBOUS, B.; ADAMOY, A. Proactive risk-based integrity assessment of water distribution networks. *Water Resour Management*, London, v. 24, n. 13, p. 3715-3730, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-010-9629-5>. Acesso em: 03 fev. 2021.

DA SILVA, A. C; Estudo Comparativo entre Métodos de Perda de Água e Parâmetros Hidráulicos – Análise do Ciclo de Vida e Aplicação em rede do Sul de Minas Gerais. 77 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, 2019.

DIUANA, Fabio Amendola; OGAWA, Seite Caio ContardoPereira; **Análise comparativa dos modelos hidráulicos EPANET, WaterCAD e sistema UFC para sistemas de abastecimento de água – Rede de distribuição.** 2015. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) Rio de Janeiro (RJ): Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

DINI, Mehdi; TABESH, Massoud. Hydraulic calibration of water distribution networks based on ACO algorithms. In: second conference on smart monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. Istanbul, Turkey. 2013. p. 9-11.

DÍAZ, Sarai; MÍNGUEZ, Roberto; GONZÁLEZ, Javier. Calibration via multi-period state estimation in water distribution systems. *Water Resources Management*, v. 31, n. 15, p. 4801-4819, 2017.

DO, Nhu C. et al. Calibration of water demand multipliers in water distribution systems using genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, n. 11, p. 04016044, 2016.

ECK, Bradley J. An R package for reading EPANET files. ***Environmental Modelling & Software***, v. 84, p. 149-154, 2016.

FARIA, Sandro Henrique de; CALIJURI, Maria Lúcia; OLIVEIRA, Júlio César de. Uso de Softwares gratuitos (SPRING e EPANET) na simulação de pressão e vazão de uma rede de abastecimento de água. In: ANAIS XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. Anais Natal, RN: Inpe, 2009. p. 3729 - 3735.

FONTANA, Nicola; GIUGNI, Maurizio; PORTOLANO, Davide. Losses reduction and energy production in water-distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 138, n. 3, p. 237-244, 2012.

GITHUB. **GitHub**. Disponível em:< <https://github.com>>. Acesso em: 22 abr. 2021.

GOULART, T.D.C. Estudos de Aprimoramento de Algoritmo de Calibração e Aplicação em Rede de Distribuição de Água de Cambuí (MG). Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1424/dissertacao_0036252.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 21 abr. 2021.

HENNING, E. et al. Para além da computação estatística: o uso do ambiente R para o ensino de métodos numéricos. **RENOTE**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, 2016

HIRSCH, R. M.; DE CICCO, L. A. User guide to Exploration and Graphic for River Trends (EGRET) and data retrieval: R packages for hydrologic data (Version 2.0), USGS Techniques and Methods 4-A10. 2015.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Ranking do Saneamento Instituto Trata Brasil 2020. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/estudos/estudos-itb/itb/ranking-do-saneamento-2020>>. Acesso em: 07 mai 2021.

IHAKA, Ross; GENTLEMAN, Robert. R: a language for data analysis and graphics. Journal of computational and graphical statistics, v. 5, n. 3, p. 299-314, 1996.

JANKOVIĆ-NIŠIĆ, B. et al. Cost-effective leakage reduction through district metering. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management. Thomas Telford Ltd, 2007. p. 181-187.

JASSBY, Alan D.; CLOERN, James E. wq: Exploring water quality monitoring data. R package version 0.4, v. 5, 2015.

KANAKOUDIS, V.; TSITSIFLI, S. Using the bimonthly water balance of a non-fully monitored water distribution network with seasonal water demand peaks to define its actual NRW level: the case of Kos town, Greece. Urban Water Journal, London, v. 11, n. 5, p. 348-360, 2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1573062X.2013.806563>. Acesso em: 02 abr. 2021.

KHEDR, Ayman; TOLSON, Bryan; ZIEMANN, Samuel. Water distribution system calibration: Manual versus optimization-based approach. Procedia Engineering, v. 119, p. 725-733, 2015.

KONRATH, A. C., SILVA, S. A. da, HENNING, E., SANTOS, L. M. dos, MIRANDA, R. G. de, & SAMOHYL, R. W. (2018). Desenvolvimento de Aplicativos Web Com R e Shiny: inovações no ensino de Estatística. *Abakós*, 6(2), 55-71. <https://doi.org/10.5752/P.2316-9451.2018.v6.n2.p55-71>.

LUBOMIR, C.; MILAN, CISTY. RIRR – New open-source model for the design, analysis and modelling of irrigations systems. Hydrology and Water Resources, Bern, v. 3, p. 251-258, 2016. Disponível em: <https://www.sgem.org/sgemlib/spip.php?article8684>. Acesso em: 17 mar. 2021.

MAURER, Ed. T. **Package ‘Hydraulics’**. Disponível em: < <https://cran.r-project.org/web/packages/hydraulics/hydraulics.pdf> >. Acesso em: 11 abr. 2021.

- MELIA, D. M.; REY, P. L. I.; SOLANO, F. J. M.; MIQUEL, V. S. Design of water distribution networks using a pseudo-genetic algorithm and sensitivity of genetic operators. **Waterresour management**, London, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-013-0400-6>. Acesso em: 22 fev. 2021.
- MENAPACE, Andrea et al. Uniformly distributed demand EPANET extension. *Water resources management*, v. 32, n. 6, p. 2165-2180, 2018.
- MINAEE, Roya Peirovi et al. Calibration of water quality model for distribution networks using genetic algorithm, particle swarm optimization, and hybrid methods. **MethodsX**, v. 6, p. 540-548, 2019.
- MOTTA, R.G. Importância da setorização adequada para combate às perdas reais de água de abastecimento público. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- MUTIKANGA, Harrison E.; SHARMA, Saroj K.; VAIRAVAMOORTHY, Kalanithy. Methods and tools for managing losses in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 139, n. 2, p. 166-174, 2013.
- NAKAMURA, Carolina Harue et al. Calibration of mathematical water quality modeling in a river basin under critical conditions. **Water Environment Research**, v. 91, n. 12, p. 1678-1691, 2019.
- NAM, K.; IFAEI, P.; HEO, S.; RHEE, G.; LEE, S.; YOO, C. An eficiente byrst detection and isolation monitoring system for water distribution networks using multivariate statistical techniques. **Sustainability**, Bern, v. 11, n. 10, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/10/2970>. Acesso em: 11 jan. 2021
- OLIVEIRA G.; MARCATO F.S.; SCAZUFCA P.; PIRES R.C.; MARGULIES B.N. PERDAS DE ÁGUA 2019 (SNIS 2017): DESAFIOS PARA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E AVANÇO DA EFICIÊNCIA DO SANEAMENTO BÁSICO. **Go associados**. São Paulo. 2019.68 p.
- OLIVEIRA, Paulo Felipe de; GUERRA, Saulo; MCDONNELL, Robert – Ciência de dados com R: Introdução, Instituto Brasileiro de Pesquisa e Análise Dados – IBPAD, Brasília, 2018. 240p.
- ORMSBEE, Lindell E. Implicit network calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 115, n. 2, p. 243-257, 1989.
- PLAKIDAS, Konstantinos; SCHALL, Daniel; ZDUN, Uwe. Evolution of the R software ecosystem: Metrics, relationships, and their impact on qualities. *Journal of Systems and Software*, v. 132, p. 119-146, 2017.
- PORTO, R. M. Hidráulica Básica, 4ª ed., São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo 519 p., 2006.

PUUST, R.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A.; KOPPEL, T. A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, London, v. 7, n. 1, p. 25-45, 2010. Disponível em: <https://iahr.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15730621003610878#.Xfe7XGRKiUk>. Acesso em: 28 jan. 2021.

RATHI, Shweta et al. Challenges in calibration of water distribution network: a case study of Ramnagar Elevated Service Reservoir command area in Nagpur City, India. *Water Supply*, v. 20, n. 4, p. 1294-1312, 2020.

ROSSMAN, L. A. (2009). – **EPANET 2.0 – Manual do Usuário**, traduzido e Adaptado por Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, UFPB, Brasil.

RECESA. Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: guia do profissional em treinamento: nível 2. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). Belo Horizonte. 2008.

RACINE, Jeffrey S. **Rstudio: A Platform-Independent IDE for R and Sweave**. *Journal of Applied Econometrics*, Wiley Online Library, v. 27, n. 1, p. 167–172, 2012.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. 2020. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 22 jan. 2021

R STUDIO TEAM. RStudio. Disponível em: <<https://rstudio.com/products/rstudio/download/>>. Acesso em 15 fev de 2021.

SALOMONS, Elad; HATCHETT, Sam; ELIADES, Demetrios G. The EPANET Open Source Initiative. In: **WDSA/CCWI Joint Conference Proceedings**. 2018.

SANTOS A.C. N.; SILVA F.G.B. Estudo de Calibração de Rugosidades em Rede de Distribuição de Água do Bairro Jardim América — MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.18 n.3, p261-269, 2013.

SANTOS, A.C. Estudo de Calibração de uma rede de Distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1424/dissertacao_0036252.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 21abr. 2021.

SANTOS, J. Estudo do Modelo de Calibração para ajuste de parâmetros de rugosidade, demanda e vazamento visando eficiência hídrica e energética em redes de abastecimento de água. Estudo de caso em São Lourenço - MG. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/500>. Acesso em: 12 jun. 2021.

SANZ, Gerard; PÉREZ, Ramon. Sensitivity analysis for sampling design and demand calibration in water distribution networks using the singular value decomposition. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 141, n. 10, p. 04015020, 2015.

SAVIC, Dragan A.; KAPELAN, Zoran S.; JONKERGOUW, Philip MR. Quo vadis water distribution model calibration?. *Urban Water Journal*, v. 6, n. 1, p. 3-22, 2009.

SHAO, Yu et al. A Greedy Sampling Design Algorithm for the Modal Calibration of Nodal Demand in Water Distribution Systems. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2019, 2019.

SHAMIR, Uri; HOWARD, Charles DD. Engineering analysis of water-distribution systems. *Journal (American Water Works Association)*, p. 510-514, 1977.

SILVA, Fernando das Graças Braga da; VALADÃO, Marcus Nante; BARROS, Regina Mambelli. **Simulação hidráulica de redes de abastecimento de água com o uso do epanet 2.0 – Aplicação em Setores de Itajubá – M.G,2007**, disponível em:<https://www.academia.edu/30035030/Simulação_Hidráulica_De_Redes_De_Abastecimento_De_Água_Com_O_Uso_Do_Epanet_2.0_Aplicação_Em_Setores_De_Itajubá_-_M.G> acesso em: 02 Mar. 2021

SILVA, F.G.B. **Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos**.2003. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-23112016-163209/pt-br.php>. Acesso em: 07 jan. 2021.

SILVA, Cleyton Oliveira da; OGAWA. **Modelagem de Rede de Distribuição de Água com Ênfase no controle de Perdas**. 2014. Dissertação de mestrado. João Pessoa, Paraíba: Universidade Federal da Paraíba, 2014.

SILVA, A. T. Y. L. **Proposição de estratégia operacional ótima em rede de distribuição de água**. 2019. Dissertação (Mestrado em meio ambiente e recursos hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1910>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SOUSA, Decíola Fernandes de. RODRIGUES, Sueli. LIMA, Herdjania Veras de Lima. CHAGAS, Lorena Torres. (2020). **R software packages a tool for evaluating soil physical and hydraulic properties**. . v168. n2. p55-71.

SURENDRAN, S.; MAHARAJ, K. T. Effectiveness of log-logistic distribution to model water-consumption data. *Aqua*, London, v. 67, n. 4 p. 375-383, 2018. Disponível em: <https://iwaponline.com/aqua/article-abstract/67/4/375/39004/Effectiveness-of-log-logistic-distribution-to?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 12 mar. 2021.

SUZUKI, R.; SHIMODAIRA, H. PvcLust: An R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering. *Bioinformatics*, Oxford, v. 22, n. 12, p. 1540-1542. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioinformatics/article/22/12/1540/207339>. Acesso em: 11 jan. 2021

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006. 643 p.

TANYIMBOH, T. T.; TIETAVAINEN, M. T.; SALEH, S. Reliability assessment of water distribution systems with statistical entropy and other surrogate measures. *Water Science & technology: Water supply*, London, v. 11, n. 4, p. 437-443, 2011. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/11/4/437/25197/Reliability-assessment-of-waterdistribution>. Acesso em: 16 mai. 2021.

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.

TURNER, Sean WD; GALELLI, Stefano. Water supply sensitivity to climate change: An R package for implementing reservoir storage analysis in global and regional impact studies. *Environmental Modelling & Software*, v. 76, p. 13-19, 2016.

VASSILJEV, Anatoli; KOOR, M.; KOPPEL, Tiit. Real-time demands and calibration of water distribution systems. *Advances in Engineering Software*, v. 89, p. 108-113, 2015.

VAIDYA, Mitisha et al. R: An Open Source Software Environment for Statistical Analysis. 2017.

WALSKI, Thomas M. Technique for calibrating network models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.

WATER RESEARCH CENTRE. Network Analysis – A code for practice. Published by WRC, Swindon, UK, 1989.

XU, Q.; QIANG, Z.; CHEN, Q.; LIU, K.; CAO, N. A superposed model for the pipe failure assessment of water distribution networks and un certainty analysis: A case study. *WaterResourManage*, London, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1899-8>. Acesso em: 20 Mar. 2021

ZANCA, Renato Braga et al. Modeling and hydraulic performance evaluation of a dripper device coupled to a branched water distribution network. *Revista Ambiente & Água*, Taubaté, v. 14, n. 3, 2019.

ZANFEI, Ariele et al. Calibration Procedure for Water Distribution Systems: Comparison among Hydraulic Models. *Water*, v. 12, n. 5, p. 1421, 2020.

ZHANG, Wei Wei; YU, Guo Ping; BAI, Miao Shun. Calibration of Hydraulic Model in Real-Life Water Distribution System. In: *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2012. p. 285-290.