

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

**Aplicação de algoritmos genéticos em operação de redes de distribuição de água com o uso de softwares R e EPANET visando ao controle de perdas de água – estudo em uma rede teórica**

**Sara Maria Marques**

**ITAJUBÁ (MG)**

**2023**

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

**Sara Maria Marques**

**Aplicação de algoritmos genéticos em operação de redes de distribuição de água com o uso de softwares R e EPANET visando ao controle de perdas de água – estudo em uma rede teórica**

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)**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, a Deus, que é o autor da vida, com seu amor incondicional e conhecedor de todos os medos e todas as necessidades, e que me deu força para seguir por este caminho, possibilitando que eu realizasse com sucesso este trabalho.

Aos meus pais e à minha irmã, que estão sempre me apoiando e incentivando, indicando o melhor caminho para alcançar meus objetivos e desejos.

Ao professor e orientador Fernando das Graças Braga da Silva pela orientação e apoio durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

Ao colega de pós, Alex Takeo Yasumura Lima Silva, por toda ajuda dada ao desenvolvimento desta pesquisa, sendo uma pessoa de extrema competência e profissionalismo. Também pelo respeito e pela amizade desenvolvida.

Ao NUMMARH- Núcleo de Modelagem em Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos da UNIFEI, pela oportunidade de participar junto a projetos de pesquisas. E também ao LHC – Laboratório de Hídrica Computacional, pela disponibilidade em utilizar dos computadores nas simulações computacionais que foram necessárias para o desenvolvimento do trabalho.

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

Aos colegas e demais professores da MEMARH – Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, pelos conhecimentos transmitidos e pela boa convivência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa por meio da bolsa concedida, com processo nº 88887.614858/2021-00.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

"O correr da vida embrulha tudo. A vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem"

(Guimarães Rosa)

## RESUMO

O uso desordenado dos recursos hídricos os leva ao esgotamento, resultando no surgimento de questões ambientais e sociais. Com isso, um aspecto relevante a ser observado nos sistemas de abastecimento de água são as perdas que ocorrem durante todo o processo operacional do sistema. Contudo, as maiores perdas de água estão nas redes de distribuição, que conduzem a água para residências, comércios e indústrias. Esse fato ocasiona perdas financeiras e principalmente perdas naturais. A preocupação que o tema traz é relevante à utilização medidas que permitam sua redução. Para isso, a utilização das simulações computacionais das redes tem o intuito de estudar seu comportamento, principalmente de identificar áreas propensas a perdas de água. Assim, desenvolveu-se, no presente estudo, metodologia de operação de rede de distribuição de água, utilizando de dois métodos: os algoritmos genéticos e a busca aleatória, visando à otimização do sistema por meio da otimização das pressões da rede e com isso, a redução das perdas. Foram alterados os parâmetros da rede teórica de estudo, como: nível do reservatório, rugosidade, diâmetro, demanda, bombas e as válvulas redutoras de pressão simultaneamente, utilizando das ferramentas R e EPANET. A redução de perda encontrada com a simulação por meio da utilização do Algoritmo Genético foi de 15,75%. Na simulação aleatória, a redução da perda encontrada foi de 9,79%. Além disso, os valores de pressões encontrados na geração ótima, apresentada pelo algoritmo genético, foram muito melhores que do aleatório, pois as pressões elevadas que a rede apresentava antes da simulação ficaram inferiores a 50 m.c.a. Assim, a simulação da rede de estudo sobre a utilização do método do algoritmo genético se mostrou muito melhor, com valores de perdas e pressão otimizados.

**Palavras-chave:** Rede de distribuição. Simulação hidráulica. Otimização da operação de redes de distribuição de água. Algoritmos Genéticos. Busca Aleatória.

## ABSTRACT

The disorderly use of water resources leads them to depletion, resulting in the emergence of environmental and social issues. Thus, a relevant aspect to be observed in water supply systems are the losses that occur throughout the operating process of the system. However, the largest water losses are in the distribution networks, which lead water to homes, businesses and industries. This fact causes financial losses and mainly natural losses. The concern that the theme brings is relevant to the use of measures that allow its reduction. For this, the use of computer simulations of networks is intended to study their behavior, especially to identify areas prone to water loss. Thus, it was developed, in the present study, methodology of operation of water distribution network, using two methods: genetic algorithms and random search, aiming at the optimization of the system through the optimization of network pressures and thus the reduction of losses. The parameters of the theoretical study network were changed, such as: reservoir level, roughness, diameter, demand, pumps and pressure reducing valves simultaneously, using the tools R and EPANET. The loss reduction found with the simulation using the Genetic Algorithm was 15.75%. In the random simulation, the loss reduction found was 9.79%. In addition, the values of pressures found in the optimal generation, presented by the genetic algorithm, were much better than that of the random, because the high pressures that the network presented before the simulation were below 50 m.c.a. Thus, the simulation of the study network on the use of the genetic algorithm method was much better, with optimized loss and pressure values.

**Keywords:** Distribution network. Hydraulic simulation. Optimization of the operation of water distribution networks. Genetic Algorithm. Random Search.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Sistema de abastecimento de água.....	14
Figura 3.2 - Evolução das perdas na distribuição no Brasil em porcentagem.....	16
Figura 3.3 - Perdas na distribuição por região do Brasil em porcentagem.....	17
Figura 3.4 - Tipos de perdas aparentes .....	17
Figura 3.5 - Tipos de perdas reais.....	18
Figura 3.6 - Funcionamento do algoritmo genético. ....	20
Figura 3.7 - Interface do EPANET 2.0 - Brasil.....	24
Figura 3.8 - Reservatório de montante .....	27
Figura 3.9 - Reservatório de jusante.....	27
Figura 3.10 - Reservatório de sobra.....	27
Figura 3.11 - Tela do RStudio .....	35
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas de metodologia do estudo.....	40
Figura 4.2 - Interface do RStudio utilizada no estudo .....	41
Figura 4.3 - Template básico para gerar gráfico no R .....	42
Figura 4.4 - Rede aleatória utilizada nos estudos iniciais.....	44
Figura 4.5 - Dados dos nós da rede aleatória de estudo .....	44
Figura 4.6 - Dados dos trechos da rede aleatória de estudo .....	45
Figura 4.7 - Isolinhas da pressão da rede aleatória de estudo representada em gráfico .....	45
Figura 4.8 - Exemplificação da rede de estudo no EPANET .....	47
Figura 4.9 - Simulação hidráulica completa da rede .....	50
Figura 4.10 - Modificação do comprimento de um trecho da rede .....	51
Figura 5.1 - Desenvolvimento da simulação aleatória .....	57
Figura 5.2 - Comparação entre os valores de pressão do cenário 217 e o base.....	59
Figura 5.3 - Comparação entre os valores de pressão do cenário 360 e o base.....	60
Figura 5.4 - Comparação entre os valores de pressão do cenário 914 e o base.....	61
Figura 5.5 - Comparação entre os valores de pressão das três iterações ótimas e o cenário base. ....	62
Figura 5.6 - Porcentagem de perdas dos cenários. ....	62
Figura 5.7 - Comparação entre as porcentagens de perdas dos cenários ideais com o cenário base. ....	63
Figura 5.8 - Comparação entre as pressões da iteração ideal da simulação com 10000 iterações com o cenário base. ....	66

Figura 5.9 - Comparação entre as porcentagens de perdas da iteração ideal da simulação com 10000 iterações com o cenário base. ....	67
Figura 5.10 - Fluxograma da simulação do algoritmo genético. ....	69
Figura 5.11 - Perdas encontradas nas 1000 gerações da 1ª simulação. ....	71
Figura 5.12 - Perdas encontradas nas 1000 gerações da 2ª simulação. ....	71
Figura 5.13 - Perdas encontradas nas 1000 gerações da 3ª simulação. ....	72
Figura 5.14 - Perdas encontradas nas 1000 gerações da 4ª simulação. ....	72
Figura 5.15 - Perdas encontradas nas 1000 gerações da 5ª simulação. ....	73
Figura 5.16 - Comparação entre os melhores valores de perdas de cada simulação. ....	74
Figura 5.17 - Comparação entre as pressões do cenário base e a geração ótima. ....	75
Figura 5.18 - Comparação entre o método aleatório e algoritmo genético. ....	78



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados determinados para os nós da rede teórica.....	48
Tabela 2 - Dados determinados para os trechos da rede teórica.....	49
Tabela 3 - Funções resumidas do epanet2toolkit.....	52
Tabela 4 - Intervalo estabelecido para os parâmetros.....	53
Tabela 4 - Valores obtidos nos nós após a simulação no EPANET.....	56
Tabela 6 - Valores de pressão encontrados nas iterações 217, 360 e 914. ....	58
Tabela 7 - Valores de rugosidade e diâmetro da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória. ....	64
Tabela 8 - Valores de demanda e nível dos reservatório da rede encontrado na <i>iteração</i> ideal da simulação de busca aleatória.....	64
Tabela 9 - Valores das válvulas e bombas da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória.....	65
Tabela 10 - Valores de rugosidade e diâmetro da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória, com mais iterações.....	67
Tabela 11 - Valores de demanda e níveis dos reservatório da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória, com mais iterações. ....	68
Tabela 12 - Valores das válvulas e bombas dos reservatório da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória, com mais iterações. ....	68
Tabela 13 - Valores de rugosidade e diâmetro da rede encontrado na geração ideal da simulação do algoritmo genético.....	75
Tabela 14 - Valores de demanda e nível dos reservatórios da rede encontrado na geração ideal da simulação do algoritmo genético. ....	76
Tabela 15 - Valores das válvulas e bombas da rede encontrado na geração ideal da simulação do algoritmo genético. ....	77
Tabela 16 – Comparação dos valores de rugosidade e diâmetro das simulações.....	79
Tabela 17 – Comparação dos valores de demanda e nível dos reservatórios das simulações..	79
Tabela 18 – Comparação dos valores das válvulas e bombas das simulações. ....	80

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Estudos sobre operação de redes de distribuição de água.....	29
---	----

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
3.1 Sistemas de abastecimento de água.....	14
3.2 Redes de distribuição de água .....	14
3.3 Perdas nas redes de distribuição de água .....	15
3.4 Algoritmo Genético.....	20
3.5 Método de busca aleatória baseado em Monte Carlo.....	22
3.6 EPANET e sua utilização nas redes de distribuição .....	23
3.7 Operação de redes de distribuição de água .....	26
3.8 <i>Software</i> R e suas aplicações.....	34
3.9 <i>Software</i> R e EPANET aplicado em redes de distribuição de água.....	37
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
4.1 Etapa 1: Prática e capacitação de potencialidades do <i>software</i> R.....	40
4.2 Etapa 2: Treinamento com uso do <i>software</i> EPANET.....	43
4.2.1 EPANET Programmer's Toolkit .....	46
4.3 Etapa 3: Definição de um sistema de abastecimento de água teórico para estudo .....	47
4.4 Etapa 4: Realização do acoplamento entre os <i>softwares</i> R e EPANET.....	49
4.5 Etapa 5: Determinação de parâmetros para simulações computacionais.....	53
4.6 Etapa 6: Realização de simulações computacionais de operação da rede virtual fictícia .....	53
4.7 Etapa 7: Análise dos resultados em termos de critérios de melhoria do desempenho do sistema .....	55
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>56</b>
5.1 Simulação da rede teórica no EPANET .....	56
5.2 Desenvolvimento da simulação de busca aleatória .....	57
5.3 Simulação de busca aleatória da rede teórica.....	58
5.3.1 Busca aleatória com mais iterações .....	65
5.4 Simulação do algoritmo genético na rede teórica .....	68
5.5 Comparando os dois métodos aplicados .....	77
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural renovável, limitado e de extrema importância para o desenvolvimento humano e suas atividades. Contudo, o uso desordenado da água tem levado ao esgotamento de mananciais, ocasionando o surgimento de questões ambientais e sociais com a impossibilidade do abastecimento (TSUTIYA, 2006; SILVA JÚNIOR, 2017).

O setor de saneamento tem enfrentado problemas para atender a uma demanda crescente por água, uma vez que a oferta vem diminuindo. Além disso, enfrentam uma outra questão importante: as perdas que ocorrem em toda a operação do sistema. Entretanto, as maiores perdas são encontradas nas redes de distribuição de água (FRITZ; GIMENES; PINA FILHO, 2020).

Tais perdas são determinadas pela diferença entre o volume de água que entra no sistema e pelo contabilizado (CHEUNG, 2004; MONTENEGRO, SALVINO, SANTOS, 2015). E podem ser de dois tipos: aparentes, caracterizadas pela água que foi consumida, mas não foi contabilizada (KANAKOUDIS E MUHAMMETOGLU, 2014; VIEIRA, 2019) e reais, que são determinadas por vazamentos em tubulações ou extravasamento de reservatórios (BRASIL, 2014).

No Brasil, dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) mostram que a quantidade de perdas nas redes de distribuição de água é de 40,1% (BRASIL, 2021). Esse valor é muito elevado e preocupante quando comparado com países em excelência na distribuição em que o nível de perdas gira em torno do 15% (OLIVEIRA G. et al., 2019).

Com a relevância que a questão traz, é importante que medidas que permitam sua redução sejam implementadas. Para isso, é desejável a utilização de simulações computacionais das redes com o intuito de estudar seu comportamento, possibilitando identificar áreas propensas a rupturas, além de permitir a otimização da operação do sistema de distribuição de água.

Com isso, tem-se a aplicação de métodos para a realização dessas simulações, como os algoritmos genéticos, desenvolvidos com base na teoria de Darwin, em que os melhores indivíduos têm maiores chances de sobreviver e produzirem indivíduos. Assim, o algoritmo realiza investigações gerais a partir das melhores respostas de cada geração e leva esse melhor indivíduo para a geração seguinte, realizando para isso processos como cruzamento e mutação dos dados. É uma prática capaz de solucionar questões complexas, como é o caso dos estudos das redes de distribuição (SILVA, 2019).

Outro método utilizado é o da simulação aleatória, que consiste em utilizar de números aleatórios para resolução de problemas que podem ser retratados por meio estocásticos (YORIYAZ, 2009). Aplica-se a possibilidade de avaliação de erros de estimativa, além de não precisar saber inicialmente as expressões analíticas que modelam o problema (PAPAIIOANNOU et al., 2015; ESTEVÃO, 2019).

Assim, a pesquisa aqui apresentada realizou o estudo de uma rede teórica, com comportamento semelhante a uma rede real, com pressões desiguais nos nós, em que há nós com valores de pressões muito baixos e outros com valores muito altos, o que leva ao aumento da probabilidade de o sistema sofrer com perdas.

Para isso, foram utilizadas essas duas técnicas de simulação, buscando encontrar o melhor cenário em que houvesse a otimização das perdas e conseqüentemente das pressões, em ambas as técnicas, analisando qual foi capaz de encontrar a melhor otimização do sistema estudado. Para tal, foi necessário elaborar cenários de simulação, atribuindo intervalos para cada variável envolvida na operação da rede, sendo elas nível dos reservatórios, rugosidade e diâmetro das tubulações, demanda nos nós, funcionamento das bombas e válvulas.

Para que fosse possível realizar todas as simulações, foi escolhida uma linguagem de programação, sendo ela o R. Isso se deu devido ao desenvolvimento de um pacote dessa linguagem, o *epanet2toolkit*, desenvolvido por Arandia & Eck (2018), que permite a integração entre o EPANET e o R. Sua utilização abre um horizonte em relação à sua aplicação nos estudos deste trabalho, propiciando o entendimento maior sobre o funcionamento das redes, permitindo conhecer as causas de ocorrência das perdas. Com isso, tem-se que o trabalho aqui apresentado se utiliza de uma ferramenta ainda pouco utilizada nos estudos sobre rede de distribuição de água, aplicando sobre uma rede teórica com comportamento real, sobre dois métodos de simulação, buscando encontrar qual é melhor nas reduções das perdas e conseqüentemente na redução de pressões, utilizando da variação de parâmetros da rede.

## 2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de metodologia para a operação de rede de distribuição de água com o uso de algoritmos genéticos e busca aleatória. Destaca-se como diferencial com relação às pesquisas realizadas, utilizando da ferramenta *epanet2toolkit*, que realiza o acoplamento do R com EPANET, com a variação dos parâmetros da rede, como nível do reservatório, rugosidade, diâmetro, demanda, bomba e válvulas redutoras de pressão.

Os **objetivos específicos** são:

- Desenvolver uma rede teórica para aplicação das simulações;
- Operacionalização de uso de módulo de algoritmo genético e busca aleatória, do Software R e EPANET a partir de módulo de Arandia e Eck (2018) para operação de redes de distribuição de água;
- Avaliar as respostas das pressões e conseqüentemente das perdas encontradas por meio da variação dos parâmetros da rede.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz uma breve revisão da literatura sobre os assuntos pertinentes e conceituações teóricas necessárias ao desenvolvimento desta pesquisa.

#### 3.1 Sistemas de abastecimento de água

De maneira geral, um sistema de abastecimento de água pode ser definido como um agrupamento de elementos, como tubulações, válvulas, bombas, reservatórios, entre outros, com o propósito de conduzir a água aos pontos de consumo em condições sanitárias e operacionais adequadas (PORTO, 2006).

Para isso, a água passa por processos (Figura 3.1), que se principiam na captação da água de fontes subterrâneas e/ou superficiais. As estações elevatórias são constituídas por equipamentos e obras, com a função de recalcar a água de um nível para outro, elevando a pressão e a vazão. Nas estações de tratamento, a água passa por processos mecânicos e químicos para sua adequação ao consumo. Já os reservatórios são estruturas responsáveis por manter a pressão no sistema e atender a oscilação do consumo. A ligação entre esses processos é feita pelas adutoras, podendo ser de água bruta, quando interligam a captação à estação de tratamento ou adutora de água tratada, responsáveis por levar a tratada até os reservatórios. E, por fim, a última etapa do processo de produção da água tratada, as redes de distribuição conduzem a água ao seu consumidor final (TSUTIYA, 2006; SILVA JÚNIOR, 2017).

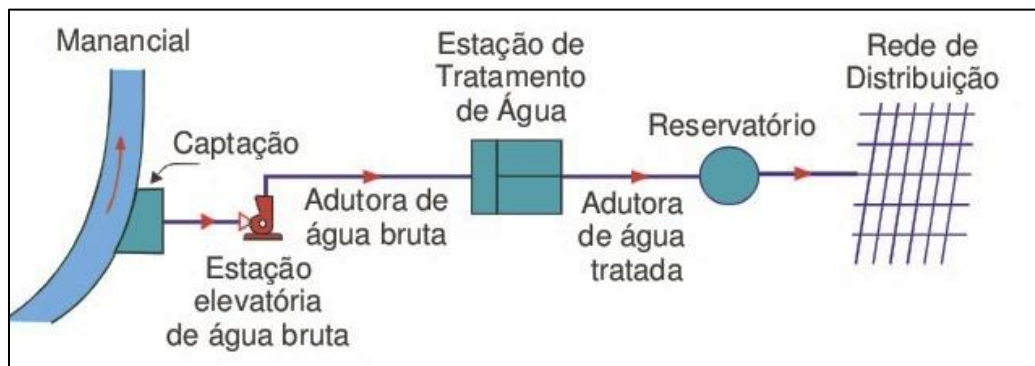


Figura 3.1 - Sistema de abastecimento de água.

Fonte: Alem Sobrinho; Contrera (2013)

#### 3.2 Redes de distribuição de água

As redes de distribuição de água são um conjunto de elementos distintos, formado por tubulações e órgãos acessórios, conectados entre si com a função de levar a água em

quantidade e qualidade aos pontos de consumo, sendo ele domésticos, industriais ou comerciais (MARTINHO, 2020; MARTINHO, MELO, SÖRENSEN, 2021).

A estrutura da rede de abastecimento depende do tamanho do local a ser abastecido, além das características topográficas e da via pública onde são instaladas. Independentemente de seu layout, as redes, de maneira geral, são constituídas de dois tipos de condutos, principais e secundários (PORTO, 2006). Os condutos principais são de maior diâmetro e alimentam os condutos secundários. Estes são de menor diâmetro e abastecem diretamente os pontos de consumo (HELLER; PÁDUA, 2010).

Segundo Tsutiya (2006), as redes podem ser classificadas em três tipos: ramificadas, malhadas ou mistas, sendo definidas devido à organização das tubulações principais e o sentido do escoamento dos condutos secundários.

A rede ramificada é definida quando o abastecimento se dá por meio de uma tubulação tronco diretamente para as tubulações secundárias, com o sentido da vazão de todos os trechos conhecida. Devido à sua configuração, um rompimento em uma tubulação ou manutenção no sistema compromete todo o abastecimento a jusante (TSUTIYA, 2006). Com isso, tal rede é mais utilizada em pequenas comunidades, para a irrigação por aspersão e em sistemas particulares (PORTO, 2006).

A rede malhada se caracteriza por tubulações principais formando anéis, permitindo o abastecimento dos pontos de consumo por mais de uma direção. Com isso, há uma maior flexibilidade em atender a manutenção e a demanda da rede, com a interrupção de pequenas partes do sistema, não comprometendo o abastecimento da rede toda (TSUTIYA, 2006). A reversibilidade de vazão que tal configuração concede possibilita a entrega de água com qualidade, pois o fluxo é permanente (HELLER; PÁDUA, 2010).

Já a rede mista apresenta um arranjo com a junção dos dois tipos citados, com uma parte formada por rede malhada e parte por rede ramificada, que, geralmente, estão situadas em áreas de expansão do sistema ou em áreas periféricas (PORTO, 2006).

### **3.3 Perdas nas redes de distribuição de água**

O aumento da população atrelado à escassez dos recursos hídricos que está se intensificando nas últimas décadas vem pressionando as companhias de abastecimento para reduzirem suas perdas, mantendo o atendimento da demanda do sistema sem prejudicar ainda mais esses recursos (CHINI; STILLWELL, 2018).



Em todo o processo operacional dos sistemas de abastecimento, ocorrem perdas de algum tipo, que geralmente são causadas por deficiências na operação e manutenção das estruturas que o compõe e também pela gestão comercial ineficiente das companhias de saneamento (SOBRINHO; BORJA, 2016). Assim, a ligação entre o nível de perda e a eficiência é absoluto, pois, em sistemas que possuem o alto grau de gerenciamento, os índices de perdas são baixos (SILVA JÚNIOR, 2017).

Para Fontana et al. (2012), a falta de gerenciamento atrelado à deficiência na manutenção efetiva do sistema, ocasiona a deterioração dos elementos que a compõem, o que leva ao aumento das perdas. Isso ocorre porque estão cravadas no subsolo e, com isso, são esquecidas, recebendo atenção somente quando apresentam falhas (MUTIKANGA et al., 2013).

No Brasil, dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) mostram que a quantidade de perdas na distribuição de água é muito elevada, sendo de 40,1%. Ou seja, quase metade da água tratada se perde no caminho até o consumidor (BRASIL, 2021).

Dados mostram que esse valor se intensificou nos últimos anos, como apresentado na Figura 3.2.

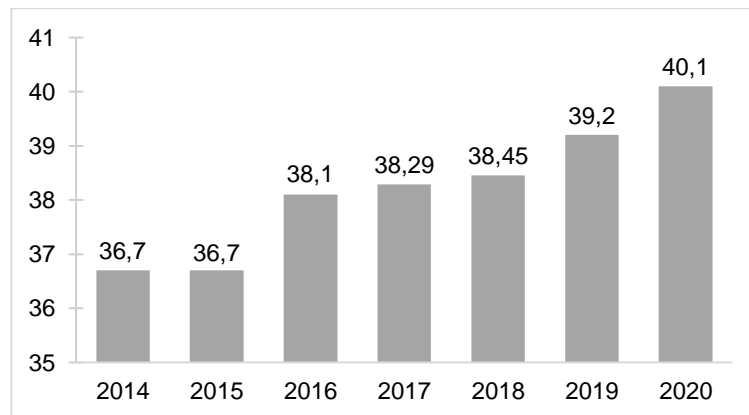


Figura 3.2 - Evolução das perdas na distribuição no Brasil em porcentagem.

Fonte: Adaptado Brasil (2021)

Porém, quando são analisados os dados de perdas por região, há uma grande heterogeneidade dos valores. As regiões Norte e Nordeste apresentam as maiores perdas por serem as mais carentes em infraestrutura e com o menor índice de abastecimento (BRASIL, 2021). A Figura 3.3 apresenta esses valores por região do Brasil.

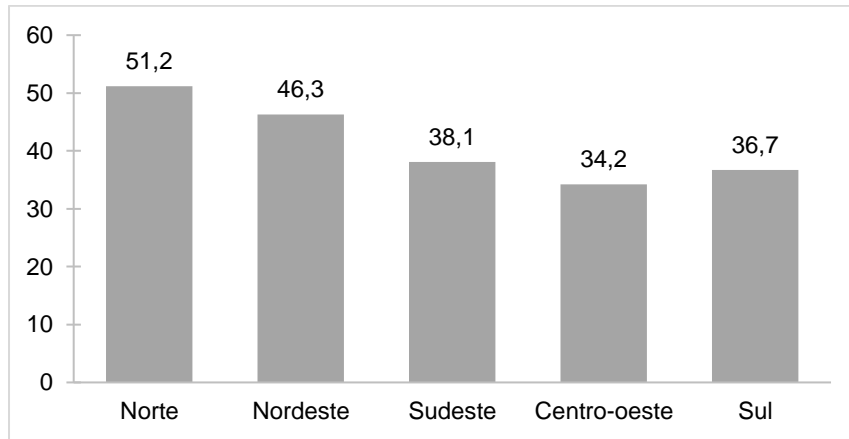


Figura 3.3 - Perdas na distribuição por região do Brasil em porcentagem.

Fonte: Adaptado Brasil (2021)

Essas perdas são determinadas pela diferença entre o volume de água que entra no sistema pelo volume contabilizado (CHEUNG, 2004). E podem ser classificadas em aparentes ou reais.

As perdas aparentes são também chamadas de perdas não físicas e são determinadas através do consumo da água tratada sem permissão. Sua maior ocorrência se dá em pontos próximos do consumidor final e se caracterizam por problemas de medição em hidrômetros, ligações clandestinas, aferição inadequada do consumo de água, entre outras utilizações não permitidas da água (KANAKOUDIS E MUHAMMETOGLU, 2014; VIEIRA, 2019). A Figura 3.4, apresenta os tipos de perdas aparentes, que se diferem em três macromedição, gestão comercial e micromedição. A macromedição é caracterizada por erros de medição da água que entra nas redes, causados principalmente por erros nos equipamentos de medição dessa água. Já a gestão comercial se refere a gestão ineficiente do sistema, e caracterizam por ligações clandestinas nas redes, cadastro desatualizados de clientes e fraudes. E por fim a micromedição é definida principalmente por erros de medição dos hidrômetros.

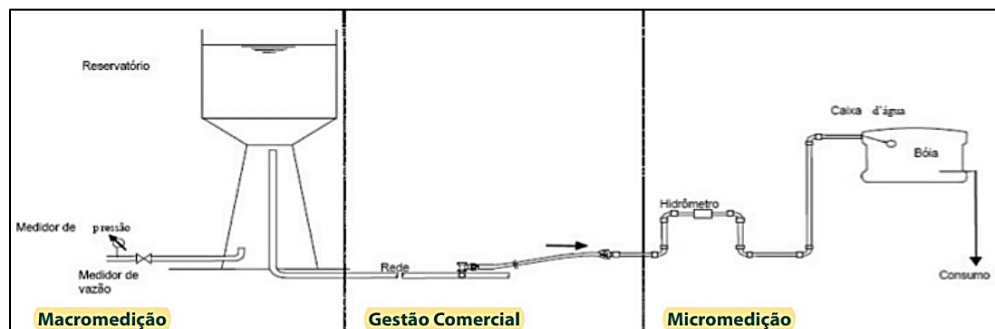


Figura 3.4 - Tipos de perdas aparentes.

Fonte: Brasil (2014, p. 30)

Para evitar esse tipo de perda nas redes, existem algumas medidas que pode auxiliar o seu controle, como a fiscalização da rede, atualização de cadastro, automatização do sistema e aferição dos equipamentos de medição (KANAKOUDIS E MUHAMMETOGLU, 2014).

Já as perdas reais, conhecidas como físicas, são definidas por vazamentos nas tubulações e extravasamento de reservatórios, representando o volume de água tratada, mas não consumida, ou seja, que não chegou ao ponto de final de consumo (BÁGGIO, 2014).

Esse tipo de perdas ocorre devido a alguns fatores, como qualidade dos materiais, envelhecimento, falta de manutenção, obras no entorno da rede e principalmente mudanças de pressão, cujo descontrole pode levar à elevação de pressão nas redes, ocasionando vazamentos (ANDRADE SOBRINHO; BORJA, 2016; BARBEDO, 2022). A Figura 3.5 traz os tipos de perdas reais.



Figura 3.5 - Tipos de perdas reais.

Fonte: Brasil (2014, p. 29)

Segundo AL-Washali et al. (2020), as perdas reais são preocupantes porque causam desperdício de água, decaimento da qualidade da água, elevação dos custos de operação e manutenção, fatores que levam à diminuição de receita e principalmente dos recursos hídricos. Assim, reduzir essa perda permite aumentar a oferta disponível para distribuição sem a necessidade de novas fontes de captação, além de melhorar o desempenho financeiro.

Outro problema que as perdas trazem é a redução da eficiência hidráulica, ocasionando o aumento do consumo elétrico, pois os vazamentos exigem um aumento de pressão e vazão para atender a demanda, levando à ineficiência energética da rede (SOUSA; SOARES, 2020). No Brasil, esse consumo de energia, nos sistemas de abastecimento de água é de aproximadamente 11,84 TWh/ano, o que representa um gasto de R\$ 6,35 bilhões para as companhias de abastecimento (SNIS, 2019). Assim, num sistema eficiente, não há somente a redução da perda de água, mais também de energia, uma vez que estão interligados (GUANAIS; COHIM; MEDEIROS, 2016).

Andrade (2016) apresentou, em seu trabalho, a avaliação do balanço hidroenergético de uma rede real da cidade de Cambuí (MG), constituída de 487 ligações, com o objetivo de

encontrar a otimização da rede por meio da redução do consumo energético do sistema. Para isso, foram utilizados dados reais da rede, coletados por campanhas de campo e disponibilizados pela companhia de saneamento, a SAAE, responsável pela rede que foi estudada.

Segundo a autora, para o estudo, foram utilizadas duas metodologias como base, a do balanço hídrico desenvolvido pela *International Water Association* (IWA) e a metodologia desenvolvida por Cabrera et al. (2010), que utiliza o consumo de energia elétrica na entrada do setor. Com essas duas metodologias, foi possível encontrar os valores de perdas da rede, sendo que ambos apresentaram valores muito próximos. Além disso, também foi possível encontrar os dados sobre os custos de produção, como o consumo energético como o processo.

Em Alves (2018), tem-se a aplicação de indicadores de desempenho hídrico e energético, mais utilizados pela literatura, em uma rede real situada no sul do estado de Minas Gerais (Brasil). O objetivo apresentado pelo autor foi de analisar o comportamento dessa rede real com base nesses indicadores e, por meio deles, propor um indicador de sustentabilidade que permitisse a redução de custos do sistema, com a diminuição de água e energia, melhorando assim a gestão da rede.

Assim, foram encontrados, para a rede real estudada pelo autor, índices de perdas e consumo *per capita* da rede relativamente baixos, porém ainda não ideais. Contudo, o indicador de sustentabilidade desenvolvido mostrou ter potencialidade de aplicação quanto à análise da rede real, permitindo sua comparação com outros sistemas e maior conhecimento sobre a redução de custos. Porém, o autor afirma que são necessários estudos mais profundos sobre os indicadores, com análises estatísticas mais detalhadas, além da necessidade de se aplicar em outras redes reais para atestar a veracidade desse índice.

Com isso, a problemática exige medidas para a sua mitigação como melhoria na rede de distribuição com a adoção de tubulações de diâmetros e materiais adequados à prevenção de vazamento e controle da atividade de bombas com a implantação de uma gestão e operação eficiente. Para esta última medida, há recomendações maiores que envolvem a troca de bombas ineficazes, a utilização de bombas adequadas às características de vazão e pressão do sistema, evitando o superdimensionamento, o balanceamento do rotor e o emprego de inversores de frequência no lugar de válvulas de controle (MAKISHA; KAZIMIROVA, 2018).

### 3.4 Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos são uma técnica de otimização desenvolvida por John Holland em 1975. Foi baseada na teoria da evolução apresentada pelo naturalista Charles Darwin, em que o indivíduo mais adaptado ao seu meio tem maior chance de sobreviver e produzir descendentes. No processo de reprodução, ocorrem mutações no gene do indivíduo, que fica armazenado no cromossomo ocasionando a variabilidade da espécie (SILVA, 2019).

Segundo Galvão et al. (1999), o funcionamento do algoritmo genético na resolução de problemas se dá por meio de uma população inicial de cromossomos produzida aleatoriamente ou com dados obtidos. Esse cromossomo passa por uma “seleção”, para que o mais apto seja selecionado. Em seguida do processo de seleção, o indivíduo passa por cruzamento (crossover) e mutação para assegurar a variabilidade da geração seguinte. O algoritmo genético realiza essas etapas até que a solução ótima seja encontrada. A Figura 3.6 exemplifica o que foi dito.

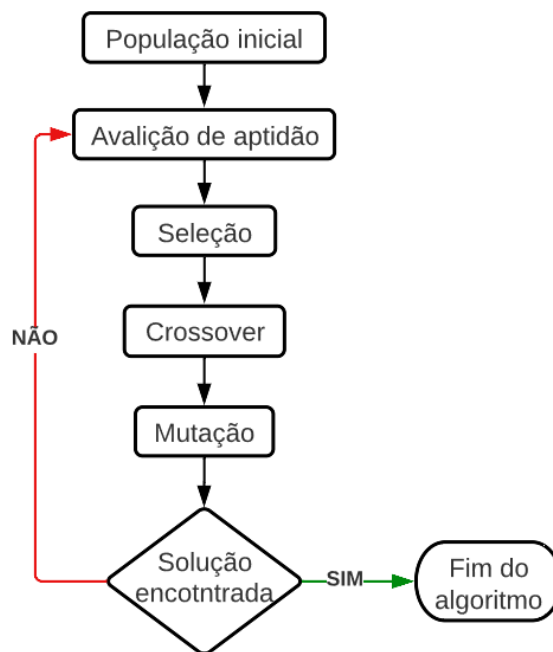


Figura 3.6 - Funcionamento do algoritmo genético.

Fonte: Adaptado de Chagas; Rodrigues; Tavares (2014)

O emprego dessa ferramenta em estudos relacionados a problemas complexos, como os das redes de distribuição, já vem sendo utilizado, pois apresenta-se como bom solucionador quando comparado com métodos convencionais.

No trabalho apresentado por Keedwell e Khu (2005), trouxeram a utilização do algoritmo genético chamado de CANDGA, que usa de autômatos celulares locais com base

heurística para a concepção da população inicial do algoritmo. Esse método possibilita melhorar o algoritmo genético, diminuindo o número de gerações necessárias e de sua variabilidade nas diferentes sementes aleatórias geradas.

Essa técnica foi aplicada em três redes de distribuição de água, sendo uma teórica e duas redes reais de grande porte do Reino Unido, para encontrar a melhor configuração de projeto das redes que tivessem o menor custo, ou seja, economicamente mais viável. Segundo os autores, o CANDGA se mostrou mais eficiente que os algoritmos convencionais quanto a projetos mais otimizados em questão de custos.

Ferreira (2019) trouxe, em seu trabalho, a utilização do algoritmo genético para auxiliar na calibração da rugosidade em duas redes sobre diferentes funções objetivos. As redes utilizadas no estudo operavam sobre regime transiente hidráulico com a variação da demanda. Para determinar a calibração das redes, foram obtidas três funções objetivos que representavam a diferença entre os valores simulados e os reais.

Segundo o autor, a utilização do algoritmo genético associado às funções objetivos foram satisfatórias pois, foi possível encontrar uma calibração boa para as duas redes. Porém, ainda afirma que ajustes precisam ser feitos, porque o resultado encontrado não é o ideal para o sistema.

Em Neto (2021), também se tem o estudo de calibração de duas redes de distribuição de água, sobre regime transiente com a variação de demanda, com a utilização de algoritmo genético; porém, é realizada a comparação do algoritmo sobre duas representações, real (os valores dos genes são números reais do problema) e binária (em que os genes assumem codificação 0 e 1). Foram realizadas várias simulações com 100, 200, 400, 500, 800 e 1000 gerações e, quanto maior o número de gerações, menor era o erro médio relativo em ambas as representações, porém o tempo de simulação foi maior. Mesmo com o número de erros pequenos nas duas abordagens, segundo o autor, a representação real obteve coeficiente de rugosidade melhores que o binário (NETO, 2021).

Já Goulart (2015) apresentou, em seu estudo, o aprimoramento do algoritmo utilizado por Silva (2003), acrescentando uma variável a mais, a demanda nodal, além de manter as variáveis de rugosidade e vazamento. Para isso, foram utilizadas três redes: uma teórica, para o treinamento do modelo; e duas reais, sendo uma do setor Monte Carlo, da cidade de São Carlos (SP), também utilizada por Silva (2003) e a segunda rede real da cidade de Cambuí (MG).

Os resultados de calibração encontrados mostraram que a rede teórica e do setor Monte Carlo apresentaram resultados de calibração favoráveis, para todos os nós das redes. Para a rede de Cambuí, o resultado foi desfavorável, pois a rede é de grande escala e mais variáveis precisam ser consideradas para a melhor calibração (GOULART, 2015).

Sousa e Soares (2015) realizam a otimização do bombeamento de uma rede de distribuição de água, buscando minimizar as pressões no sistema e conseqüentemente reduzir os vazamentos e o consumo de energia de seu acionamento. Para isso, utilizaram da junção do algoritmo genético multiobjetivo SPEA com o toolkit do EPANET.

O resultado apresentado foi satisfatório, mostrando a possibilidade de uma estratégia operacional ótima da operação da rede, pois obtiveram uma redução de 23,2% dos custos com energia elétrica e uma redução de 5% de perdas no sistema. Com isso, ocorreu um aumento de confiabilidade da operação do sistema, pois o sistema apresentou uma operação mais otimizada (SOUSA e SOARES, 2015).

### **3.5 Método de busca aleatória baseado em Monte Carlo**

O Método de Monte Carlo é uma técnica matemática utilizada para simular problemas que possuem variáveis aleatórios, ou seja, usa de números aleatórios para resolução de problemas que podem ser retratados por meio estocásticos (YORIYAZ, 2009).

Para a aplicação dessa metodologia, são necessárias algumas medidas, que estão exemplificadas a seguir (WERNER et al., 2011):

- a) Definir as variáveis envolvidos no problema a ser simulado;
- b) Determinar os limites de variação das variáveis;
- c) Instituir a relação entre as variáveis; e
- d) Estabelecer o número de simulações necessárias.

Com isso, as variáveis envolvidas precisam ser descritas por uma função de densidade de probabilidade. Ou seja, são funções positivas que retratam a distribuição da probabilidade quando se trata de variáveis aleatórias e contínuas (ESTEVÃO, 2009).

A utilização de números aleatórios na computação não é muito favorável, pois não permitem replicação. Dessa forma, para a computação, é mais viável a aplicação de números pseudoaleatórios que são mais eficientes, permitindo infinitas simulações, com valores independentes e com distribuição uniforme (ESTEVÃO, 2009).

O emprego dessa ferramenta na simulação computacional traz alguns benefícios, como a possibilidade de avaliação de erros de estimativa, além de não ser necessário conhecer

inicialmente as expressões analíticas que modelam o problema (PAPAIOANNOU et al., 2015).

### **3.6 EPANET e sua utilização nas redes de distribuição**

As redes de distribuição de água são estruturas complexas, compostas por inúmeros componentes interligados entre si, operando sobre diversas condições (TARDELLI FILHO, 2016; LIMA et al., 2019). Dessa forma, *softwares* são desenvolvidos para possibilitar realizar estudos sobre elas. Esses programas possibilitam a simulação das redes para condições operacionais, auxiliando no dimensionamento e na escolha do tipo de sistema de controle de pressão; executam cálculos das perdas físicas de água por vazamento nos subsetores, simulam perdas com novas condições de pressão, avaliam a economia da água, calculam a relação entre o custo e o benefício, entre outros (LETTING; HAMAM; ABU-MAHFOUZ, 2017).

Dentre os *softwares* existentes, o que mais se destaca é o EPANET por ser um *software* gratuito que permite analisar o desempenho hidráulico e a qualidade da água das redes de distribuição, por meio de simulações dinâmicas e estáticas. Possui o código aberto, o que permite modificação e interações com outros pacotes de acordo com a necessidade do usuário (SELA; SALOMONS; HOUSH, 2019).

Foi elaborado pela *United States Environmental Protection Agency* (US EPA) a versão brasileira chamada de EPANET 2.0, que foi desenvolvida pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), da Universidade Federal da Paraíba – UFPB. E seu sistema tem compatibilidade com diversos sistemas operacionais (ROSSMAN, 2009).

O programa admite diversas situações de simulação da rede e tem como destaque ferramentas como número ilimitado de componentes da rede; cálculo da perda de carga com base nas fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning; modelagem de válvulas, bombas e reservatórios (nível variável ou não); cálculo da energia das bombas e o custo de operação; múltiplas escolhas das condições de operação da rede, além da modelagem da qualidade da água (IGLESIAS-REY; MARTÍNEZ-SOLANO; RIBELLES-AQUILAR, 2017).

Segundo Araujo et al. (2020), para a simulação de rede, alguns dados de entrada são necessários, como o traçado da rede, a posição dos trechos e a cota dos nós que a representam, o consumo base, o diâmetro das tubulações e informações dos reservatórios, como cota e nível de água.



Com base nos dados de entrada, o *software* gera as simulações e permite obter dados de vazão e velocidade nos trechos, pressão nos nós, altura do nível de água em cada reservatório, a direção da água, o tempo de permanência na rede e a concentração de substâncias na água (IGLESIAS-REY; MARTÍNEZ-SOLANO; RIBELLES-AQUILAR, 2017; ARAUJO et al., 2020). Os resultados são gerados por meio de mapas de rede coloridos, tabelas e gráficos de isolinhas ou de séries temporais (ROSSMAN, 2009).

A interface do EPANET 2.0 é simples e de fácil utilização. Há uma janela principal, chamada de Mapa de Rede, onde é traçada a rede e os resultados da simulação são apresentados. A janela secundária, com o navegador, permite selecionar quais simulações serão realizadas e a barra de ferramentas.

A Figura 3.7 apresenta sua interface para um novo projeto.

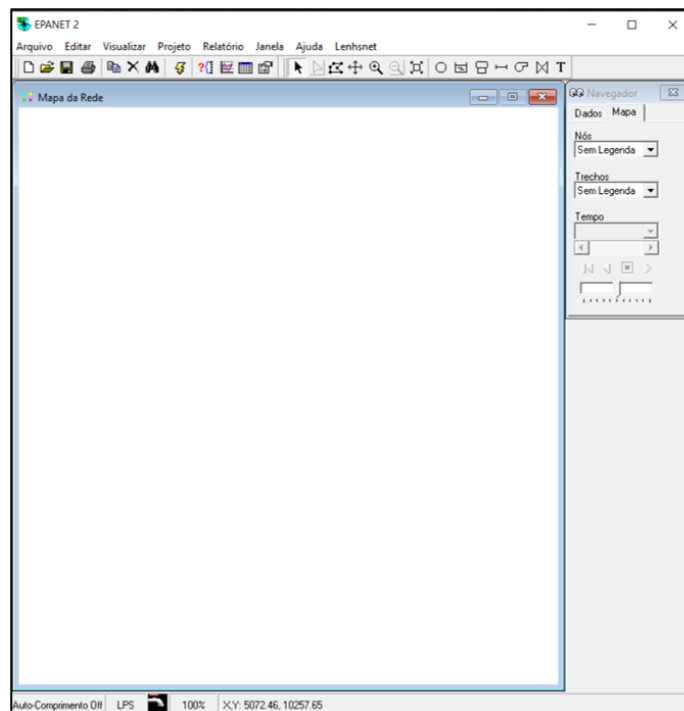


Figura 3.7 - Interface do EPANET 2.0 – Brasil.

Fonte: Adaptado de Rossman (2009)

Devido ao fato de a utilização do EPANET ser bem disseminada, por ter o código aberto e ser de livre acesso, ele possui um pacote chamado Toolkit, que contém todas as funções de cálculos hidráulicos. Ela foi desenvolvida em linguagem C e tem sua distribuição livre. Com isso, qualquer usuário pode adequar as simulações à sua necessidade (ABE, 2014).

Sua aplicação é feita em diversos estudos, como o apresentado por Kellner e Tinti (2017), que utilizaram da capacidade de análise hidráulica do EPANET para o dimensionamento de três redes de distribuição de água do município de São Carlos – SP,

considerando dois parâmetros como principais: a velocidade máxima de escoamento e a perda de carga unitária máxima nas tubulações. Com isso, buscaram determinar o menor diâmetro possível que poderia ser utilizado na rede.

Outra aplicação do EPANET foi apresentada por Jericó et al. (2013), em que avaliaram o funcionamento da rede de distribuição da cidade de Várzea Alegre – CE, quanto ao atendimento das pressões, problema enfrentado em alguns pontos.

Na análise da rede, encontraram os pontos mais críticos em que a pressão era inferior à recomendada por norma (10 mca). Isso mostra a importância da utilização de modelagem computacional no gerenciamento de redes (JERICÓ; FERNANDES; SILVA, 2013).

Araujo et al. (2020) empregaram o *software* EPANET como ferramenta de simulação estática e dinâmica do comportamento hidráulico e de qualidade da água na rede de abastecimento dos bairros Prata, São José e Centro, da cidade de Campina Grande – PB, administrada pela CAGEPA, para determinar os indicadores de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Com base nas simulações, o principal problema foi de operação da rede Centro, sendo a solução a adição de novos reservatórios de alimentação com o regime regular.

Ávila et al. (2019) aplicaram uma extensão do EPANET, o WaterNetGen, que permite a avaliação de vazamentos, adaptado para solucionar um modelo operacional ideal. Realizaram a comparação da simulação para vazamento da rede sem e com as válvulas redutoras de pressão.

O estudo ocorreu na cidade de Azogues, no sul do Equador, e o resultado encontrado possibilitou verificar a rede já existente quanto aos vazamentos, buscando otimizar sua operação na redução das perdas com uma ação simples de instalação de acessórios nela (ÁVILA et al., 2019).

Outra aplicação do EPANET pode ser observada no estudo de Silva (2020), que utilizou dessa ferramenta para desenvolver um modelo hidráulico da estação elevatória da rede de distribuição da cidade de Guarabira-PB.

Com a modelagem, foi possível a análise da eficiência energética sobre diversos cenários dinâmicos da operação da estação elevatória. Assim, foi possível verificar qual era a melhor operação do sistema motor bomba que permitia a redução do consumo de energia elétrica, além de buscar a melhor configuração que possibilitasse a eficiência do sistema (SILVA, 2020).

Kepa (2021) analisou o funcionamento de uma rede de abastecimento de água, por meio de simulações no EPANET. Essa rede fornece água para seis pequenas cidades da

Polônia. A área de abastecimento corresponde a 50 km<sup>2</sup> com uma população estimada de 6130 habitantes. O fornecimento é variável bem como as condições de demandas.

A simulação permitiu conhecer a rede, como os pontos de alta pressão, os de déficits de abastecimento, bem como a vazão em cada trecho. Assim, o resultado encontrado foi que a operação da rede não era estável. Com isso, é possível definir qual é o melhor funcionamento e os mecanismos de manobras que solucionam a questão (KEPA, 2021).

Chaveiro e Isidoro (2021) utilizaram do EPANET 2.0 para estudar a rede de distribuição de água da cidade de Reguengos de Monsaraz, localizada em Portugal. A rede apresentou problemas no desempenho hidráulico, com pontos de pressão, velocidade de escoamento e caudal, fora dos padrões adequados para o melhor funcionamento.

Com base nesses dados, foi possível obter um maior controle da rede, com a substituição das tubulações, a criação de Zonas de Medição de Controle para o monitoramento, e, com isso, obter uma rede mais eficiente (CHAVEIRO; ISIDORO; 2021).

Dessa forma, observa-se que a modelagem matemática é uma ferramenta fundamental para avaliar e solucionar problemas como a detecção de pontos de alta pressão e propensos a vazamento, a avaliação da qualidade da água transportada no sistema, a aferição da capacidade de expansão e ampliação da prestação de serviço em áreas acima do nível de pressão, entre outros (ÁVILA et al., 2019).

### **3.7 Operação de redes de distribuição de água**

As redes de distribuição de água são formadas basicamente por reservatórios, estação elevatória, tubulações e válvulas responsáveis por levar água das estações de tratamento ao consumidor final (KURIAN et al., 2018).

Sua alimentação pode ser por meio de reservatórios elevados, apoiados, semienterrado e enterrado, ou por meio de estações elevatórias com bombas de rotação constante e/ou variável ou tanque hidropneumático (TSUTIYA, 2006).

O fornecimento por meio de reservatórios pode ter sua instalação a montante ou a jusante da rede, como mostrado nas Figuras 3.8 e 3.9. Nesse tipo de abastecimento, pode haver a necessidade de instalação do reservatório de sobra para manter a pressão da rede nos períodos de maiores consumos (Figura 3.10) (TSUTIYA, 2006).

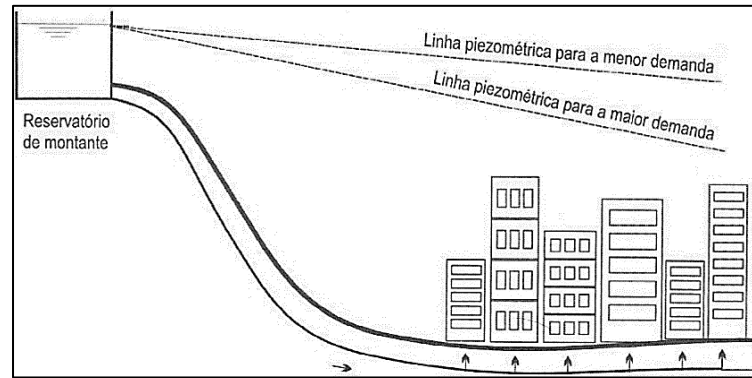


Figura 3.8 - Reservatório de montante.

Fonte: Freire (2016)

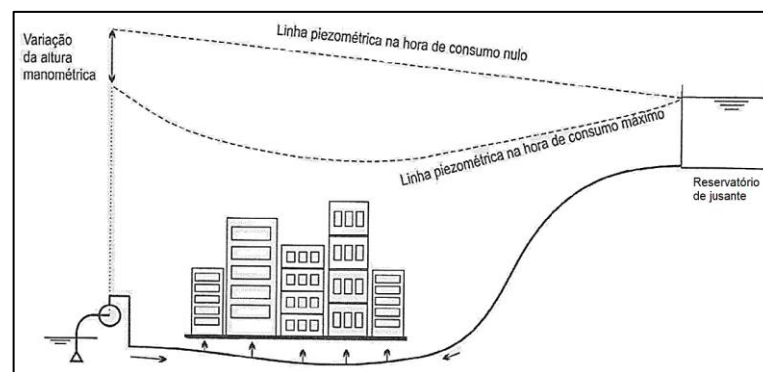


Figura 3.9 - Reservatório de jusante.

Fonte: Freire (2016)

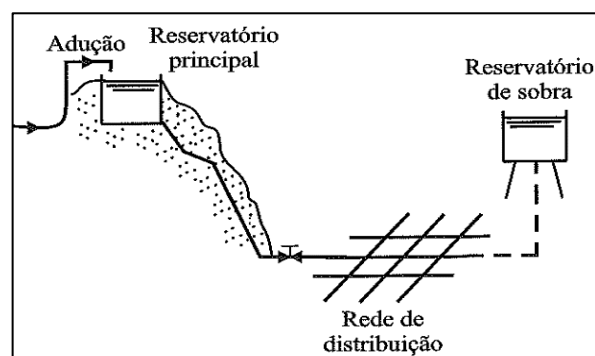


Figura 3.10 - Reservatório de sobra.

Fonte: TSUTIYA (2006)

Também, no abastecimento por bombas, a utilização do reservatório de sobra poder ser essencial para a regularização do funcionamento da bomba. Esse arranjo também permite a alimentação direta da rede em vários pontos (TSUTIYA, 2006).

O fluxo do abastecimento de água pode ser de dois tipos, contínuo ou intermitente. No contínuo, a água é fornecida a todo o momento ao consumidor. Nesse tipo de abastecimento, as tubulações são pressurizadas ao longo do dia e o consumo é feito de acordo com as

necessidades do usuário. Já no fornecimento intermitente, o abastecimento é realizado uma ou duas vezes ao dia com duração de algumas horas, obrigando o consumidor a armazenar a água. Sua utilização se dá pela necessidade de limitar a quantidade de água fornecida, devido à escassez hídrica (KURIAN et al., 2018).

Em todo o processo dos sistemas de abastecimento de água, as redes de distribuição sofrem mais com a falta de manutenção e operação adequadas, por estarem enterradas nas vias públicas e em locais de difícil acesso (TSUTIYA, 2006).

Para Tardelli Filho (2015), há uma valorização da construção de novos sistemas de distribuição, em detrimento da operação e da manutenção dos existentes. Com isso, ocorre uma degradação das tubulações, levando ao seu rompimento e, conseqüentemente, a vazamentos, que são os maiores problemas das redes.

Ainda segundo o autor, existem outros problemas comuns na operação dessas redes, como a falta de água devido à oferta insuficiente, tubulações subdimensionadas ou mesmo entupidadas, variações de pressão, água inapropriada ao consumo devido a vazamentos ou corrosão das tubulações e cadastro desatualizados ou inexistentes.

Existe um conhecimento geral sobre a operação de redes de distribuição de água, que é de exclusivamente ligar e desligar bombas ou abrir e fechar válvulas. Mas seu funcionamento vai muito além disso e envolve basicamente (TARDELLI FILHO, 2015):

- Dispor de um cadastro técnico e comercial atualizado e confiáveis;
- Monitorar as vazões na entrada dos reservatórios, das estações elevatórias e de áreas específicas da rede, além dos pontos de pressão importantes;
- Verificar se as variáveis operacionais estão de acordo com as normas;
- Utilizar de indicadores de performance operacional e gerencial;
- Desenvolver relatórios das variáveis da operação do sistema aferido em todos os setores da rede e zonas de pressão.

Para Ougui (2003), a operação de um sistema de distribuição de água engloba inúmeros fatores, entre eles o custo de funcionamento das bombas, instaladas ao longo da rede, com o objetivo de suprir as demandas. A questão do bombeamento tem relevância, pois é necessária à sua adequação a distribuição de água à realidade presente dos custos da energia elétrica (OUGUI, 2003). Tal adequação é também conhecida como operação eficiente ou eficiência hidroenergética.

Com isso, inúmeros estudos vêm sendo desenvolvidos para alcançar esse objetivo de otimizar o processo de operação das redes de distribuição de água. O Quadro 1 traz os estudos

sobre operação de redes de distribuição de água desenvolvidos de 1980 a 2018. Foi elaborado a partir do trabalho desenvolvido por Santos (2021), selecionando alguns trabalhos cuja descrição foi acrescentada na coluna desenvolvimento.

Quadro 1 - Estudos sobre operação de redes de distribuição de água.

(continua)

Nº	Autor	Desenvolvimento
1	Coulbeck B. (1980)	Apresentou um controle da operação com a utilização de técnica de otimização hierárquica, por meio de programação computacional.
2	Meyers e Shamir (1982)	Utilizaram de um modelo de otimização linear para determinar a operação ideal de um sistema real de Israel, com o objetivo de reduzir o consumo de energia.
3	Pezeshk et al. (1994)	Trouxeram a aplicação de um algoritmo de otimização não linear para determinar o melhor funcionamento das estações elevatórias, para a redução dos custos de energia do sistema.
4	Righetto (2002)	Apresentou uma metodologia para a otimização de uma rede de distribuição de água fictícia, com a utilização de modelos hidráulicos baseados no escoamento transitório e de modelos de otimização com base em algoritmos genéticos.
5	Biscos et al. (2003)	Utilizaram de um algoritmo MINLP que possibilita a combinação dos elementos ativos e discretos da rede para o controle operacional da distribuição da água na rede.
6	Zyl, Savic e Walters (2004)	Apresentaram um modelo híbrido de otimização de operação de redes de distribuição de água, com a junção do algoritmo genético com uma estratégia de busca de hillclimber.
7	Barros Filho (2005)	Desenvolveu um aplicativo para o gerenciamento de operação de válvulas fundamentado em modelagem de dados espaciais, com o objetivo de otimizar o sistema de distribuição reduzindo as perdas. Para a validação, aplicaram sobre um projeto piloto na cidade de Campina Grande – PB.
8	Wang J. (2007)	Apresentaram uma estratégia de controle da operação de redes de distribuição de água com o uso conjunto de diferentes técnicas de controle sobre diferentes cenários operacionais do sistema, por meio da simulação computacional.

Quadro 1 - Estudos sobre operação de redes de distribuição de água.

(continua)

Nº	Autor	Desenvolvimento
9	Salomons et al. (2007)	Trouxeram a aplicação de duas ferramentas para o controle da operação e de previsão de um sistema real de distribuição de água. Para isso, utilizaram da união do algoritmo genético de otimização e a previsão de redes neurais artificiais.
10	Martínez et al. (2007)	Aplicaram um controle operacional em uma rede real, com a junção de modelos de previsão de redes neurais artificiais, para um período de 24 horas e um algoritmo genético de otimização.
11	Shamir e Salomons (2008)	Realizaram o estudo de operação em tempo real de uma rede reduzida, com o objetivo de encontrar uma configuração da operação que trabalha a menor custo, utilizando de algoritmos genéticos.
12	Costa, Ramos e Castro (2010)	Aplicaram um algoritmo genético híbrido com base no EPANET com o objetivo de encontrar a estratégia operacional de duas redes, uma teórica e uma real localizada em Portugal, que apresentasse o custo de energia reduzido.
13	Morais, Cavalcante e Almeida (2010)	Desenvolveram um modelo multicritério com base no modelo PROMETHEE II, com o objetivo de facilitar a identificação de áreas propensas a vazamento.
14	Bezerra, Silva e Gomes (2012)	Demonstraram a aplicação de um de controle de pressão e conseqüentemente redução das perdas, por meio do sistema fuzzy em uma rede de distribuição de água real, utilizando parâmetros da rede como válvulas e rotação das bombas.
15	Soares (2013)	Apresentou uma metodologia multiobjetivo de otimização de redes de distribuição de água com o uso de uma interface responsável pela união dos algoritmos NSGAI e SPEA ao simulador hidráulico, sendo realizado sobre uma rede teórica.
16	Kurek e Ostfeld (2013)	Desenvolveram uma metodologia para auxiliar na tomada de decisão de operação e instalação de bombas e reservatórios de armazenamento, com a utilização do algoritmo Evolutivo de Pareto de Força (SPEA2) conectado com o EPANET.

Quadro 1 - Estudos sobre operação de redes de distribuição de água.

(continua)

Nº	Autor	Desenvolvimento
17	Sousa e Soares (2014)	Utilizaram da integração de dois modelos computacionais, uma correspondendo ao algoritmo evolucionário multiobjetivo SPEA e o outro sendo o simulador EPANET, com o objetivo de minimizar as perdas e com isso reduzir os custos de energia elétrica.
18	Price e Ostfeld (2014)	Desenvolveram um modelo para a operação ideal de rede de distribuição de água com a união de modelos lineares de curta simulação com as restrições hidráulicas não lineares, para a minimização de custo.
19	Odan, Reis e Kapelan (2015)	Trouxeram uma otimização de operação de um sistema real da cidade de Araraquara-SP, com a junção de três modelos, a previsão de demanda em tempo real, a simulação hidráulica e de otimização. Para isso, foram utilizados o EPANET2 e o modelo de previsão DAN2-H.
20	Xu et al. (2015)	Desenvolveram um método para avaliar o impacto da utilização de duas estratégias de operação de redes de distribuição de água; o controle de demanda de usuário e o controle do nível de reservatórios. Com a elaboração de uma abordagem baseada no EPANET e no algoritmo genético.
21	Solgi et al. (2016)	Apresentaram um algoritmo para otimização do cronograma de transporte de água sobre diversos cenários, em um sistema real, operando com escassez hídrica, sendo a pressão a chave do cronograma.
22	Marchi, Simpson e Lambert (2016)	Apresentaram uma nova ferramenta do toolkit do EPANET2, chamada ETTAR, que permite otimizar de operação de bombas considerando todas as variáveis envolvidas em seu funcionamento. Sua aplicação foi realizada sobre um estudo de caso mostrando a aplicabilidade da ferramenta.



Quadro 1 - Estudos sobre operação de redes de distribuição de água.

(conclusão)

Nº	Autor	Desenvolvimento
23	Gamboa-Medina (2017)	Aplicou de três métodos para determinar o aparecimento de vazamentos em tubulações, utilizando de dados de pressão adquiridos de uma rede real de distribuição. Os modelos foram baseados em cadeia de Markov, controle estatístico de processo e em comparações de padrão.
24	Haddad et al. (2017)	Aplicaram de algoritmo ASO com avaliação de funções de benchmark matemático para o estudo de funcionamento de reservatórios, bem como a localização e o nível de água.
25	Samir et al. (2017)	Realizaram a modelagem de cenários de operação de uma rede real no Egito com o objetivo de reduzir os vazamentos de água do sistema, sendo a pressão e o comprimento das tubulações as variáveis consideradas.
26	Gupta e Kulat (2018)	Realizaram a aplicação de um algoritmo genético multiobjetivo (NSGA-II) para o gerenciamento ótimo de pressão do sistema de distribuição da água da cidade de Nagpur na Índia, utilizando como variáveis a variação de velocidade das bombas e as válvulas redutoras de pressão, com o objetivo de reduzir as perdas de água.

Fonte: Adaptado de Silva (2021).

Do levantamento realizado sobre os estudos de operação de redes de distribuição observasse que as técnicas mais aplicadas nesse tipo de estudo foram os algoritmos genéticos e/ou a junção desse com o EPANET. Sendo os principais objetivos na maioria dos estudos a redução do custo energético dos sistemas e também a redução de perdas por vazamento desses sistemas, utilizando principalmente de variáveis como as estações elevatórias, válvulas e reservatórios. Além disso, os estudos apresentados variaram entre rede de distribuição teórica e real, sendo que as reais apareceram com maior frequência

Contudo foram apresentadas outras técnicas para a otimização das redes de distribuição, porém não apareceram com periodicidade como os algoritmos genéticos e o EPANET.

Com esse levantamento observasse que os estudos sobre as redes de distribuição não são recentes e o objetivo principal apresentados pela maioria era a otimização da operação, ou

seja, obter um sistema de distribuição mais eficiente, em que o custo de operação e as perdas são pequenos, utilizando preferencialmente, para isso, de simulações.

Além do levantamento realizado alguns outros trabalhos mais recentes sobre o assunto são apresentados a seguir.

Sousa e Soares (2020) que apresentaram um modelo de otimização de operação da rede, por meio de uma rotina computacional compreendendo um simulador hidráulico e os algoritmos genéticos. O objetivo era de diminuir as perdas por vazamento, bem como os custos de energia elétrica utilizada para o funcionamento das bombas, com isso, aumentando a confiabilidade de operação do sistema, atendendo vazões e pressões.

O estudo foi realizado em uma rede hipotética chamada *Anytown*, desenvolvida em 1985 na “Batalha dos Modelos de Rede”, ocorrido na cidade de Nova Iorque. O simulador hidráulico utilizado foi o EPANET, em que as simulações geradas consideraram o período de um dia, com intervalos de uma hora (SOUSA; SOARES, 2020).

Os autores ressaltaram a importância da aplicação de modelos na operação das redes de distribuição, pois seu funcionamento adequado reduz custos e permite uma eficiência hidroenergética. Além disso, possibilita e facilita a tomada de decisão pelas companhias.

Na pesquisa elaborada por Kurian et al. (2018), foi apresentada uma metodologia para a operação ideal das bombas e válvulas das redes, com a finalidade de minimizar a energia consumida quando há variação da demanda. A rede estudada foi proposta para uma cidade no sul da Índia, que se caracteriza por possuir só uma bomba no sistema que abastecia oito reservatórios.

Os resultados apresentados pelos autores demonstraram que a operação ideal da rede de distribuição de água proposta sucede com a instalação de reservatórios de armazenamento intermediário. Também que a aplicação de um cronograma de atuação das bombas e válvulas que reduz o consumo de energia e diminui o tempo de atividade diária das bombas. Com isso, o sistema é mais eficiente com um menor custo da atividade e maior produção (KURIAN et al., 2018).

O método proposto por Zhang et al. (2020) consiste em otimizar a operação da rede real de distribuição de água com foco na pressão. A rede estudada tem área de 250 km<sup>2</sup> que abastece quase 2 milhões de usuários, na cidade de Xangai na China. O modelo foi baseado em outros modelos para otimização de pressão de redes, em que a pressão entregue aos consumidores é otimizada no ajuste da pressão de saída da bomba.

Nessa metodologia, a pressão do sistema é retratada pela pressão dos nós chaves e das bombas principais, embasada em cálculos dos métodos de transferência e do método de simplificação de rede, em que os inúmeros modelos lineares são utilizados para a relação de transferência de pressão. Ou seja, os dados reais coletados na rede de Xangai são comparados com métodos heurísticos existentes (ZHANG et al., 2020).

A aplicação desse método mostrou eficácia na otimização das pressões, mantendo o atendimento de forma eficiente da rede e diminuindo a probabilidade de vazamento e consumo de energia elétrica. Ademais, é de fácil aplicação em redes existentes (ZHANG et al., 2020).

Chen et al (2021) trouxeram um estudo sobre operação otimizada das estações de bombeamento aplicada a uma rede genérica. O modelo consiste em integrar a operação de bombeamento da rede em dois estágios (captação e abastecimento) com um algoritmo genético (NSGA-II), com o objetivo de garantir confiabilidade, eficiência e durabilidade da operação e a minimização de custos de funcionamento, baseado no controle de nível dinâmico dos reservatórios de água tratada.

Os resultados apresentados expõem que o método utilizado reduz significativamente os custos operacionais de energia do sistema, atendendo aos objetivos expostos, além de manter o funcionamento adequado das bombas e impedir o transbordamento ou esvaziamento dos reservatórios de água (CHEN et al., 2021).

### **3.8 Software R e suas aplicações**

O R é um programa estatístico de desenvolvimento integrado com código aberto, o que possibilita sua utilização sem licença e possui compatibilidade com diversos sistemas operacionais (OLIVEIRA; GUERRA; MCDONNELL, 2018). Apresenta uma grande coleção de pacotes adicionais também gratuitos que são encontrados no servidor CRAN (The Comprehensive R Archive Network), uma rede que armazena as versões e modernizações dos pacotes do R (CRAN, 2021).

A diversidade de pacotes do *software* permite a resolução de rotinas de estatística simples até a resolução de problemas complexos relacionados às diversas áreas da ciência, como engenharia, ciências sociais, economia, saúde, entre outras (KONRATH et al., 2018).

O funcionamento do R é basicamente por meio de linhas de comando com uma única janela, o que dificulta a utilização do programa por iniciantes e torna o processo pouco produtivo para usuários experientes (OLIVEIRA; GUERRA; MCDONNELL, 2018). Para

facilitar a utilização desse *software*, foram desenvolvidas interfaces gráficas, como o RStudio (RACINE, 2012).

O RStudio tem a função de armazenar as funcionalidades do R em uma única interface, tornando ações de importação e manipulação de dados, sequenciamento de comandos e apuração de resultados e gráficos mais acessíveis aos usuários (HENNING et al., 2016).

A tela do programa é dividida em 4 janelas, representadas na Figura 3.11. A janela 1 corresponde ao Editor de Código, onde são inseridos os comandos da programação; a 2 refere-se ao console, que gera os principais resultados, sendo a mesma janela apresentada no R; a terceira armazena o histórico dos comandos que foram utilizados na programação; e a última janela possui os pacotes do R, o gerenciador de arquivos, a visualização de gráficos e a ação ajuda (KONRATH et al., 2018; OLIVEIRA; GUERRA; MCDONNELL, 2018).

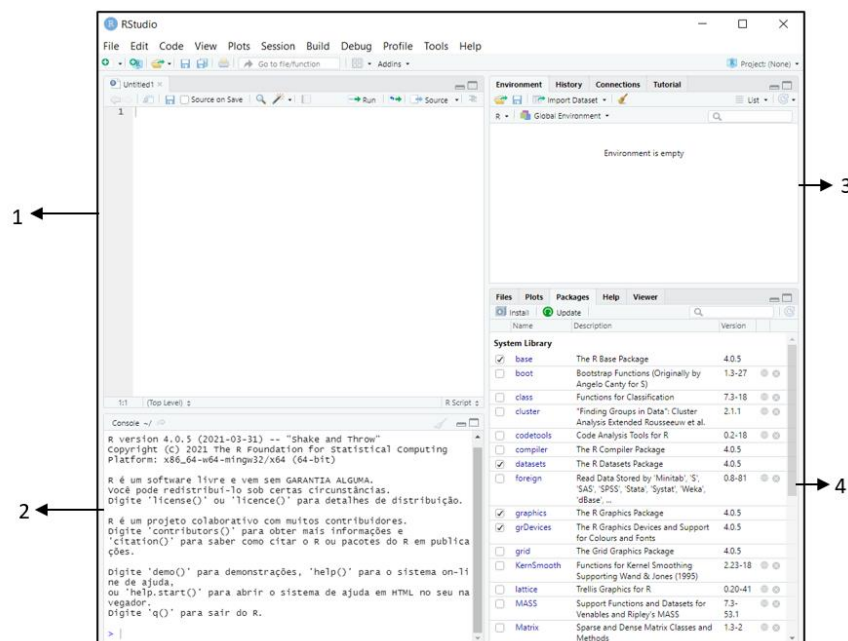


Figura 3.11 - Tela do RStudio.

Fonte: Adaptado de Oliveira P.; Guerra; Mcdonnell (2018)

Vários são os pacotes disponíveis para o R que permitem realizar os estudos das mais diversas áreas do conhecimento. Assim, a seguir, estão descritos alguns exemplos.

O *Hydraulics* é um pacote do R, utilizado para cálculos hidráulicos de fluxo de água em tubos circulares sob pressão, em fluxo gravitacional e em canais trapezoidais abertos. Sua aplicabilidade inclui análise de perdas de atrito por meio da equação de Darcy-Weisbach para parâmetros de perda de carga, velocidade ou diâmetro e plotagem do diagrama de Moody (MAURER, 2019).

Lima e Silva (2021) apresentaram o pacote *Soilphysics* que simula a compactação do solo causada pelo trânsito agrícola. Sua aplicação permite calcular o estresse de contato e a sua propagação no solo, a variação da densidade a granel como resposta ao estresse aplicado e o risco de compactação com base nas propriedades físicas e mecânicas do solo. Dentre os pacotes mencionados, este é o mais completo, com trinta e seis funções, possibilitando realizar inúmeros ajustes no modelo (LIMA; SILVA; SILVA, 2021).

Outro pacote relevante é o *Evapotranspiration*, elaborado para avaliar dados de evapotranspiração real e potencial com 17 formulações hidrológicas diferentes, corroborando com os cálculos necessários para que cada formulação seja implementada, além de ferramentas adicionais que realizam a associação entre evapotranspiração estimada e variáveis climáticas como radiação solar, umidade relativa e temperatura (PLAKIDAS; SCHALL; ZDUN, 2017).

Bar e Mentch (2017) desenvolveram uma ferramenta conhecida como R- CMap, que permite aos usuários gerar parcelas variadas, incluindo mapas de cluster, além de correspondências de padrões e plots de zonas de partida. Os resultados podem ser elaborados por relatórios com os resumos estatísticos, possíveis de serem incorporados a ferramentas do Microsoft Office (BAR; MENTCH, 2017).

O pacote WRSS (Water Resources System Simulator), desenvolvido por Arabzadeh et al. (2021), é uma ferramenta que realiza simulações de sistemas de recursos hídricos de larga escala com base na Política de Operação Padrão. Essa política tem o objetivo de enviar a quantidade de água que é necessária na demanda, caso seja possível ao sistema.

O pacote permite a construção de modelos de abastecimento de água e energia, manipulação de componentes dessas redes e desenvolvimento de cenários. Além disso, tem a capacidade de analisar a oferta e a demanda dos sistemas, incluindo componentes complexos, como vários reservatórios, desvios, rios, aquíferos, junções de nós, até a análise de energia hidrelétrica (ARABZADEH et al., 2021). Esse pacote de simulação de recursos hídricos está disponível para download na plataforma do R o CRAN.

Os autores ainda apresentaram um estudo de caso em que o pacote foi utilizado, como forma de demonstrar sua aplicabilidade. O estudo ocorreu na bacia de Zerrine-rud, no Irã, com uma área de cerca de 4700 km<sup>2</sup>. As operações realizadas foram duas. A primeira consistiu em analisar a capacidade de um dos reservatórios sobre diferentes abordagens e, na segunda, foi simulado um sistema em larga escala com 5 reservatórios e 11 nós de demandas.

### 3.9 *Software R e EPANET aplicado em redes de distribuição de água*

A ligação entre o EPANET e o *Software R* possibilitou a interação de um programa de simulação hidráulica com um de análise estatística, ampliando o estudo e o conhecimento.

O pacote *epanetReader* possui a função de implementar a análise de arquivos de texto do EPANET em ambiente R, contribuindo com os inúmeros pacotes R disponíveis para modelagem de recursos hidráulicos (ECK, 2016).

Segundo Eck (2016), sua função básica é de analisar os arquivos de textos gerados no EPANET no ambiente R. Também abrange outras funções, como a manipulação e a visualização de objetos resultantes da decodificação de arquivos, a ajuda que auxilia na plotagem, e a produção de gráficos que contribui para a análise visual da rede modelada.

Para utilizar a ferramenta no R, ela precisa ser baixada, instalada e carregada no R. Assim, as funções `read.inp()`, `read.rpt()` e `read.msxrpt()` podem ser utilizadas, retornando uma lista nomeada que contém dados do arquivo do EPANET bem como o atributo da classe para o valor correspondente (ECK, 2016).

O *epanet2toolkit* é uma ferramenta que permite acessar os mecanismos de simulação do EPANET no ambiente R. Essa ferramenta funciona como um invólucro para o EPANET; assim, as funções do EPANET API (Interface de programação de aplicativos) são as mesmas no R. Contudo, há uma divergência no parâmetro retornado quando a função é acionada. Ou seja, ela foi projetada para exportar as funções do EPANET API para o ambiente R, efetuar a análise dos argumentos pedidos, verificar os erros e retornar o parâmetro solicitado (ARANDIA; ECK, 2018).

Segundo Arandia e Eck (2018), a ferramenta para ser utilizada no R precisa ser instalada e carregada dentro do ambiente R com os comandos *install.packages* e *library* respectivamente. Sendo assim, o carregamento precisa ser inserido toda vez que houver uma nova iteração.

Ainda segundo os autores, para a realização de uma simulação hidráulica completa de uma rede, o comando *ENepanet* deve ser inserido. Ele escreve os resultados em um arquivo de relatório (.rpt) a partir de um arquivo de entrada (.inp) gerado pelo EPANET.

Outra função apresentada, *ENset* e *ENget*, permite acessar e modificar as propriedades da rede. Mas, para realizar essa interação, é necessário iniciar o motor para a leitura de arquivos EPANET, com o *ENopen*, e, após finalizadas as linhas de comando, o motor precisa ser finalizado com *ENclose* (ARANDIA; ECK, 2018).

A ferramenta também permite a utilização conjunta com outras ferramentas disponíveis no R, como a calibração de otimização da rede para determinado parâmetro ou a previsão de demanda por meio de simulação estocásticas. Possibilita-se, assim, uma série de aplicações dinâmicas. Além disso, o pacote possui uma rede hipotética denominada Net1, que permite a realização de estudos hidráulicos (ARANDIA; ECK, 2018).

Ainda são muito poucos os trabalhos que se utilizam dessa ferramenta para os estudos de redes de distribuição de água, pois foram realizadas muitas buscas, mas poucos trabalhos que aplicaram o *epanet2toolkit* foram encontrados.

Assim, Macedo (2020) trouxe, em seu estudo, a ferramenta apresentada, aplicando-a em uma rede teórica, com comportamento semelhante à rede real. Foi realizada a modificação do nível do reservatório, presente na rede de estudo, em três diferentes simulações, analisando estatisticamente o comportamento dos nós, comparando com o estabelecido na norma NBR 12218/17, que determina os parâmetros para as redes de distribuição de água para abastecimento público.

Ainda, segundo o autor, a utilização dessa ferramenta permitiu automatizar o processo da análise da rede de distribuição estudada, além de apresentar resultado satisfatório em relação à interação entre os programas e a rede.

A pesquisa desenvolvida por Barbedo (2022) também apresentou a ferramenta de acoplamento dos *softwares* R e EPANET. Em seu estudo, foi avaliada a capacidade de uso do pacote para a calibração de uma rede fictícia, mas com comportamento de uma rede real. A aplicação foi feita através da definição de cenários aleatórios de rugosidade das tubulações da rede, pois é o parâmetro que interfere mais diretamente na pressão.

Com isso, 10000 cenários foram criados até que o cenário ótimo fosse encontrado para a calibração da rede. Para isso, foi feita a comparação entre a pressão base com as pressões de cada cenário, encontrando a relação que apresentasse o menor erro e, conseqüentemente, os melhores valores de pressão para a rede (BARBEDO, 2022).

A aplicação desses dois *softwares* para as redes de distribuição de água não é muito difundida na área acadêmica. Porém, já há universidades que utilizam dessas ferramentas para a formação de seus alunos, como é o caso da universidade do país Basco, na Espanha. Sua utilização é feita em problemas reais, permitindo a união entre o conhecimento teórico e prático por meio de ferramentas computacionais (BERASTEGI; ARRIBA, 2017).

Assim, a utilização do pacote apresentado é vantajosa, pois permite associar dois programas, o EPANET e R, e, com isso, ampliar o conhecimento sobre as redes. Além disso,

possibilita a interação com vários outros pacotes disponíveis na comunidade, reforçando sua utilização e contribuição na resolução de problemas hidráulicos.

Contudo, a utilização dessa ferramenta em estudo de redes de distribuição de água sobre a operação desses sistemas, considerando os parâmetros de seu funcionamento, não foram encontrados, apesar de terem sido realizadas várias buscas na literatura atual. Com isso, o estudo desenvolvido se torna relevante por tratar de uma ferramenta nova para o estudo de operação de redes de distribuição de água.



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho desenvolvido foi dividido em sete etapas, de acordo com a Figura 4.1.

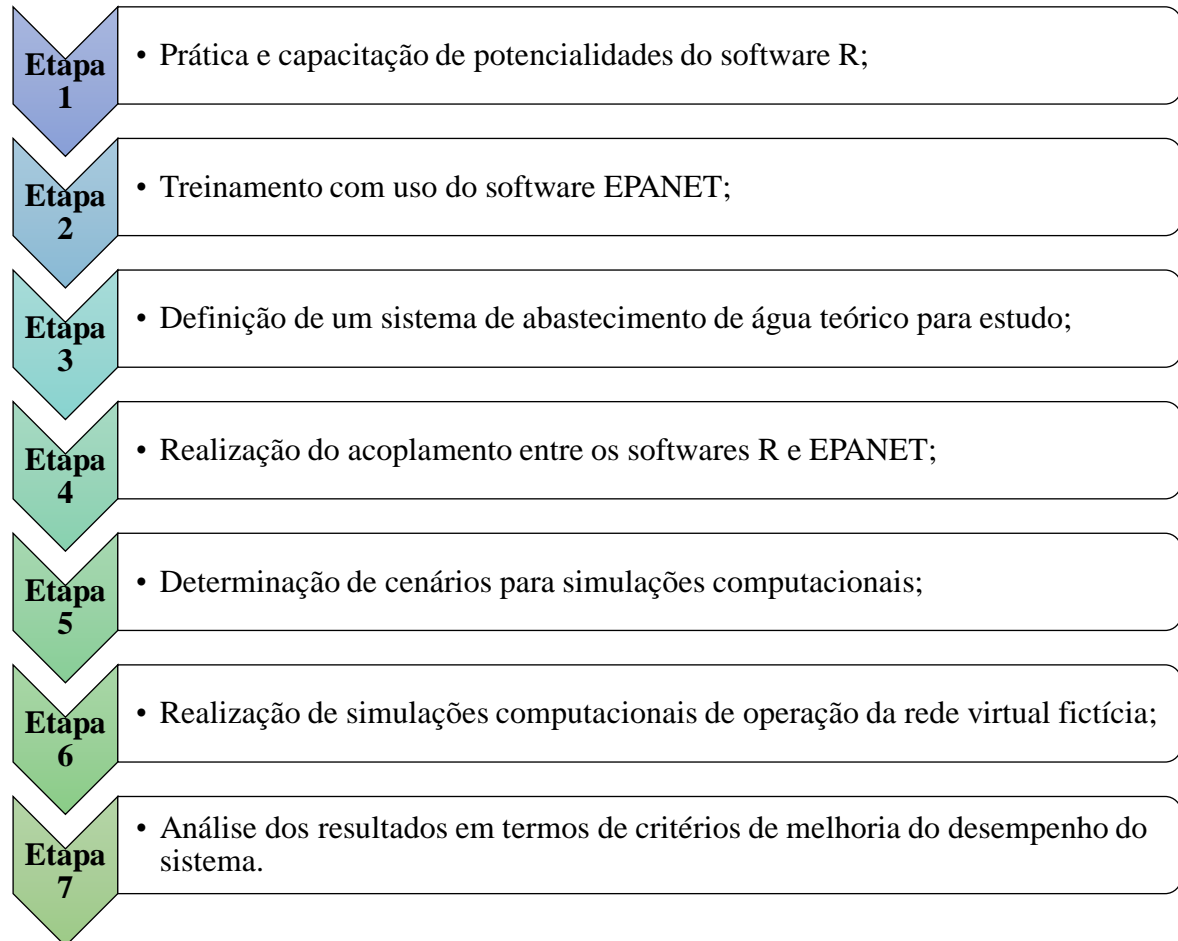


Figura 4.1 - Fluxograma das etapas de metodologia do estudo

Fonte: Próprio autor (2021)

### 4.1 Etapa 1: Prática e capacitação de potencialidades do *software R*

A primeira etapa da pesquisa consistiu em estudar a linguagem R buscando entender o seu funcionamento e suas particularidades. Dos ambientes existentes para a utilização da linguagem, o escolhido foi o RStudio, por possuir uma interface que torna muito mais acessíveis as capacidades do R, como manipulação de dados, sequenciamento de comandos e análise de resultados (HENNING et al., 2016).

A Figura 4.2 apresenta a interface do RStudio, em que os estudos e exercícios foram realizados.

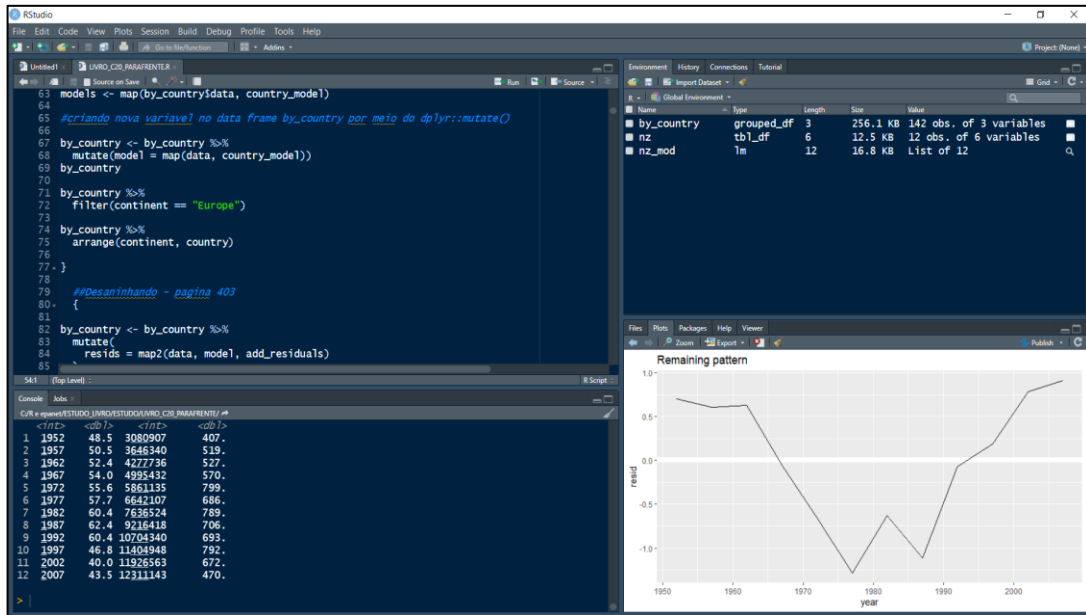


Figura 4.2 - Interface do RStudio utilizada no estudo.

Fonte: Próprio autor (2022).

Para o conhecimento e a prática da linguagem, utilizou-se da versão gratuita (022.02.1+461/177.27 MB) disponibilizada no endereço eletrônico do RStudio e instalado no sistema operacional Microsoft ® Windows 10 (64 bits).

Dentre os materiais disponíveis sobre o R, os utilizados no estudo foram a apostila “Ciência de dados com R: Introdução” de Oliveira, Guerra e McDonnell (2018) do Instituto Brasileiro de Pesquisa e Análise de Dados (IBPAD) e o livro “R para *data science*”, de Wickham e Grolemund (2019). Esses materiais permitiram o conhecimento teórico da linguagem como, manipulação e leitura de dados, escrita de comandos, análise dos resultados com a geração de gráficos e tabelas.

Com o estudo realizado nesta fase, foi possível entender vários elementos do R, como os objetos que são elementos que se diferem conforme o tamanho e o tipo de entrada armazenada em seu “espaço”. Ou seja, é um local na memória do computador onde é gravado um valor ou resultado de um comando, por meio de um nome dado a ele (OLIVEIRA; GUERRA; MCDONNELL, 2018).

Os objetos que existem no R são muitos; contudo, alguns desses se destacam por serem básicos. Os vetores são uma série de elementos de mesma natureza, podendo ser numéricos ou caracteres; as matrizes também são elementos de mesma natureza, ordenadas em coluna e linhas; os data frames são semelhantes às matrizes, porém aceitam dados de tipos diferentes; as listas se caracterizam por um conjunto de vetores, data frames ou matrizes,

podendo não ter o mesmo tamanho e as funções que são importantes para transformar o R de uma simples calculadora em uma ferramenta de análise (LANDEIRO, 2011).

Assim, as funções são determinadas como sendo uma sequência de comandos desenvolvidos para serem empregados de maneira simples, aos mais diversos graus de complexidade das análises (OLIVEIRA; GUERRA; MCDONNELL, 2018).

Outro ponto importante do R é a possibilidade de apresentação dos resultados por meio de gráficos, que permitem uma visualização mais completa dos dados gerados, permitindo encontrar, com maior facilidade, os padrões de ocorrência e os eventos extremos e particulares (NAVEIRO; OLIVEIRA; MAÇAIRA, 2016). Porém, para determinar qual tipo de gráfico utilizar, é necessário conhecer o que se deseja representar, pois é o objetivo que determina o melhor tipo de gráfico para representar os dados (OLIVEIRA; GUERRA; MCDONNELL, 2018).

O R possibilita a criação de inúmeros tipos de gráficos; contudo, os mais tradicionais podem ser gerados a partir da lógica de camadas do ggplot2 e dos objetos geométricos. Com isso, é possível alegar que há uma *template* básica para sua criação, onde as seções com < > podem ser substituídas por dados, função geométrica ou uma coleção de mapeamentos e a parte central corresponde ao tipo de gráfico que será criado (WICKHAM; GROLEMUND, 2019, p. 6). A Figura 4.3 traz esse *template*.

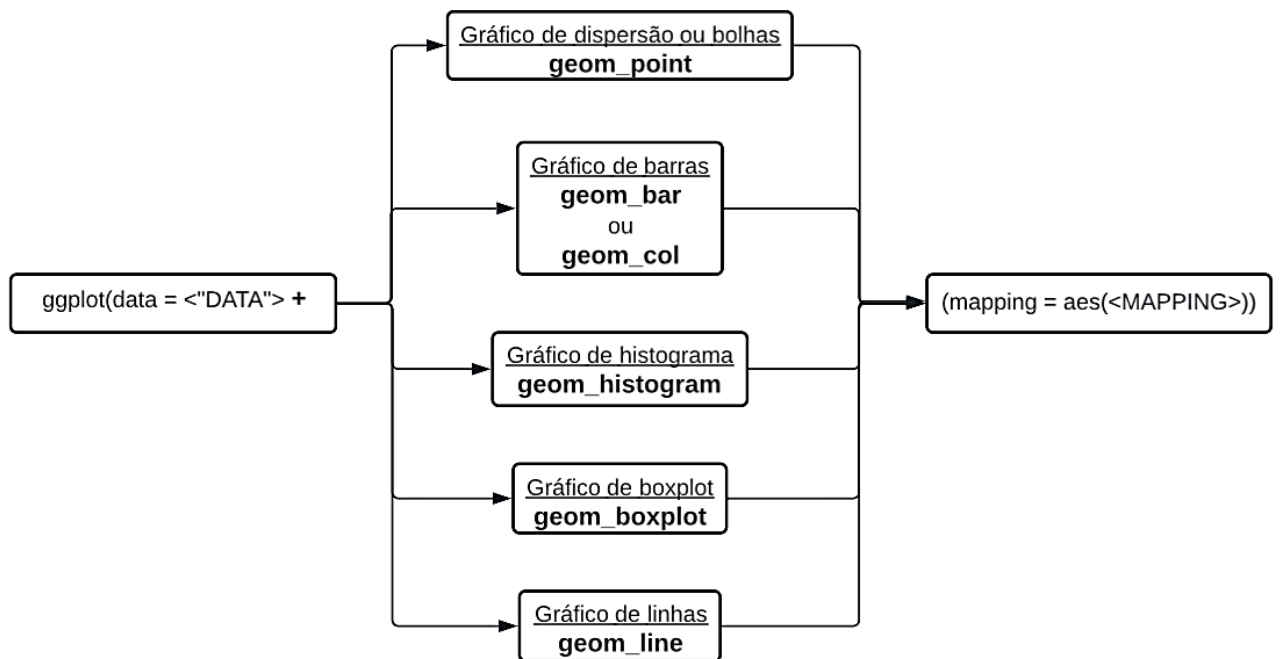


Figura 4.3 - Template básico para gerar gráfico no R.

Fonte: Adaptado de Oliveira, Guerra e McDonnell (2018).

Além disso, essa fase possibilitou também conquistar maior contato com alguns pacotes mais utilizados em rotinas do R que estão disponibilizados em sua comunidade. Esses pacotes são *stringr*, *forcats*, *lubridate* e o *tidyverse*, que é um pacote que abrange outros. Dentre os pacotes que ele engloba, destaca-se o *ggplot2*, *tibble*, *tidyr*, *readr*, *purrr*, *dplyr* que são considerados os núcleos do *tidyverse* e são os mais aplicados segundo Wickham e Grolemund (2019) nas análises. Dessa forma, foi possível entender como manipular, explorar e visualizar os dados.

#### **4.2 Etapa 2: Treinamento com uso do *software* EPANET**

Nesta etapa, foi realizado o estudo do programa EPANET utilizando, como material base, o manual oficial escrito por ROSSMAN (2009). Para iniciar os estudos, foi baixada a versão brasileira 2.0 no endereço eletrônico do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) e instalado também no sistema operacional Microsoft® Windows 10 (64 bits).

Após a instalação, os estudos foram iniciados e, dentre os procedimentos estudados, existem alguns que se destacam, como: elaboração do traçado de redes, modificação da posição dos nós, estimativa de consumo base em cada um dos nós, variação de diâmetro e rugosidade das tubulações, variação dos dados de reservatórios fixos ou variáveis, além da leitura de gráficos e tabelas gerados nas simulações.

Uma das redes desenvolvidas durante o estudo está apresentada na Figura 4.4 ela possui um traçado simples com apenas um reservatório, nove nós e doze trechos, com uma configuração de rede malhada.

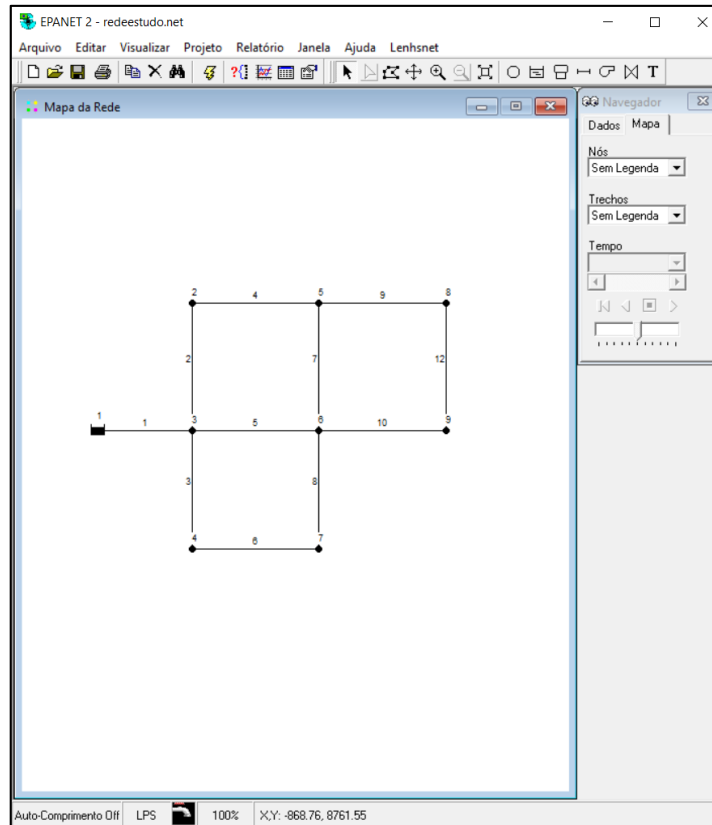


Figura 4.4 - Rede aleatória utilizada nos estudos iniciais.

Fonte: Próprio autor (2022)

Para realizar a simulação sobre ela, foi necessário inserir alguns valores de entrada, como as cotas dos nós e do reservatório, o consumo base de cada nó e o tipo de material dos tubos, bem como a rugosidade. Os resultados calculados nessa simulação foram visualizados por meio de mapas coloridos, tabela de dados de nós (Figura 4.5) e trechos (Figura 4.6) e gráficos de isolinhas (Figura 4.7).

Identificador do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Qualidade
Nó 2	960	2.0	0	2.00	991.85	31.85	0.00
Nó 3	970	0.1	0	0.10	996.37	26.37	0.00
Nó 4	965	0.6	0	0.60	993.28	28.28	0.00
Nó 5	949	2.0	0	2.00	985.65	36.65	0.00
Nó 6	935	2.0	0	2.00	992.77	57.77	0.00
Nó 7	945	3.0	0	3.00	993.25	48.25	0.00
Nó 8	925	2.0	0	2.00	970.86	45.86	0.00
Nó 9	920	2.0	0	2.00	971.23	51.23	0.00
RNF 1	1000	#N/A	0	-13.70	1000.00	0.00	0.00

Figura 4.5 - Dados dos nós da rede aleatória de estudo.

Fonte: Próprio autor (2022)

Tabela da Rede - Trechos												
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	150	150	0	0	13.70	0.78	3.63	0.018	0.00	0.00	Open
Tubulação 2	1200	100	150	0	0	4.80	0.61	3.76	0.020	0.00	0.00	Open
Tubulação 3	990	100	150	0	0	4.34	0.55	3.12	0.020	0.00	0.00	Open
Tubulação 4	1100	75	150	0	0	2.80	0.63	5.64	0.021	0.00	0.00	Open
Tubulação 5	1100	100	150	0	0	4.45	0.57	3.27	0.020	0.00	0.00	Open
Tubulação 6	75	150	150	0	0	3.74	0.21	0.33	0.022	0.00	0.00	Open
Tubulação 7	1200	50	150	0	0	-0.99	0.51	5.94	0.023	0.00	0.00	Open
Tubulação 8	990	75	150	0	0	0.74	0.17	0.48	0.025	0.00	0.00	Open
Tubulação 9	830	50	150	0	0	1.80	0.92	17.82	0.021	0.00	0.00	Open
Tubulação 10	830	50	150	0	0	2.20	1.12	25.95	0.020	0.00	0.00	Open
Tubulação 12	1200	50	150	0	0	-0.20	0.10	0.31	0.029	0.00	0.00	Open

Figura 4.6 - Dados dos trechos da rede aleatória de estudo.

Fonte: Próprio autor (2022)

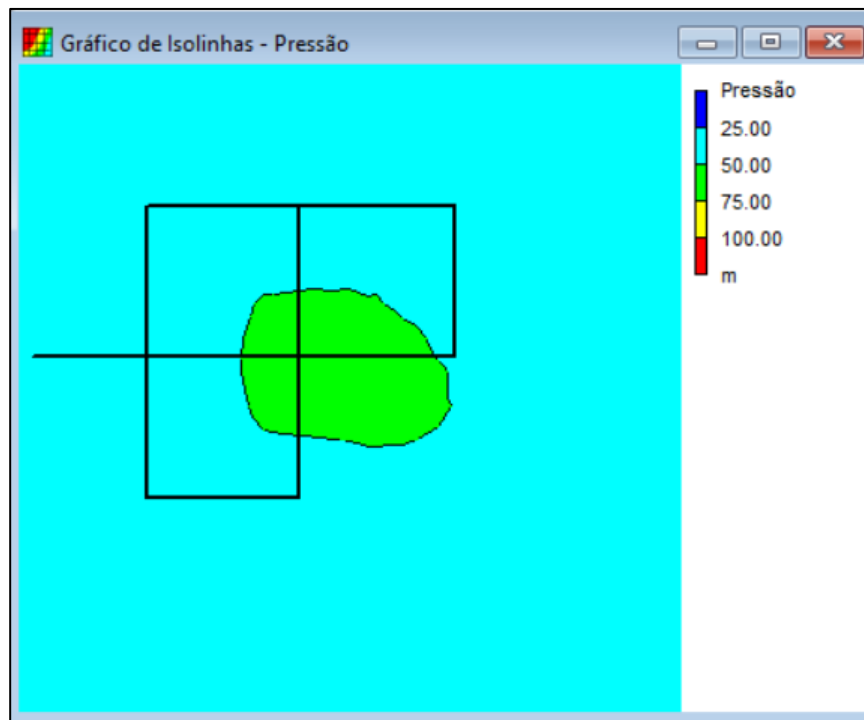


Figura 4.7 - Isolinhas da pressão da rede aleatória de estudo representada em gráfico.

Fonte: Próprio autor (2022)

Foram realizadas simulações mais complexas sobre a rede, com base no material de apoio, com o intuito de conhecer melhor o programa e como a rede se comporta em diferentes cenários, além de aprender a interpretar os resultados.

### 4.2.1 EPANET Programmer's Toolkit

Além das ferramentas de simulação hidráulica mencionadas, o EPANET também possui uma extensão chamada *Toolkit*, que corresponde a uma biblioteca de vínculo dinâmico (DLL) de funções. Essa ferramenta possibilita a customização e o aprimoramento do motor computacional do EPANET conforme as necessidades de simulação do programador. Além disso, ela pode ser associada a programas escritos em linguagem C/C++, Delphi Pascal, Visual Basic ou outras linguagens que possam chamar as funções do arquivo DLL (COSTA; FROTA, 2018).

Tal característica permitiu a associação do EPANET ao R, que foi apresentado por Arandia e Eck (2018), e é importante para o desenvolvimento desta pesquisa.

O mecanismo que essa ferramenta possui em permitir a incorporação com os outros programas é de fácil utilização, consistindo em fases, que se iniciam com o salvamento do arquivo de entrada em formato “.INP”. Em seguida, a função ENepanet deve ser solicitada junto com o nome do arquivo de entrada e o nome do arquivo de saída dos resultados. Por fim, o arquivo de saída com os resultados pode ser acessado (ROSSMAN, 2000).

Para a simulação de redes de distribuição de água, o *Toolkit* fornece funções com funcionalidades específicas, que admitem a manipulação dessa ferramenta. Dessa forma, tem-se (ROSSMAN, 2000):

1. ENopen: abre o Toolkit e o arquivo gerado no EPANET;
2. Variações do ENsetxxx: permitem modificar as características da rede;
3. ENSolveH: Realiza a simulação hidráulica completa da rede e salva o resultado em um arquivo;
  - a. Essa simulação também pode ser executada por meio de uma série de comandos, ENopenH - ENinitH - ENrunH - ENnextH - ENcloseH, sendo necessário utilizar as diversas funções ENgetxxx para saber o resultado no decorrer da simulação.
4. ENSolveQ: efetua uma simulação completa da qualidade da água;
  - a. Também pode ser realizada através de uma sequência de comandos, ENopenQ - ENinitQ - ENrunQ - ENnextQ ou ENstepQ - ENcloseQ.
5. ENclose: fecha o motor de simulação como todos os arquivos e libera a memória do sistema.

### 4.3 Etapa 3: Definição de um sistema de abastecimento de água teórico para estudo

Na terceira etapa, foi desenvolvida a rede teórica de estudo. Primeiramente, a rede teórica foi delineada no programa EPANET, apresentando um traçado conforme mostrado na Figura 4.8. Ela é constituída por 2 reservatórios, 15 nós, 18 trechos, 2 bombas e 3 válvulas redutoras de pressão.

A rede definida foi elaborada para que a topografia do terreno fosse irregular e, com isso, a rede teórica de estudo apresenta variações de pressões. Realidade apresentada por muitas redes reais situadas em regiões que apresentam variações de relevo.

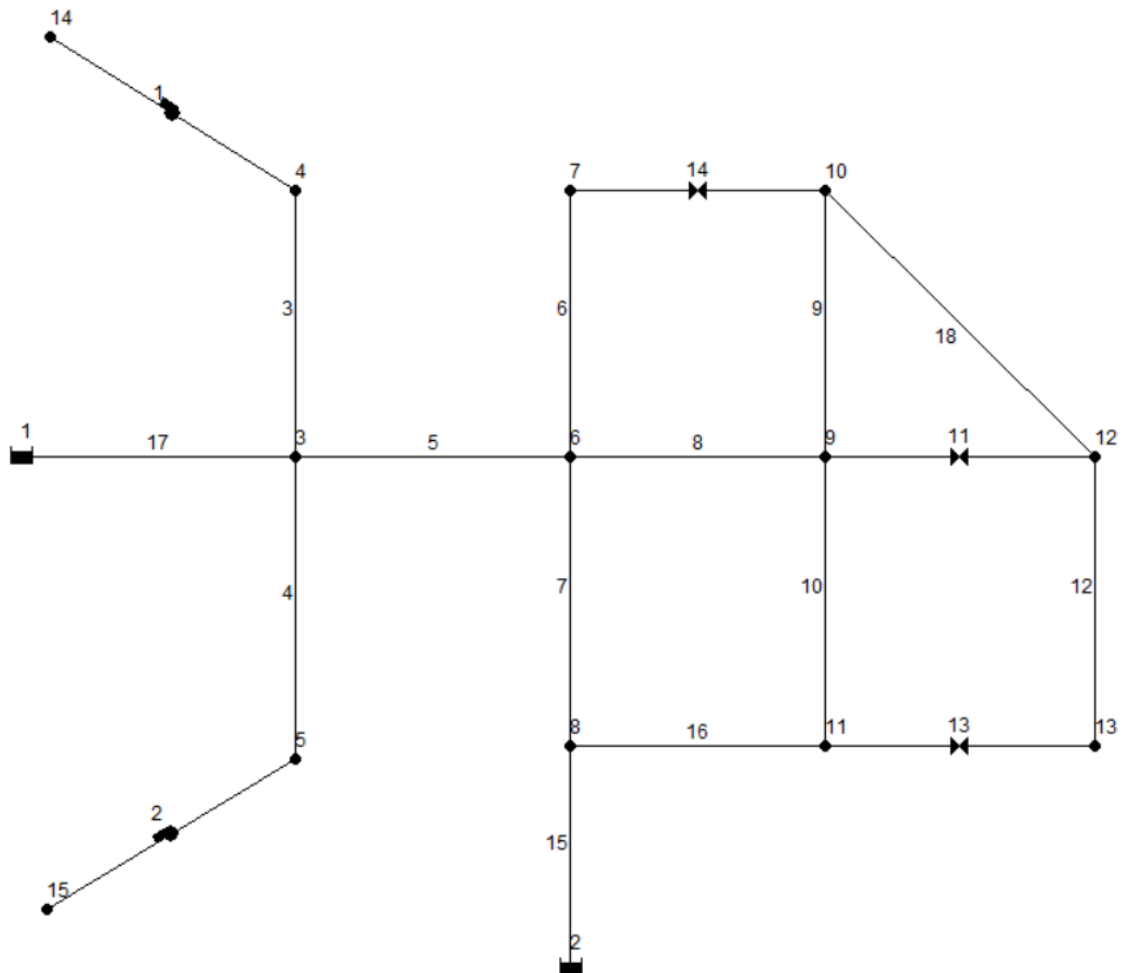


Figura 4.8 - Exemplificação da rede de estudo no EPANET.

Fonte: Próprio autor (2022)

Em seguida, foram definidos os dados de entrada da rede como as cotas dos nós e reservatórios. Os valores estabelecidos se deram de maneira que o escoamento ocorresse da esquerda para a direita. Também foi determinado o consumo base de cada nó para que fosse possível obter os dados de vazão. Esses dados foram delimitados com base em uma variação



de pressão de 20 a 90 m.c.a, que são pressões próximas das apresentadas em redes reais. Porém, a rede foi forçada a ficar muito próxima dos limites máximos e mínimos, para que se pudesse analisar seu comportamento. A Tabela 1 traz estes valores.

Tabela 1 - Dados determinados para os nós da rede teórica.

Identificador dos nós	Cota (m)	Consumo Base (L/s)
Reservatório 1	890	-10,83
Reservatório 2	890	-10,17
Nó 3	845	1,00
Nó 4	840	1,00
Nó 5	840	2,00
Nó 6	830	1,00
Nó 7	825	2,00
Nó 8	830	3,00
Nó 9	810	2,00
Nó 10	805	1,00
Nó 11	815	1,00
Nó 12	800	1,00
Nó 13	805	1,00
Nó 14	915	2,00
Nó 15	920	3,00

Fonte: Próprio autor (2022)

Após a definição dos parâmetros de entradas dos nós, foram então definidos os parâmetros das tubulações da rede teórica. O intervalo dos diâmetros selecionado foi de 50 a 200 mm, sendo que as tubulações próximas aos reservatórios possuem diâmetros maiores em comparação às tubulações mais a jusante. O comprimento das tubulações girou em torno de 100 metros para que ficassem próximas das dimensões dos quarteirões de loteamentos. Quanto ao tipo de material, optou-se pelo policloreto de vinila (PVC), que, segundo Porto (2006), possui uma rugosidade média de 0,06, considerando, para isso, tubulações com 20 anos. Essa escolha se deu por ser o mais usado nas redes reais brasileiras.

Todos os valores determinados para os trechos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados determinados para os trechos da rede teórica.

Identificador dos trechos	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade
Bomba 1	-	-	-
Bomba 2	-	-	-
Tubulação 3	100	100	0,06
Tubulação 4	100	100	0,06
Tubulação 5	150	100	0,06
Tubulação 6	100	100	0,06
Tubulação 7	100	100	0,06
Tubulação 8	100	75	0,06
Tubulação 9	100	75	0,06
Tubulação 10	100	75	0,06
Válvula 11	-	50	-
Tubulação 12	150	50	0,06
Válvula 13	-	50	-
Válvula 14	-	75	-
Tubulação 15	300	200	0,06
Tubulação 16	100	100	0,06
Tubulação 17	500	200	0,06
Tubulação 18	100	50	0,06

Fonte: Próprio autor (2022)

Com os parâmetros de entrada definidos, foi executada a simulação hidráulica da rede para o período estático, verificando se a velocidade e a vazão estavam de acordo com o estabelecido para a rede. Com isso, foi encerrada a etapa de elaboração da rede teórica de estudo.

#### 4.4 Etapa 4: Realização do acoplamento entre os *softwares* R e EPANET

Na quarta etapa do projeto, foi realizada a interação entre o EPANET e o R por meio do pacote *epanet2toolkit*, que é um pacote do *software* R. Para que fosse possível realizar esta interação, foi utilizado o material “An R Package for EPANET simulations”, desenvolvido por Arandia e Eck (2018).

Segundo os autores, o pacote foi desenvolvido para ser um invólucro para o EPANET, assim, as funções do EPANET API (interface de programação de aplicativo) são as mesmas no R. Porém, divergem-se nos parâmetros e nas funções de retorno.

Para utilizar a ferramenta, é preciso baixá-la a partir do comando *install.packages* que irá armazenar esse pacote na biblioteca. Após a instalação, é preciso executar o comando *library* para carregá-la da biblioteca em toda nova iteração no R. O repositório usado para baixar foi o *Revolution Analytics*.

Após a instalação, foi possível usar as funções disponíveis do pacote, adquiridas do estudo de Arandia e Eck (2018), para a manipulação de redes hidráulicas, elaborada no EPANET dentro do ambiente R.

No entanto, para que a manipulação da rede no R fosse possível, foi necessária a criação de um arquivo de entrada no formato “.inp”, que é gerado no EPANET. Depois das simulações, os resultados são salvos pelo R em arquivos de relatórios, que se caracterizam pelo formato “.rpt”.

Do trabalho desenvolvido por Arandia e Eck (2018), foi possível observar como as funções e os comandos são aplicados nas análises das redes. A iteração apresentada a seguir, na Figura 4.9, traz uma simulação hidráulica completa de uma rede, em que a ordem e o significado de cada comando necessário para essa simulação também estão expostos.

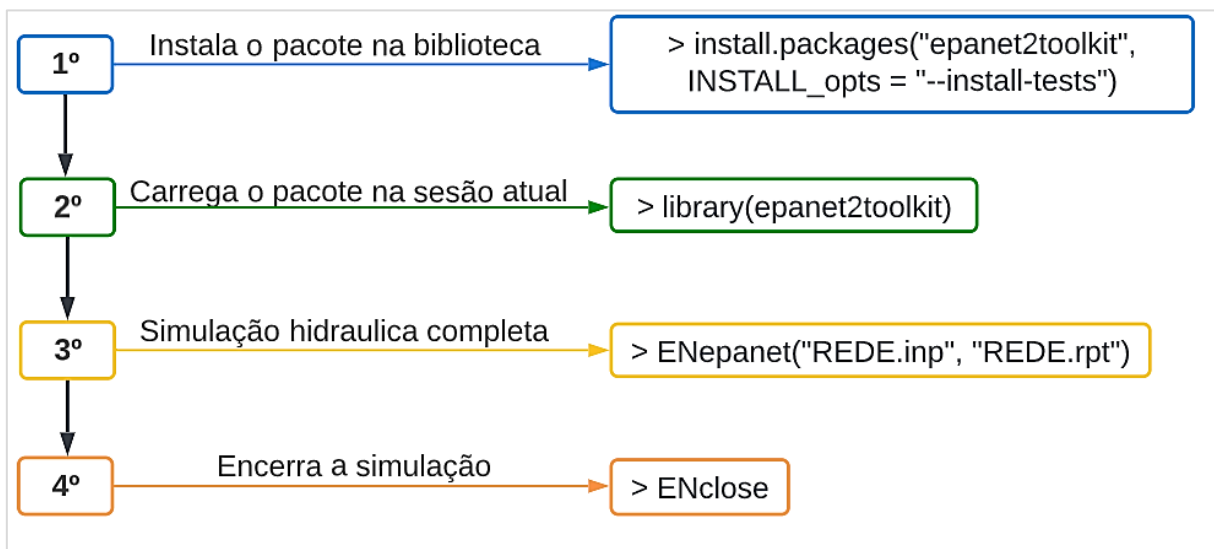


Figura 4.9 - Simulação hidráulica completa da rede.

Fonte: Adaptado de Arandia e Eck (2018)

Outra simulação apresentada, importante para o desenvolvimento desse trabalho, foi a de modificar as características da rede. Os autores trouxeram a alteração do comprimento de

um trecho, denominado 2, da rede NET1, que é uma rede que já vem no pacote e pode ser utilizada para estudos.

As funções *Enset* e *Enget* são o ponto chave dessa simulação, pois a primeira é responsável por modificar um parâmetro da rede e a segunda por retornar o valor de algum parâmetro requisitado da rede. Assim, a Figura 4.10 apresenta a sequência dos comandos utilizados nessa iteração.

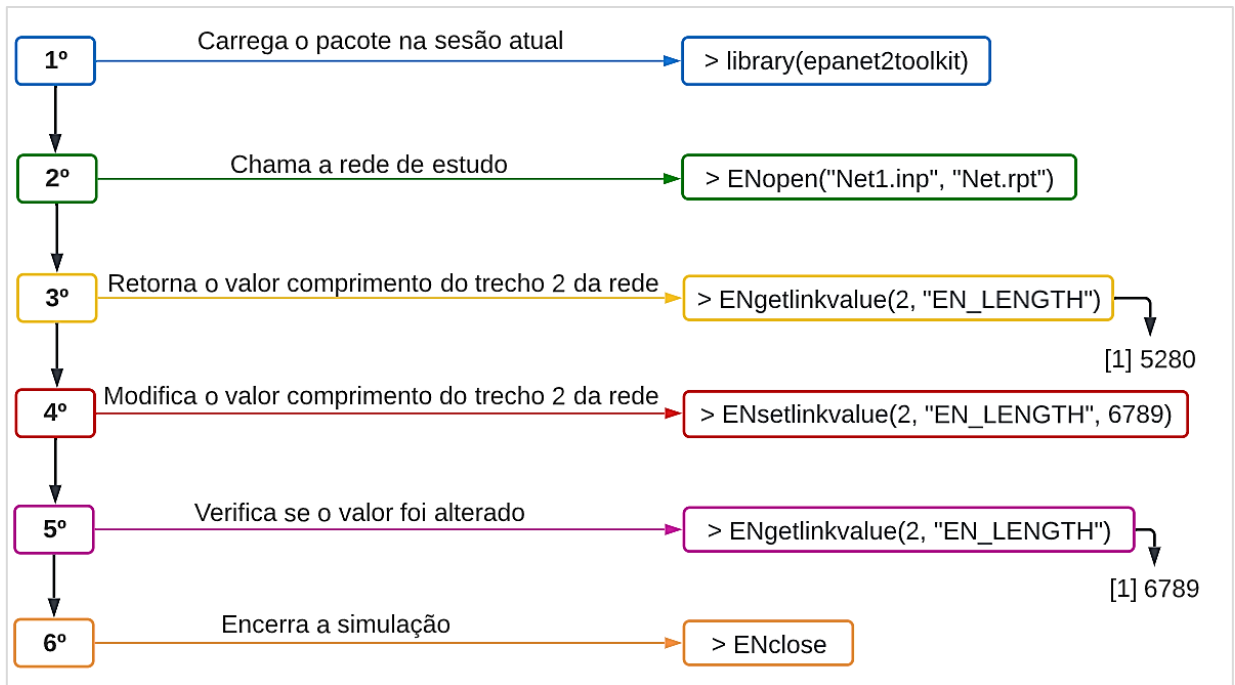


Figura 4.10 - Modificação do comprimento de um trecho da rede.

Fonte: Adaptado de Arandia e Eck (2018).

Segundo os autores, outros comandos podem ser adicionados a essa iteração anteriormente apresentada, desde que sejam inseridos antes do *ENclose*, que tem como função fechar o motor de simulação.

Além disso, também trazem, em seu estudo, uma tabela com algumas funções principais presentes no *epanet2toolkit*, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Funções resumidas do *epanet2toolkit*.

Função	Descrição	
Simulação completa	ENepanet()	Carrega uma simulação completa.
	ENopen()	Abre o mecanismo do EPANET.
	ENclose()	Fecha o mecanismo do EPANET.
Simulação de período prolongado	ENSolveH()	Executa a simulação hidráulica.
	ENSolveQ()	Executa a simulação de qualidade de água.
Simulação hidráulica passo a passo	ENopenH()	Carrega o sistema hidráulico analítico.
	ENinitH()	Inicializa o sistema antes da simulação.
	ENrunH()	Executa uma análise hidráulica de período único.
	ENnextH()	Marca período de tempo até o próximo evento hidráulico.
	ENcloseH()	Fecha o sistema hidráulico analítico.
Simulação da qualidade de água (QA) passo a passo	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.
Escrita em arquivos	ENsaveH()	Salva o resultado hidráulico em arquivo binário.
	ENsaveinpfile()	Salva os dados atuais em arquivo “.inp”
	ENreport()	Escreve o relatório da simulação em arquivo texto.
Recuperação e configuração de valores de parâmetros de rede	ENget*()	Recuperam informações da rede.
	ENset*()	Definem valores de parâmetros de rede.

Fonte: Adaptado de Arandia e Eck (2018)

Esse pacote também permite aplicar suas funções associadas com todas as funções do R, o que amplia sua capacidade de análise de redes. Além disso, ela também faz simulação de qualidade da água, podendo ser para um período de tempo ou passo a passo, assim como para as simulações hidráulicas (ARANDIA; ECK, 2018).

Dessa forma, com base nas iterações e aplicabilidades da ferramenta apresentadas no trabalho de Arandia e Eck (2018), foi possível realizar simulações sobre a rede teórica aplicada nesta pesquisa.

#### 4.5 Etapa 5: Determinação de parâmetros para simulações computacionais

Na quinta etapa de desenvolvimento da pesquisa, foram definidos os parâmetros de operação para as simulações computacionais da rede teórica. Os parâmetros foram escolhidos de maneira que representassem o comportamento de uma rede real. Assim, eles correspondem basicamente a variar os componentes da rede, buscando verificar o seu comportamento, principalmente quanto à pressão.

Dessa forma, se resumem em:

- 1) Alteração de nível dos reservatórios;
- 2) Variação do funcionamento das válvulas redutoras de pressão;
- 3) Alteração da rotação das bombas;
- 4) Variação do tipo de material das tubulações;
- 5) Alteração do diâmetro das tubulações; e
- 6) Variação da demanda dos nós.

Para cada um dos desses parâmetros foi estabelecido um intervalo de variação para que fosse possível sua aplicação nas simulações, a de busca aleatório e o algoritmo genético, descritos na etapa seguinte. A Tabela 4 mostra quais foram os valores utilizados.

Tabela 4 - Intervalo estabelecido para os parâmetros.

	Nível do reservatório (m)	Rugosidade	Diâmetro (mm)	Demanda (L/s)	Válvula redutora de pressão (%)	Bomba (adimensional)
Mínimo	850	0,04	50	1,0	50	1
Máximo	900	0,07	200	3,0	70	1,5

Fonte: Próprio autor (2022).

#### 4.6 Etapa 6: Realização de simulações computacionais de operação da rede virtual fictícia

Com os parâmetros de simulação e a rede teórica de estudo definidos, foram então realizadas nesta fase as simulações no R, com o objetivo de analisar o comportamento da rede de estudo quanto à variação dos parâmetros já definidos.

O primeiro passo foi realizar a iteração entre os dois programas por meio de um arquivo “.inp” gerado no EPANET, que contém os dados da rede, que será lido no R. Em seguida, é gerado um arquivo “.rpt” que corresponde ao relatório da simulação. Após, foi definido o número de simulações que seriam necessárias para encontrar a configuração de operação da rede que fosse capaz de encontrar pressões ideais ao seu funcionamento. Assim, o valor determinado foi de 1000 simulações, que serão chamadas de iterações.

Para encontrar a iteração chamada ideal dentre as 1000 iterações geradas, foi estabelecido, para a função desenvolvida, um limite em que a pressão de cada nó da rede deveriam estar. Esse intervalo foi definido de acordo com a NBR 12218, que determina os valores de pressão para projeto de redes de distribuição de água para o abastecimento público. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

Além da geração das simulações pelo método de busca aleatório, também foi realizada a simulação utilizando de algoritmo genético sobre a rede de estudo. Para isso, foi utilizado o pacote GA, (A Package for Genetic Algorithms in R) desenvolvido por Scrucca (2013). Assim como na outra simulação, também foram gerados números aleatórios dos parâmetros da rede, sendo eles os níveis dos reservatórios, rugosidade, diâmetro, demanda, válvula e bomba. Além disso, a quantidade de gerações foi a mesma estabelecida para a simulação aleatória, sendo esse valor de 1000 gerações. Os novos valores das pressões geradas nessa simulação necessitam estar entre a faixa estabelecida pela NBR 12218.

Também foi delimitada a chance de mutação do algoritmo genético, fator que permite a geração de indivíduos mais variados. Com isso, foi estabelecido um valor de 5% de chance de mutação e a probabilidade de recombinação de 80%, estando dentro do intervalo estabelecido por Simpson et al. (1994), além de serem valores já determinados pelo pacote GA utilizado. Também foi definido que o algoritmo desenvolvido seria geracional elitista garantindo assim que as melhores soluções fossem levadas para as gerações seguintes.

Assim, para encerrar a simulação total sobre a rede, é preciso que o número de iterações seja atingido; no caso do presente estudo, esse valor é de 1000. Com todos os requisitos cumpridos, a simulação é finalmente encerrada.

Como o controle de pressão está diretamente ligado à redução de perdas, foi essencial calcular as perdas de água que ocorrem no sistema em estudo (TUCCIARELLI; CRIMINISI; TERMINI, 1999). Assim, para o cálculo da perda de água, foi utilizada a equação apresentada por Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), em que a perda de água em cada nó é dada pela pressão média elevada a um expoente de valor mínimo de 0,5, correspondendo à região ao redor do nó onde ocorre a perda. Nessa equação, o valor da perda é dado em percentual (%) e a pressão média é a média aritmética das pressões nos nós da rede. A Equação 1, apresentada a seguir, traz como é feito o cálculo da perda de água, desenvolvida por Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999):

$$\sum_{i=1}^{nodes} = P_{mean}^{0,5} * 7,27 \quad (1)$$

Os dois métodos utilizados nos estudos da rede teórica foram desenvolvidos com base nos estudos e comandos desenvolvidos por Arandia e Eck (2018) e Barbedo (2022).

#### **4.7 Etapa 7: Análise dos resultados em termos de critérios de melhoria do desempenho do sistema**

A análise dos resultados encontrados das simulações realizadas no RStudio foi realizada pela comparação com os valores de pressões e perdas encontradas nas 1000 iterações com os valores de pressão da rede original. Essa análise foi realizada tanto para a simulação de busca aleatória quanto para a simulação pelo algoritmo genético.

Para a simulação aleatória, foi definido um limite de pressões para que a simulação realizada no RStudio possa apresentar somente as iterações que se encontram nessa faixa. A simulação do algoritmo genético não exigiu a definição de um limite para o melhor cenário, pois, ela já traz esse cenário ideal de pressões para a rede.

Quanto às perdas de água encontrada em cada simulação, foram pegos para comparação os valores de perdas encontrados em ambos os casos, pois as perdas estão diretamente ligadas à pressão de acordo com a Equação utilizada de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999). Também foi realizada a comparação desses com o cenário original da rede para verificar se ambas as simulações foram capazes de reduzir as perdas.



## 5. RESULTADOS

### 5.1 Simulação da rede teórica no EPANET

O primeiro estudo realizado sobre a rede foi a simulação estática no EPANET, para verificar se o seu dimensionamento foi corretamente desenvolvido e se seria possível obter uma simulação bem sucedida.

Como a simulação foi bem sucedida, isso permitiu encontrar os valores de vazão, velocidade, perda de carga e fator de atrito nos trechos e, nos nós, os valores de pressão, que é o principal dado que será analisado neste trabalho, já que é o fator que impede o rompimento do sistema, com o estouro das tubulações e conseqüentemente os vazamentos. Com isso, a Tabela 4 traz os valores de pressão obtidos na simulação realizada no EPANET.

Tabela 5 - Valores obtidos nos nós após a simulação no EPANET.

Identificador dos nós	Pressão (m.c.a)
Reservatório 1	-
Reservatório 2	-
Nó 3	44,69
Nó 4	49,51
Nó 5	49,23
Nó 6	59,58
Nó 7	64,49
Nó 8	59,83
Nó 9	79,06
Nó 10	83,32
Nó 11	74,59
Nó 12	85,70
Nó 13	79,61
Nó 14	24,10
Nó 15	28,22

Fonte: Próprio autor (2022).

Além dos dados apresentados, também foi observado o sentido do escoamento sobre a rede, verificando se este se deu dos reservatórios até os pontos a jusante, respeitando a cota de cada nó.

Dessa forma, essa fase não serviu somente para verificar se a rede foi bem dimensionada, mas também obter valores que servirão de base para a comparação com os dados que serão obtidos com a utilização da ferramenta *epanet2toolkit*.

## 5.2 Desenvolvimento da simulação de busca aleatória

O primeiro estudo realizado sobre a rede teórica estudada foi baseado no método Aleatório, em que valores aleatórios foram gerados dos parâmetros da rede, como nível dos reservatórios, rugosidade, diâmetro, rotação das bombas, abertura das válvulas redutoras de pressão e demanda, para que fosse possível encontrar um cenário em que o arranjo desses elementos permitisse uma equalização e/ou uma redução das pressões do sistema e, com isso, uma redução das perdas. A Figura 5.1 apresenta com o se deu o desenvolvimento da função e seu funcionamento para a simulação aleatória.

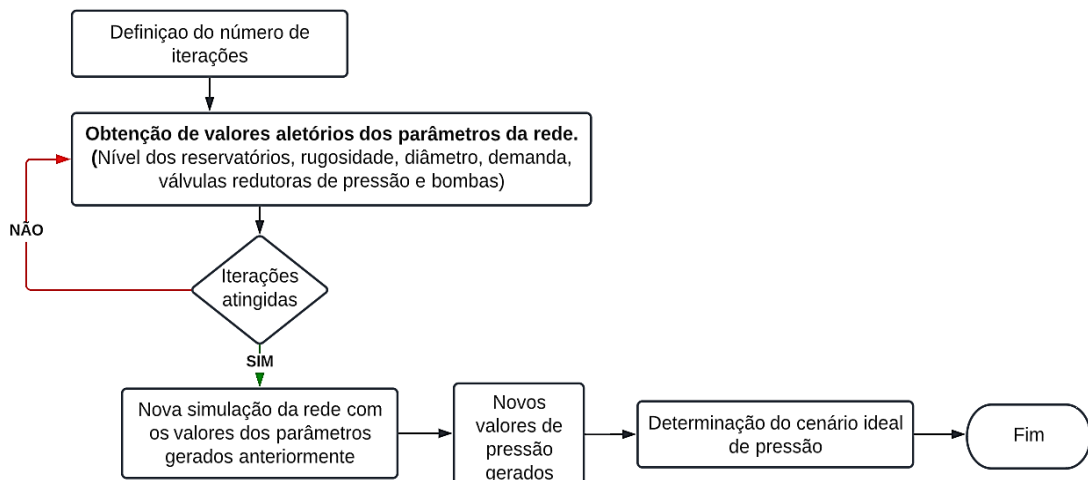


Figura 5.1 - Desenvolvimento da simulação aleatória.

Fonte: Próprio autor (2022)

Com a definição do número de iterações em 1000, estabelecesse então os o limites de variação para cada parâmetro da rede, que foram descritos na tabela 4 no item 4.5 dos materiais e métodos.

Com esses parâmetros determinados, foi criada uma função para realizar um loop responsável por fazer uma busca nos valores aleatórios dos elementos gerados anteriormente e gerar, a partir deles, os valores de pressão da rede. Com o processo da iteração atingido, foram então encontrados os novos valores de pressão da rede, sendo este um número de 1000 valores de pressão.

Depois das 1000 iterações, que geraram valores de pressão, foi criada uma função somente para que a iteração que apresentasse pressões dentro do limite determinado pela

norma NBR 12218, que estabelece as diretrizes para redes de distribuição de água para o abastecimento público, pudesse ser apresentada para a determinação da melhor iteração encontrada com esse método.

### 5.3 Simulação de busca aleatória da rede teórica

Com a definição de toda a função desenvolvida e de seu funcionamento para a elaboração da busca aleatória e após a realização da simulação, foram encontradas 3 iterações que apresentavam uma maior quantidade de nós com pressões na faixa de 10 a 50 m.c.a, que é o estabelecido por norma para redes de distribuição de água. Assim, essas três iterações, dentre as 1000 iterações geradas, são as de número 217, 360 e 914. Os valores de pressão apresentado por cada uma dessas iterações estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de pressão encontrados nas iterações 217, 360 e 914.

Nó	Pressão (m.c.a) Iteração 217	Pressão (m.c.a) Iteração 360	Pressão (m.c.a) Iteração 914
3	42,57	42,06	41,71
4	45,99	46,86	46,55
5	46,33	46,90	46,53
6	57,07	56,77	60,89
7	61,96	60,21	65,83
8	57,84	56,92	61,46
9	76,56	76,47	80,84
10	40,35	47,47	46,22
11	72,59	71,77	75,87
12	35,61	33,88	40,53
13	30,53	28,84	35,14
14	20,58	21,45	21,14
15	25,32	25,89	25,53

Fonte: Próprio autor (2022).

Quando se analisa as pressões de cada uma das três iterações com o cenário original, antes da simulação, houve uma redução das pressões em alguns dos nós, em que o valor era elevado com valores próximos a 80 m.c.a.

Na iteração de número 217, que está entre as 3 que se adequaram ao intervalo de pressões estabelecidos, dentre as 1000 iterações realizadas, é possível observar que os nós 10, 12 e 13 são os que obtiveram uma redução significativa nos valores das pressões, passando de

83,32; 85,70 e 79,61 m.c.a para 40,35; 35,61 e 30,53 m.c.a respectivamente. Com isso, a redução foi de mais de 50% nesses três nós, sendo que o valor exato da redução foi de 51,57%, 58,44% e 61,65 % para os nós 10, 12 e 13 respectivamente. Porém, os nós 9 e 11, que também apresentavam valores elevados de pressão na rede original, não obtiveram uma redução tão significativa como os nós citados anteriormente, sendo uma redução de apenas 3,16% e 2,68% para as nós 9 e 11 respectivamente. Isso se dá pelo fato de que, na simulação aleatória, não é possível algum tipo de controle sobre a simulação, e, com isso, não ocorreu a redução da pressão desses dois nós. A Figura 5.2 traz a comparação descrita entre as pressões da rede original, chamado de cenário base e a iteração de número 217.

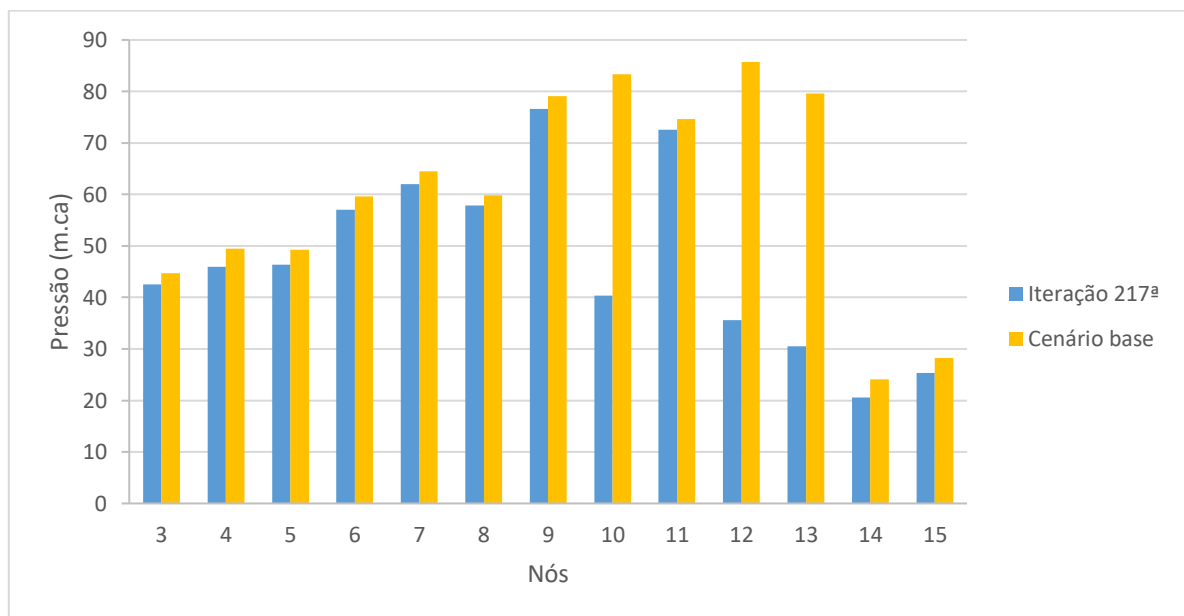


Figura 5.2 - Comparação entre os valores de pressão do cenário 217 e o base.

Fonte: Próprio autor (2022).

Na iteração de número 360, dentre as 1000 iterações realizada, a redução apresentada pelos nós 10, 12 e 13 também foi alta como na iteração anterior. Porém, os nós 12 e 13 obtiveram uma redução maior que o nó 10, sendo essa diferença de aproximadamente 20%. Os valores encontrados de redução desses três nós foram de 43,02%, 60,47% e 63,77% para os nós 10, 12 e 13, respectivamente. Quando se relaciona os valores obtidos para esses 3 nós com a iteração anterior, de número 217, a redução apresentada pela presente iteração foi relativamente menor, sendo, então, a iteração de número 217 melhor em relação à pressão desses três nós.

Os nós 9 e 11, assim como na iteração anterior, não obtiveram uma redução significativa, com valores de 3,27% e 3,79% respectivamente. Contudo, quando se compara

com a redução que a iteração anterior apresentou para esses dois nós, a iteração presente obteve uma redução maior. Esses valores estão expressos na Figura 5.3.

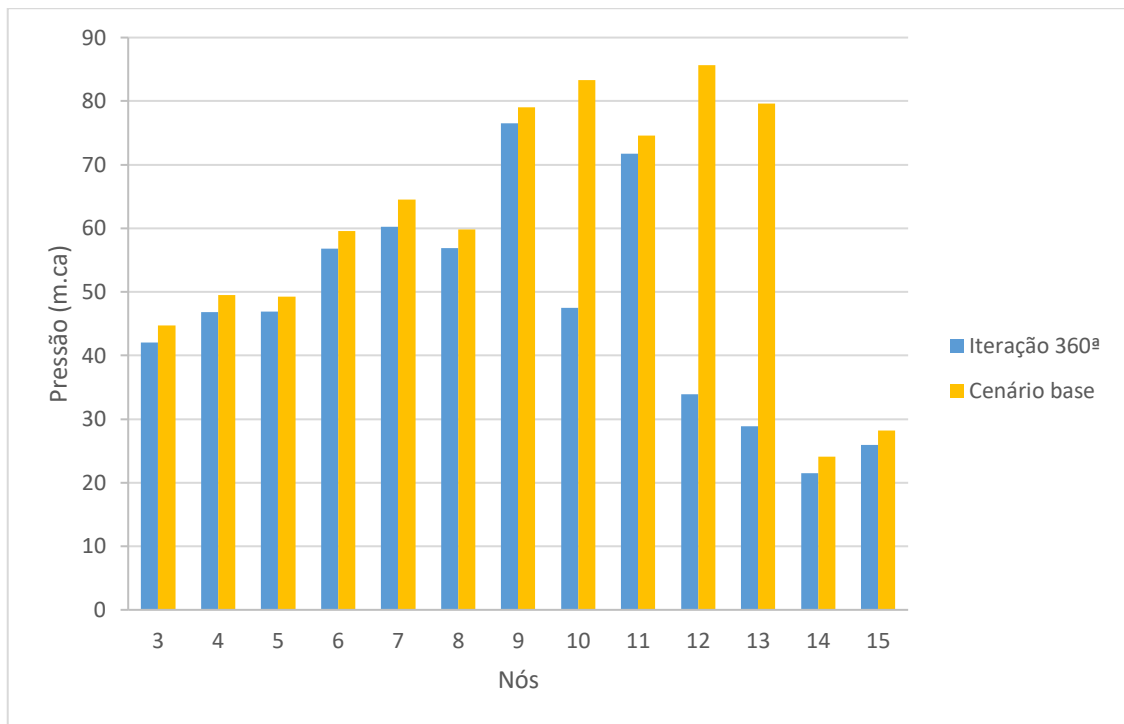


Figura 5.3 - Comparação entre os valores de pressão do cenário 360 e o base.

Fonte: Próprio autor (2022).

Na iteração de número 914, os resultados encontrados de pressão foram os mesmos obtidos nos dois cenários anteriores, com a redução significativa nos nós 10, 12 e 13 de 44,53%, 52,71% e 55,87% respectivamente. Comparando a presente iteração com as duas iterações anteriores, os valores de pressão dessa iteração para os nós 10, 12 e 13 foram menores do que a apresentada pela outras duas. Sendo assim, a primeira iteração apresentada, a de número 217, obteve uma maior redução nos valores de pressão para os 3 nós citados.

Já os nós 9 e 11 apresentaram um comportamento diferente dos encontrados nas iterações anteriores, pois houve um aumento nos valores de pressão ao invés de uma redução, apresentando um aumento de 2,26% para o nó 9 e 1,71% para o nó 11. Assim, apresentaram pressões de 80,84 e 75,87 m.c.a. A Figura 5.4 apresenta esses valores obtidos no cenário 914.

Como os valores foram gerados de forma aleatória, não foi possível um controle sobre como eles seriam gerados, sendo determinado somente o intervalo mínimo e máximo dessa variação. Com isso, há a possibilidade de ocorrer valores maiores do que a simulação original, o que justificaria o comportamento dos nós 9 e 11.

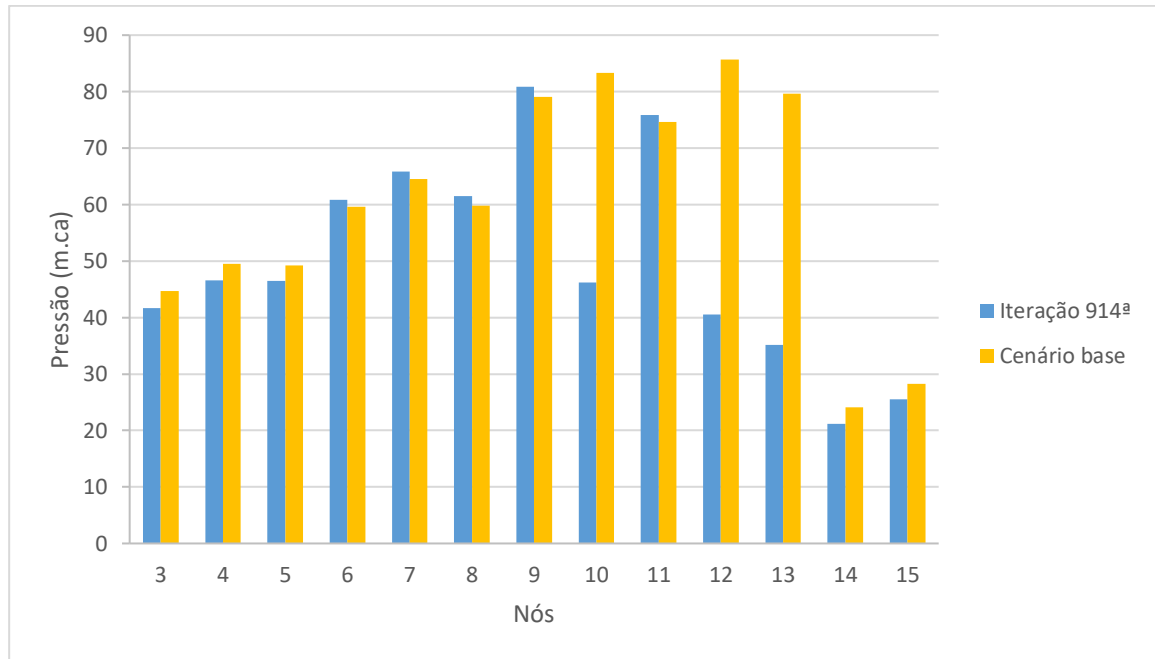


Figura 5.4 - Comparação entre os valores de pressão do cenário 914 e o base.

Fonte: Próprio autor (2022).

Quando se analisa as três iterações, em relação à pressão, não é possível determinar qual foi o melhor, pois não foi possível obter uma iteração em que todas as pressões que se apresentava elevadas, fossem reduzidas para os valores desejados, sendo eles o estabelecido por norma. Ou seja, não ocorreu uma melhora de todas as pressões em uma única iteração. Contudo, os nós 10, 12 e 13 obtiveram uma maior redução na iteração de número 217 em que as pressões se reduziram para a metade do valor que apresentava inicialmente, na rede original.

Já os nós 9 e 11, que possuíam um valor elevado de pressão antes da simulação aleatória, obtiveram uma redução nas iterações de número 217 e 360, porém, o valor dessa redução não foi significativo, sendo inferior a 4%. Contudo, comparando os valores entre essas duas iterações, a de número 360 obteve uma maior redução.

Já na iteração de número 914, o comportamento observado nos nós 9 e 11 foi o oposto aos demais, pois, a pressão não alcançou uma redução e sim um aumento no valor de aproximadamente 3%. Esse fato pode ser explicado pela forma como a simulação ocorreu, pois, na simulação aleatória, não há critérios de controle, sendo gerada de maneira totalmente aleatória. A Figura 5.5 apresenta essa comparação entre as 3 iterações encontradas como ideais, entre as 1000 que foram geradas e o cenário base.

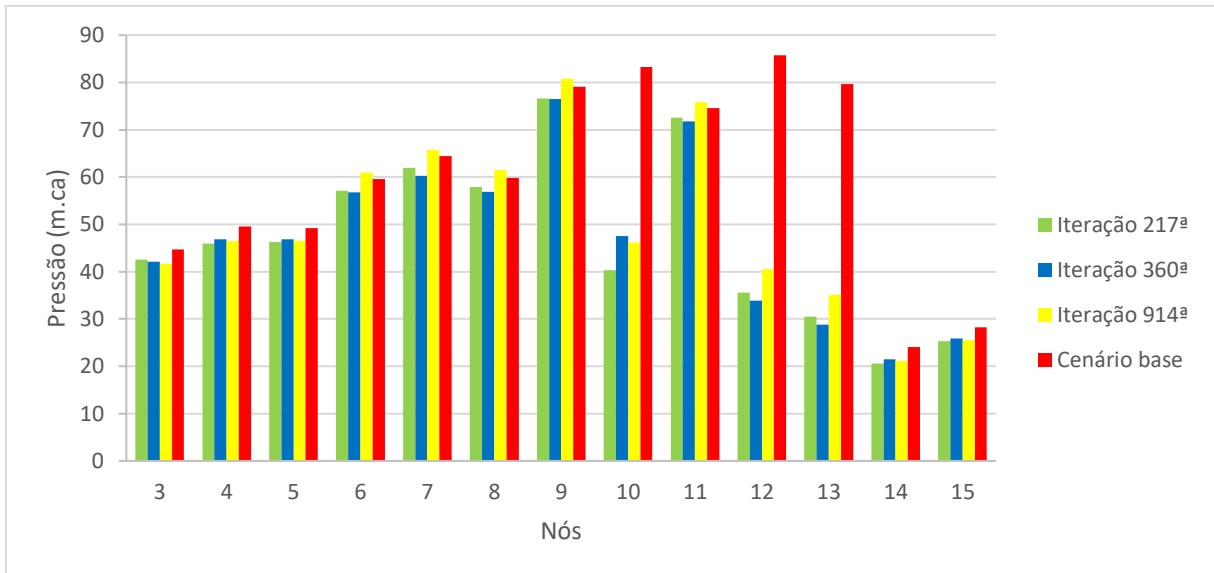


Figura 5.5 - Comparação entre os valores de pressão das três iterações ótimas e o cenário base.

Fonte: Próprio autor (2022).

Contudo, o mais importante foi encontrar a redução de perdas que cada iteração apresentava. Para isso, foi então utilizada a equação de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), em que as perdas por nó são consideradas por meio da pressão média elevada ao expoente 0,5. Com isso, foram encontrados os valores das perdas das 1000 iterações gerados. O Figura 5.6 traz esses valores de algumas iterações, dentre as 1000 geradas, onde as colunas em verde correspondem as três iterações consideradas ideais já mencionadas.

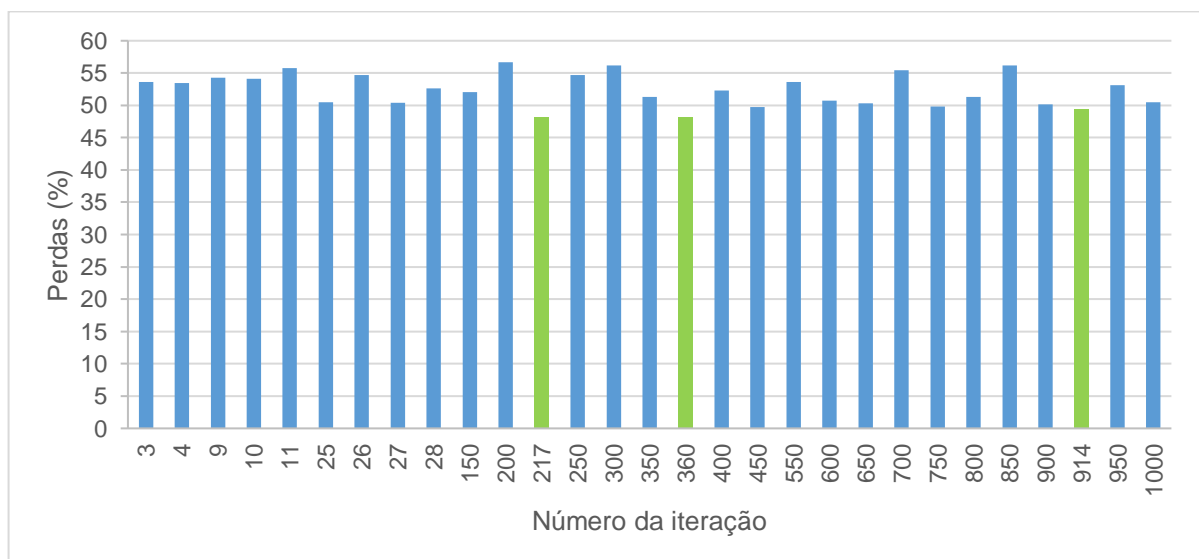


Figura 5.6 - Porcentagem de perdas dos cenários.

Fonte: Próprio autor (2022).

Na Figura 5.6, as três iterações mencionadas anteriormente, que apresentavam as melhores pressões para o funcionamento da rede, conseqüentemente apresentam as maiores reduções de perdas, que estão representados na cor verde na figura, sendo estes o que apresentam a menor porcentagem de perdas. As perdas apresentadas por cada uma foram de 48,12%, 48,20% e 49,47% para as iterações de número 217, 360 e 914 respectivamente.

Analisando a porcentagem de perdas que as três iterações apresentaram, utilizando da variação percentual, calculada pela diferença entre a perda original com a perda encontrada dividida pela perda original, pode se afirmar que houve uma redução de 9,79% para a iteração de número 217, de 9,63% para a iteração de número 360 e de 7,26% para a iteração de número 914. Com isso, a iteração com a maior redução de perdas foi o de número 217, que conseqüentemente obteve os melhores valores de pressão para a rede estudada. Pois o controle e a gestão das pressões em um sistema de distribuição de água estão diretamente relacionados à redução das perdas, porque, num sistema que não sofre com variações de pressões, a probabilidade da ocorrência de perdas é pequena (KANAKOUDIS; MUHAMMETOGLU, 2014; MUTIKANGA et al., 2013; SANZ et al., 2016).

Esses valores foram encontrados através da comparação com os valores de perdas da rede original, ou seja, antes da simulação aleatória, com os valores de perdas encontrados nas 3 iterações mais bem encontradas entre as 1000 iterações geradas. A Figura 5.7 traz essa comparação, em que o número 0 representa a perda da rede original.

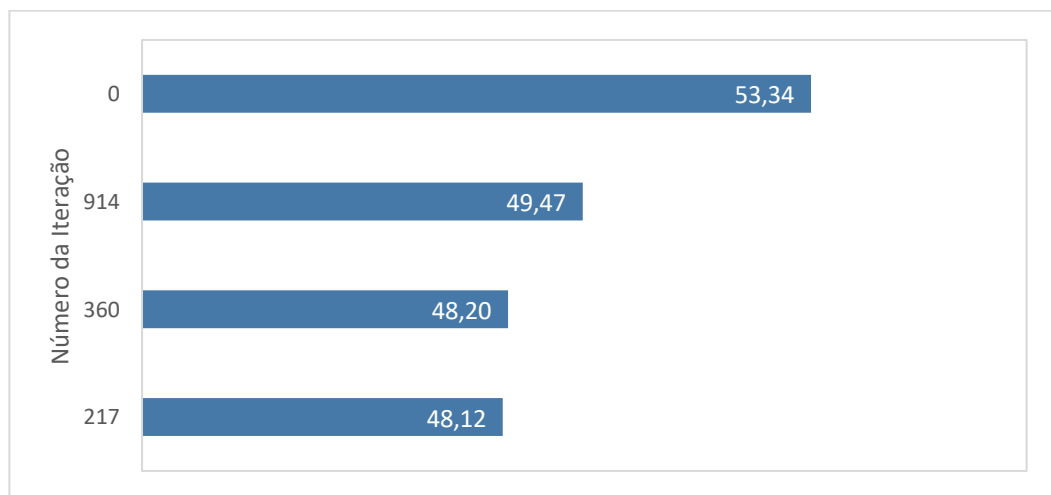


Figura 5.7 - Comparação entre as porcentagens de perdas dos cenários ideais com o cenário base.

Fonte: Próprio autor (2022).

Além dos dados de pressão e perdas apresentados anteriormente, também foram encontrados os novos valores dos parâmetros que foram variados. Como a iteração 217



apresentou um melhor valor para as perdas, foi apresentado somente os valores dos parâmetros correspondentes a essa iteração que estão apresentados nas tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 - Valores de rugosidade e diâmetro da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória.

Identificador dos trechos	Rugosidade	Diâmetro (mm)
	Geração ideal	Geração ideal
Tubulação 3	0,06	195
Tubulação 4	0,06	80
Tubulação 5	0,06	128
Tubulação 6	0,06	95
Tubulação 7	0,06	125
Tubulação 8	0,06	105
Tubulação 9	0,06	100
Tubulação 10	0,06	122
Tubulação 12	0,05	53
Tubulação 15	0,07	59
Tubulação 16	0,07	138
Tubulação 17	0,07	136
Tubulação 18	0,06	170

Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 8 - Valores de demanda e nível dos reservatório da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória.

Identificador dos nós	Geração ideal	Demanda (L/s)
Nó 3	2,6	
Nó 4	2,7	
Nó 5	2,7	
Nó 6	2,6	
Nó 7	2,8	
Nó 8	2,8	
Nó 9	2,2	
Nó 10	2,8	
Nó 11	1,6	
Nó 12	3	
Nó 13	2,1	
Nó 14	1,1	
Nó 15	2,9	
Reservatório 1	888,51	
Reservatório 2	888,08	

Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 9 - Valores das válvulas e bombas da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória.

Identificador dos trechos	Geração ideal	
Válvula 11	66	Abertura das válvulas (%)
Válvula 13	53	
Válvula 14	60	
Bomba 1	1,29	Regulagem de velocidade (adimensional)
Bomba 2	1,39	

Fonte: Próprio autor (2022).

Para a realização das 1000 iterações o tempo computacional necessário foi de aproximadamente 10 min, sendo um tempo relevantemente pequeno quando se trata de simulações computacionais.

### 5.3.1 Busca aleatória com mais iterações

Com a simulação de 1000 iterações, apresentadas anteriormente, não foi possível encontrar uma iteração em que todos os valores de pressão ficaram entre o intervalo estabelecido por norma. Porém, foi mantido esse valor para que servisse de comparação para o método do algoritmo genético, que é capaz de encontrar a solução ótima com poucas gerações.

Contudo, foi realizada uma nova simulação definindo um número maior de iterações para que a iteração ideal pudesse ser encontrada no método de busca aleatória. Assim, foi definido um número de 10000, pois quanto mais iterações realizadas, maior a probabilidade de encontrar um cenário ideal de pressões.

Após a simulação das 10000 iterações, foi possível encontrar uma única iteração em que os valores de pressão estavam entre o determinado, de 10 a 50 m.c.a. Essa iteração foi a de número 4436, dentre as 10000 iterações geradas.

Os valores de pressão encontrados nessa iteração, principalmente em nós com valores extremamente elevados, como os nós de 6 a 13, apresentaram uma redução significativa em suas pressões, sendo a média de 44%. A Figura 5.8 traz a comparação entre os valores de pressão encontrados na iteração de número 4436 com a rede original, antes da simulação.

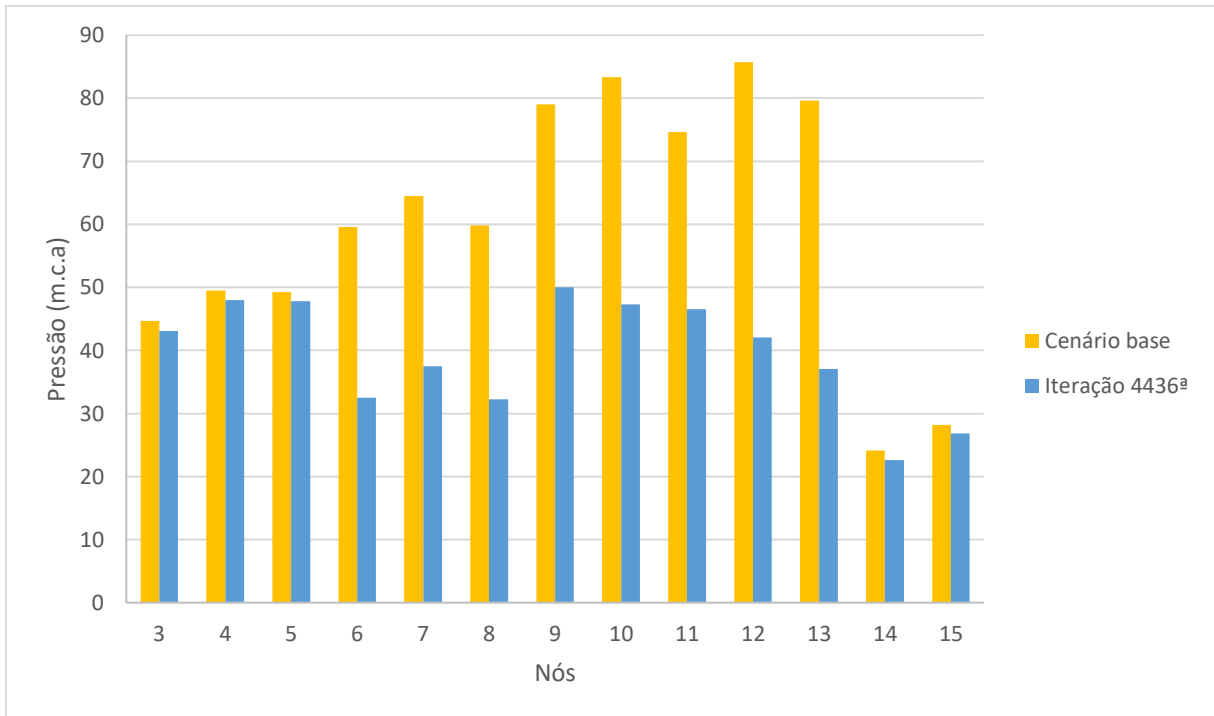


Figura 5.8 - Comparação entre as pressões da iteração ideal da simulação com 10000 iterações com o cenário base.

Fonte: Próprio autor (2022).

Já a perda encontrada nessa iteração foi relativamente menor que as perdas encontradas nas três iterações apresentadas anteriormente, quando o número de iterações totais da simulação era de somente 1000. Com isso, observa-se que a redução de perdas está diretamente relacionada à redução das pressões.

Assim, o valor da perda encontrada na iteração de número 4436, por meio da equação de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), foi de 45,69%, correspondendo a uma redução de 14,34% em relação a rede original, antes da simulação. A Figura 5.9 traz essa comparação entre a rede original e a iteração ideal das 10000 geradas.

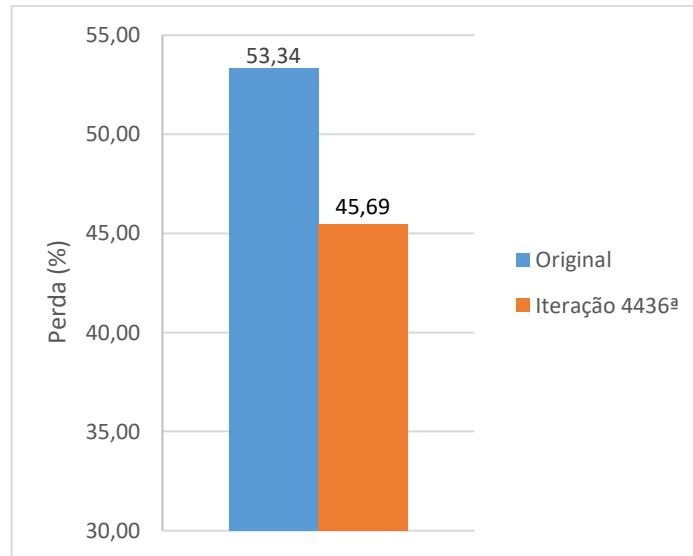


Figura 5.9 - Comparação entre as porcentagens de perdas da iteração ideal da simulação com 10000 iterações com o cenário base.

Fonte: Próprio autor (2022).

Também foi encontrado os novos valores de cada um dos parâmetros que foram variados, referentes a iteração 4436. Esses valores estão mostrados nas tabelas 10,11 e 12.

Tabela 10 - Valores de rugosidade e diâmetro da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória, com mais iterações.

Identificador dos trechos	Rugosidade	Diâmetro (mm)
	Iteração ideal	Iteração ideal
Tubulação 3	0,05	139
Tubulação 4	0,05	110
Tubulação 5	0,04	190
Tubulação 6	0,06	118
Tubulação 7	0,06	81
Tubulação 8	0,06	158
Tubulação 9	0,06	143
Tubulação 10	0,06	147
Tubulação 12	0,05	57
Tubulação 15	0,06	168
Tubulação 16	0,05	183
Tubulação 17	0,06	176
Tubulação 18	0,07	125

Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 11 - Valores de demanda e níveis dos reservatório da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória, com mais iterações.

Identificador dos nós	Iteração ideal	
Nó 3	2,8	Demanda (L/s)
Nó 4	1,2	
Nó 5	2	
Nó 6	1,7	
Nó 7	2,9	
Nó 8	1,4	
Nó 9	1,3	
Nó 10	1,6	
Nó 11	2,5	
Nó 12	1,2	
Nó 13	3	
Nó 14	1,9	
Nó 15	2,5	
Reservatório 1	890,33	
Reservatório 2	861,56	

Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 12 - Valores das válvulas e bombas dos reservatório da rede encontrado na iteração ideal da simulação de busca aleatória, com mais iterações.

Identificador dos trechos	Iteração ideal	
Válvula 11	56	Abertura das válvulas (%)
Válvula 13	53	
Válvula 14	54	
Bomba 1	1,01	Regulagem de velocidade (adimensional)
Bomba 2	1,23	

Fonte: Próprio autor (2022).

#### 5.4 Simulação do algoritmo genético na rede teórica

A segunda simulação realizada sobre a rede teórica de estudo foi do algoritmo genético. Para isso, foi aplicado os parâmetros estabelecidos para o desenvolvimento do algoritmo, como a recombinação, mutação e elitismo já descrito nos materiais e métodos. Para o número máximo de geração foi estabelecido em 1000 para que fosse possível comparar os resultados dessa simulação com a simulação anterior de busca aleatória. Também foi

determinado que o tipo de algoritmo utilizado seria o geracional elitista para que as melhores soluções pudessem ser preservadas para as gerações seguintes.

Para exemplificar como foram desenvolvidos o algoritmo e o seu funcionamento, a Figura 5.10 traz um fluxograma mostrando a lógica utilizada.

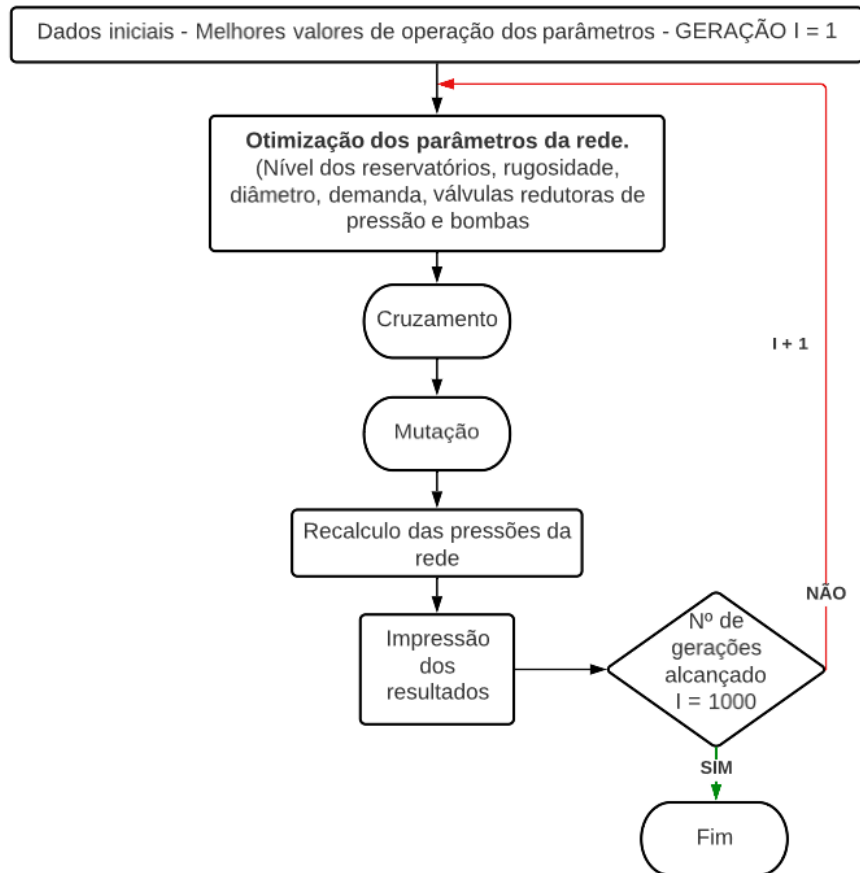


Figura 5.10 - Fluxograma da simulação do algoritmo genético.

Fonte: Próprio autor (2022).

O algoritmo genético desenvolvido visa minimizar as perdas de água da rede por meio da otimização das pressões. Para que fosse possível, foi determinado, para cada variável responsável por essa otimização de pressão, um intervalo para que o algoritmo pudesse utilizar em cada geração. Os valores dos parâmetros foram os mesmos utilizados na simulação anterior, para que a comparação dos resultados apresentados nessa simulação pudesse ser feita com a simulação anterior. E as variáveis também são as mesmas, sendo elas: nível dos reservatórios, rugosidade, diâmetro, demanda, variação de abertura das válvulas redutoras de pressão e funcionamento das bombas. A escolha desses valores para cada um dos parâmetros é feita por meio de sorteio, ou seja, o algoritmo busca, dentro dos intervalos de cada elemento, um valor de forma aleatória.

Após a escolha dos dados dos parâmetros, a rede passa por uma simulação hidráulica para que a nova pressão do sistema possa ser feita com base nesses valores. Esse loop é realizado até que a pressão média atingida em cada iteração seja menor que a pressão média calculada antes das alterações, ou seja, o valor de pressão encontrado na rede original. Além disso, existe um outro requisito para esses novos valores de pressão, sendo que eles necessitam estar entre a faixa estabelecida pela NBR 12218. Para encerrar a simulação total sobre a rede, é preciso que o número de iterações seja atingido; no caso do presente estudo, esse valor é de 1000. Com todos os requisitos cumpridos, a simulação é finalmente encerrada.

Como mencionado nos materiais e métodos o pacote GA utilizado facilitou o estudo e permitiu desenvolver de forma mais rápida e mais clara o algoritmo para a simulação.

Com isso, o algoritmo genético desenvolvido para o estudo da rede teórica, foi aplicado em 5 computadores diferentes, porém, com mesma configuração e capacidade, para que as simulações fossem geradas partindo de sementes diferentes. Ou seja, partindo de pontos diferentes no cruzamento dos dados para gerar as 1000 gerações. Dessa forma, é possível atestar a aplicabilidade do algoritmo desenvolvido. Para realizar essas simulações o tempo gasto foi em média de aproximadamente de 5 horas, sendo um tempo bem significativo para simulações computacionais.

Assim, com os valores das pressões médias encontradas em cada iteração, das cinco simulações, foi possível encontrar as perdas que cada um apresentou com base na Equação fornecida por Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), que se utiliza da pressão média para definir as perdas. E, com os dados gerados em cada uma das cinco simulações, foi analisado o que obteve a maior redução na porcentagem de ocorrência das perdas de água para a rede em estudo.

O resultado de perdas encontrados nas cinco simulações para as 1000 gerações realizadas em cada simulação, está apresentado nas Figuras 5.11 a 5.15. Nas Figuras, a coluna em verde corresponde à iteração dentro das 1000 que apresentou a melhor redução das perdas.

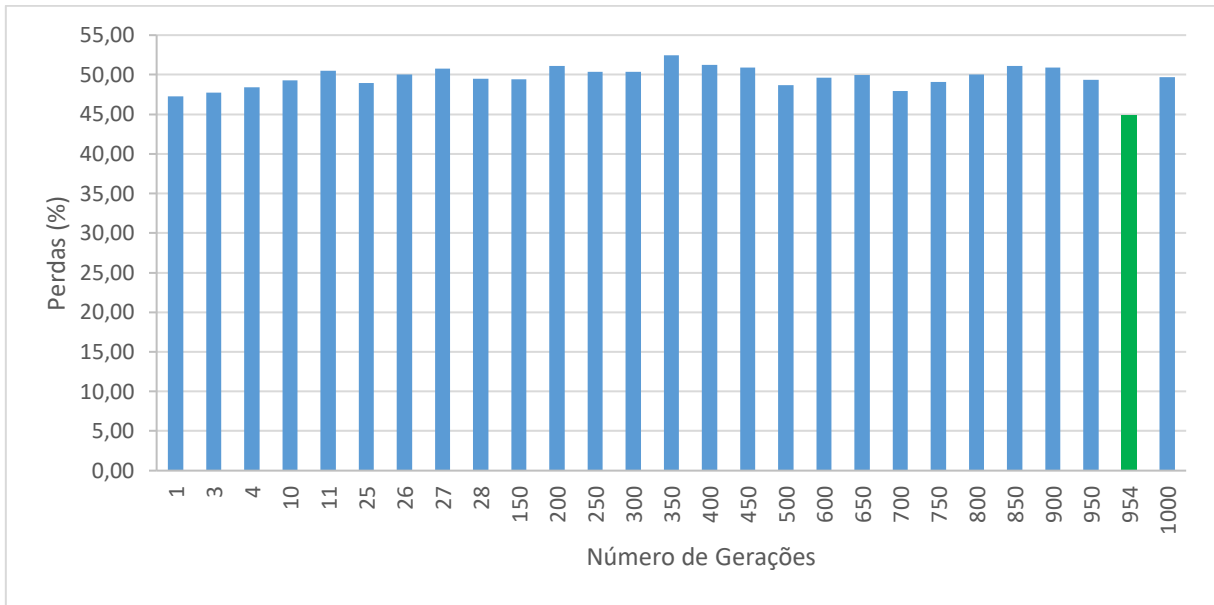


Figura 5.11 - Perdas encontradas nas 1000 gerações da 1ª simulação.

Fonte: Próprio autor (2022).

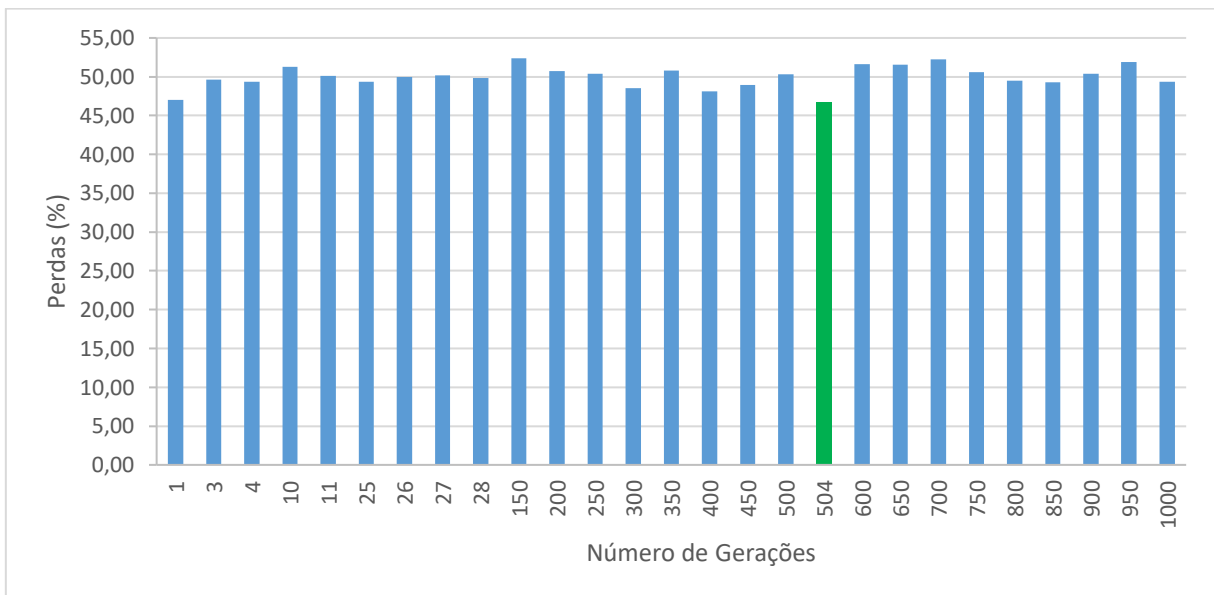


Figura 5.12 - Perdas encontradas nas 1000 gerações da 2ª simulação.

Fonte: Próprio autor (2022).



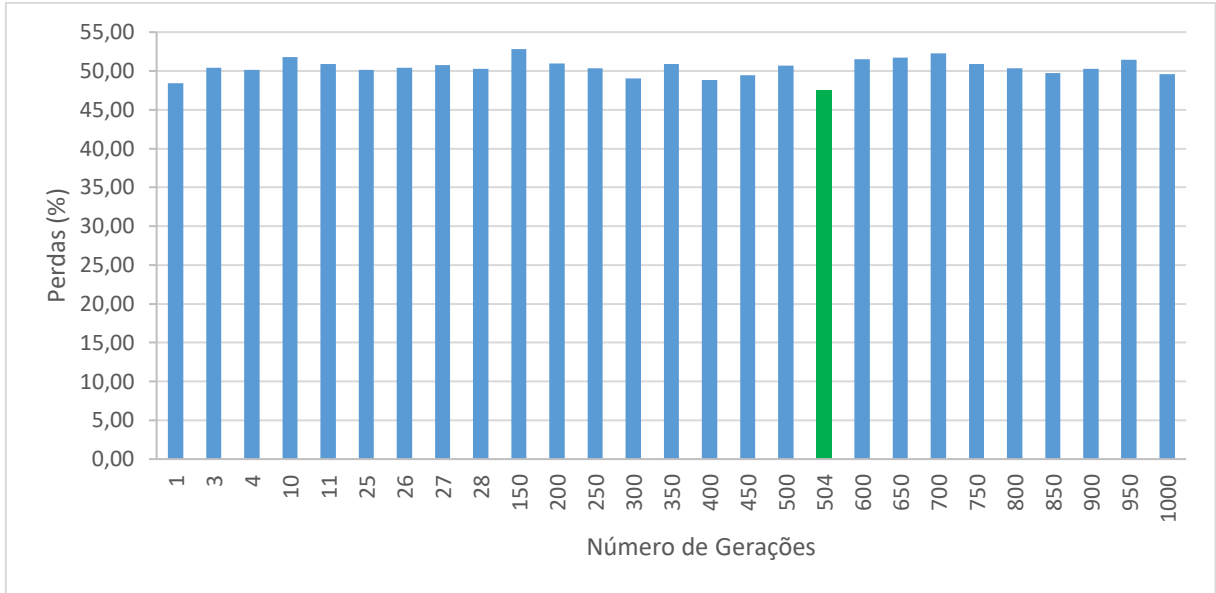


Figura 5.13 - Perdas encontradas nas 1000 gerações da 3ª simulação.

Fonte: Próprio autor (2022).

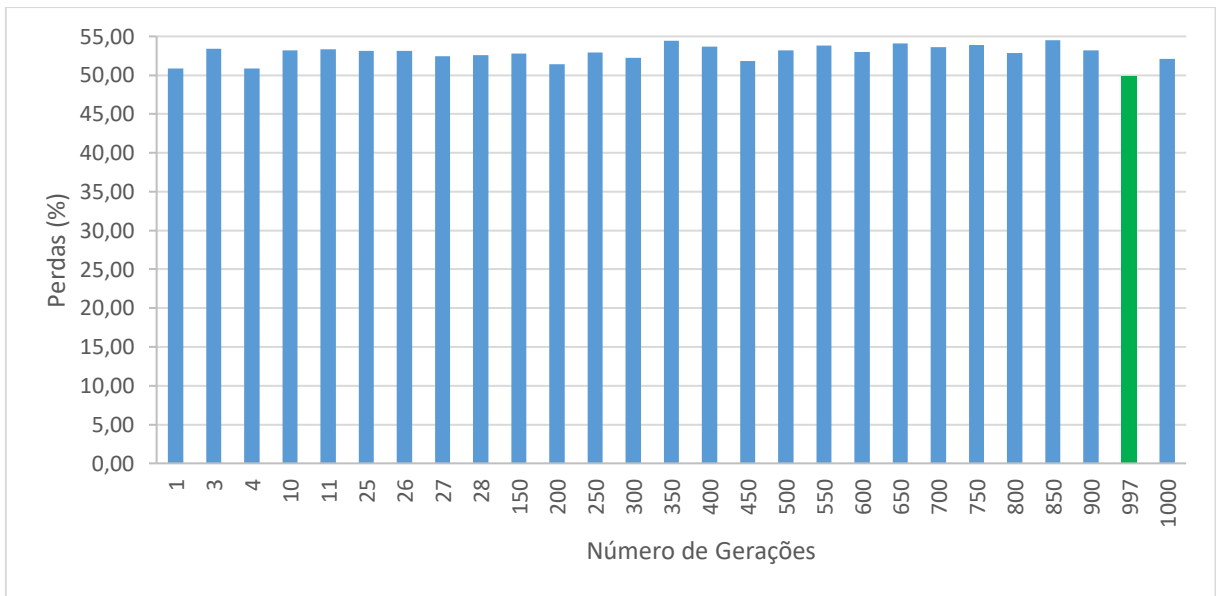


Figura 5.14 - Perdas encontradas nas 1000 gerações da 4ª simulação.

Fonte: Próprio autor (2022).

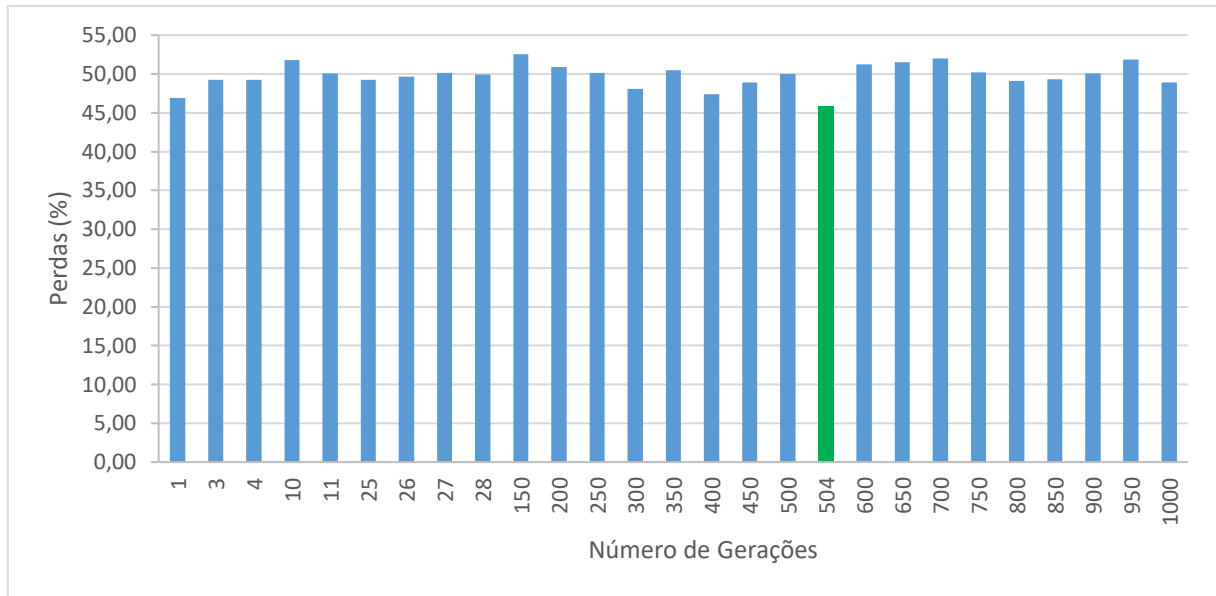


Figura 5.15 - Perdas encontradas nas 1000 gerações da 5ª simulação.

Fonte: Próprio autor (2022).

Analisando o comportamento das cinco simulações, é possível observar que, na 2ª, 3ª e 5ª simulação, a iteração ótima encontrada dentre das 1000 gerações foi a de número 504. E, já na 1ª e 4ª simulação, a iteração ótima se deu na iteração de número 954 e 997, respectivamente. Outro ponto da análise das cinco simulações é que a variação de perdas ao longo das 1000 gerações em todas as cinco simulações, foi praticamente constante, sem muita oscilação nos valores.

Quando se observa os valores de perdas encontrados nas cinco simulações a que apresentou o melhor valor de perda foi a primeira simulação, com uma porcentagem de 44,94%, correspondendo a geração de número 954, dentre as 1000 gerações realizadas. Com isso, observasse que o algoritmo foi capaz de encontrar uma solução ótima antes do fim das gerações determinadas a ele. A Figura 5.16 apresenta essa comparação entre as gerações ótima de cada simulação.

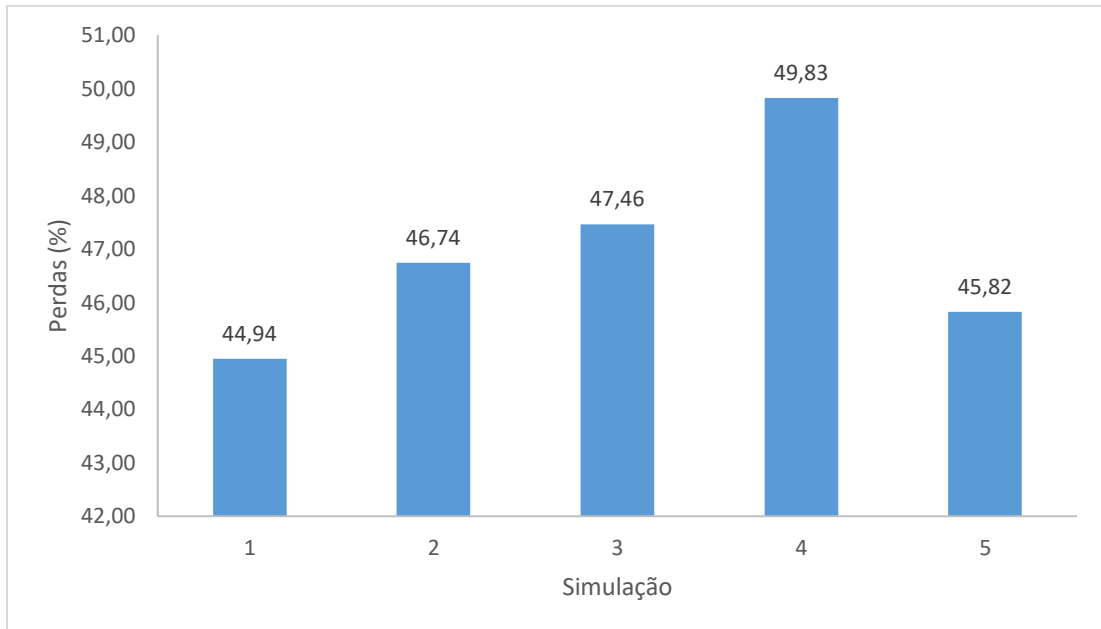


Figura 5.16 - Comparação entre os melhores valores de perdas de cada simulação.

Fonte: Próprio autor (2022).

Quando se compara esse valor da perda encontrada na melhor simulação, sendo ela a simulação do computador 1, em que o valor encontrado foi de 44,94% corresponde à geração de número 954, com a rede original que apresentava um valor de perdas de 53,34%, a redução encontrada com essa simulação por meio de algoritmo genético foi significativa, representando uma redução de 15,75% na ocorrência de perdas para a rede teórica estudada.

Outro fator importante na utilização da simulação por meio do algoritmo genético foi que a geração encontrada com a maior redução de perdas também apresentou um comportamento ideal das pressões nos nós da rede. Com isso, pontos em que as pressões eram extremamente altas sofreram reduções, ficando abaixo de 50 m.c.a. A Figura 5.17 mostra a comparação entre as pressões originais, antes da simulação da rede, em cada nó e as pressões da geração ótima encontrada na primeira simulação por meio do algoritmo genético.

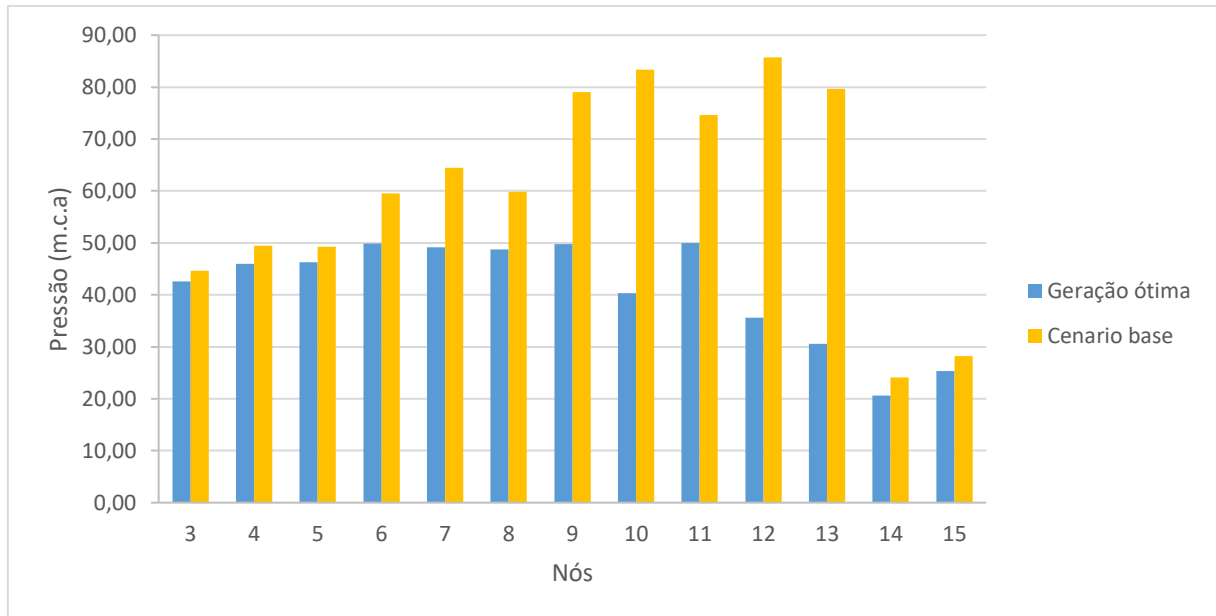


Figura 5.17 - Comparação entre as pressões do cenário base e a geração ótima.

Fonte: Próprio autor (2022).

Com os novos valores de pressão e conseqüentemente de perdas encontrados com essa simulação, também foram encontrados novos valores para os parâmetros da rede, uma vez que as pressões da rede são definidas com base nos parâmetros, como nível dos reservatórios, rugosidade, diâmetro, demanda, válvulas redutoras de pressão e funcionamento das bombas.

Assim, as Tabelas 13, 14 e 15 trazem os novos valores para os parâmetros da rede encontrados na simulação do algoritmo genético.

Tabela 13 - Valores de rugosidade e diâmetro da rede encontrado na geração ideal da simulação do algoritmo genético.

(continua)

Identificador dos trechos	Rugosidade	Diâmetro (mm)
	Geração ideal	Geração ideal
Tubulação 3	0,06	120
Tubulação 4	0,05	132
Tubulação 5	0,06	109
Tubulação 6	0,06	58
Tubulação 7	0,06	86
Tubulação 8	0,06	198
Tubulação 9	0,06	180

Tabela 13 - Valores de rugosidade e diâmetro da rede encontrado na geração ideal da simulação do algoritmo genético.

(conclusão)

Identificador dos trechos	Rugosidade	Diâmetro (mm)
	Geração ideal	Geração ideal
Tubulação 10	0,06	53
Tubulação 12	0,05	53
Tubulação 15	0,07	51
Tubulação 16	0,05	179
Tubulação 17	0,05	165
Tubulação 18	0,05	194

Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 14 - Valores de demanda e nível dos reservatórios da rede encontrado na geração ideal da simulação do algoritmo genético.

Identificador dos nós	Geração ideal	Demanda (L/s)
Nó 3	2,7	
Nó 4	1,7	
Nó 5	2,3	
Nó 6	2,6	
Nó 7	2,1	
Nó 8	1,3	
Nó 9	3,0	
Nó 10	1,6	
Nó 11	1,8	
Nó 12	1,9	
Nó 13	2,8	
Nó 14	1,1	
Nó 15	1,7	
Reservatório 1	893,29	
Reservatório 2	862,14	

Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 15 - Valores das válvulas e bombas da rede encontrado na geração ideal da simulação do algoritmo genético.

Identificador dos trechos	Geração ideal	
Válvula 11	50	Abertura das válvulas (%)
Válvula 13	50	
Válvula 14	63	
Bomba 1	1,46	Regulagem de velocidade (adimensional)
Bomba 2	1,37	

Fonte: Próprio autor (2022).

### 5.5 Comparando os dois métodos aplicados

Os dois métodos utilizados para estudar a rede teórica quanto a otimização de perdas e consequentemente de pressão, se mostraram eficientes, pois ambos alcançaram uma redução nas perdas que rede teórica apresentava, sendo mais expressiva no algoritmo genético, que no Aleatório.

Com a aplicação da metodologia de busca aleatória, foi possível encontrar três iterações, dentre as mil geradas em que a redução de perda foi superior as outras e consequentemente uma redução das pressões. Porém, a perda apresentada não foi tão significativa quando comparada com o valor encontrado pelo algoritmo genético. Sendo o valor da perda encontrada pela busca aleatória na iteração de número 217, sendo a melhor dentre as três iterações, de 48,12%, obtendo assim uma redução da perda de água para a rede de 9,79%.

Já com o algoritmo genético, foram geradas cinco simulações, todas com o mesmo número de gerações, porém partindo de sementes diferentes. Assim, a simulação que apresentou o melhor valor para as perdas foi a primeira realizada, em que o valor de perda foi de 44,94%, correspondendo a uma redução de 15,75% quando comparada a perda da rede original.

Com isso, analisando as melhores iterações encontradas em cada um dos métodos aplicados, aleatório e algoritmo genético, o algoritmo genético obteve maior redução. A Figura 5.18 traz essa comparação entre os dois métodos, onde a barra em azul representam a simulação aleatória e a barra em verde a simulação pelo algoritmo genético.

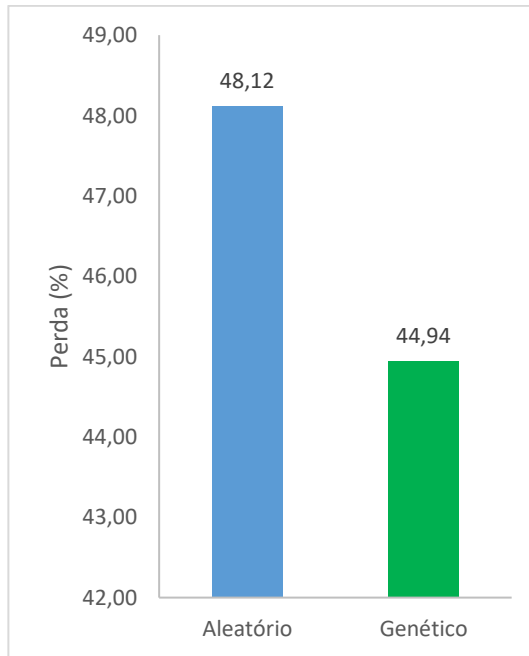


Figura 5.18 - Comparação entre o método aleatório e algoritmo genético.

Fonte: Próprio autor (2022).

Contudo, em ambos os métodos aplicados, aleatório e algoritmo genético, a redução não foi muito expressiva, quando se fala em rede de distribuição. Porém, tem que se relevar que, apesar de a rede ser teórica e configurada para possuir um comportamento real, ela é muito pequena quando comparada com sistemas reais.

Esse fato pode justificar a redução da perda encontrada pelo algoritmo genético não ser expressiva. Pois esse método tende a encontrar resultados melhores quando a quantidade de dados apresentadas é maior, como é o caso de redes reais que possuem mais nós.

Já para o aleatório, quando são geradas mais iterações, há mais probabilidade de se encontrar um arranjo de valores que permitiriam uma maior redução das pressões e, com isso, uma maior redução das perdas. Assim, com 10000 iterações, foi encontrada a iteração de número 4436, que apresentou todos os valores de pressão dentro da faixa estabelecida por norma e, com isso, uma redução de 14,34% das perdas encontradas na rede quando comparada com a rede original.

Outra questão a ser observada são os novos valores apresentados pelos parâmetros que foram variados em cada simulação. As Tabelas 16, 17 e 18 trazem esses novos valores encontrados em cada uma das simulações.

Tabela 16 – Comparação dos valores de rugosidade e diâmetro das simulações.

Identificador dos trechos	Rugosidade			Diâmetro (mm)		
	algoritmo genético	1000 iterações	10000 iterações	algoritmo genético	1000 iterações	10000 iterações
Tubulação 3	0,06	0,06	0,05	120	195	139
Tubulação 4	0,05	0,06	0,05	132	80	110
Tubulação 5	0,06	0,06	0,04	109	128	190
Tubulação 6	0,06	0,06	0,06	58	95	118
Tubulação 7	0,06	0,06	0,06	86	125	81
Tubulação 8	0,06	0,06	0,06	198	105	158
Tubulação 9	0,06	0,06	0,06	180	100	143
Tubulação 10	0,06	0,06	0,06	53	122	147
Tubulação 12	0,05	0,05	0,05	53	53	57
Tubulação 15	0,07	0,07	0,06	51	59	168
Tubulação 16	0,05	0,07	0,05	179	138	183
Tubulação 17	0,05	0,07	0,06	165	136	176
Tubulação 18	0,05	0,06	0,07	194	170	125

Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 17 – Comparação dos valores de demanda e nível dos reservatórios das simulações.

Identificador dos nós	algoritmo genético	1000 iterações	10000 iterações	Demanda (L/s)
Nó 3	2,7	2,6	2,8	
Nó 4	1,7	2,7	1,2	
Nó 5	2,3	2,7	2,0	
Nó 6	2,6	2,6	1,7	
Nó 7	2,1	2,8	2,9	
Nó 8	1,3	2,8	1,4	
Nó 9	3,0	2,2	1,3	
Nó 10	1,6	2,8	1,6	
Nó 11	1,8	1,6	2,5	
Nó 12	1,9	3,0	1,2	
Nó 13	2,8	2,1	3,0	
Nó 14	1,1	1,1	1,9	
Nó 15	1,7	2,9	2,5	
Reservatório 1	893,29	888,51	890,33	
Reservatório 2	862,14	888,08	861,56	

Fonte: Próprio autor (2022).



Tabela 18 – Comparação dos valores das válvulas e bombas das simulações.

Identificador dos trechos	algoritmo genético	1000 iterações	10000 iterações	
Válvula 11	50	66	53	Abertura das válvulas (%)
Válvula 13	50	53	53	
Válvula 14	63	60	61	
Bomba 1	1,46	1,29	1,42	Regulagem de velocidade (adimensional)
Bomba 2	1,37	1,39	1,34	

Fonte: Próprio autor (2022).

Com os valores apresentados pelas tabelas para as simulações do algoritmo genéticos e pelo duas simulações do aleatório, observasse que são parecidos, pois o mesmo intervalo de variação foi aplicado em ambas as simulações. Porém, os valores encontrados pela simulação aleatória com 1000 iteração apresentaram dados mais destoantes em comparação com as duas outras simulações, uma vez que a perda encontrada por essa simulação não foi favorável para a rede.

Além disso, as simulações pelo algoritmo genético e pelo aleatório de 10000 iterações apresentarem valores dos parâmetros variados muito próximos, isso se deu, pois os valores de pressão e consequentemente de perdas encontrados por cada uma foram muito próximos, possuindo uma diferença entre as perdas de apenas 1,41%. Justificando assim essa relação entre essas duas simulações.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo apresentado nesta pesquisa foi realizado sobre uma rede teórica desenvolvida para que as necessidades do trabalho fossem atendidas. Com isso, a rede definida apresentou comportamento de uma rede real, com a configuração de uma rede mista de topografia desfavorável, o que gerou uma variação na pressão, com pontos de pressões baixas e pontos com pressões muito altas, que permitiam a utilização de técnicas para a otimização da pressão. Além disso, os outros parâmetros da rede, como rugosidade, diâmetro, comprimento das tubulações, também foram definidos de forma que representasse os valores utilizados em sistemas reais de distribuição.

Foram utilizadas duas técnicas de simulação, a aleatória e a de algoritmo genético, com objetivo de encontrar a que apresentasse a melhor redução de perdas para rede teórica estudada. Entre os dois métodos, o que encontrou a melhor redução das perdas foi o algoritmo genético. A redução apresentada foi de 15,75%, enquanto o valor encontrado pelo método aleatório foi de 9,79%. Assim, foi possível afirmar que a melhor técnica foi o algoritmo genético.

Contudo, quando foram geradas mais iterações no método de busca aleatória, ele foi capaz de encontrar uma iteração em que todas as pressões eram ideais para o funcionamento da rede e conseqüentemente apresentou uma redução das perdas que a rede estudada apresentava.

Em relação ao tempo de simulação, a técnica do algoritmo genético exigiu muito mais que a aleatória, sendo necessário um tempo aproximado de 4 horas e 50 minutos para que a simulação das 1000 gerações fosse alcançada pelo algoritmo genético, em todas as cinco simulações realizadas, enquanto, no aleatório, para as mesmas 1000 iterações, o tempo necessário foi de apenas 10 minutos.

Outra questão importante são os valores das pressões dos nós da rede. No método aleatório, os valores de pressão encontrados para alguns nós críticos, como 9 e 11, não foram muito bons, porque não ocorreu uma redução significativa dos valores das pressões em nenhuma das três iterações ótimas. Mas, nos demais nós, a melhora nas pressões foi favorável para o funcionamento do sistema. Para que fosse possível encontrar valores ótimos de pressões para esses pontos, são necessárias mais iterações, como já mencionado. Porém, para que a comparação pudesse ser realizada entre os dois métodos, utilizou-se de base as 1000 iterações.

Já as pressões encontradas pelo algoritmo genético foram melhores, pois os valores encontrados em nós críticos, como 9 e 11, foram reduzidos significativamente e pontos com pressões mais baixas foram melhoradas. Assim, a utilização do algoritmo genético se mostrou mais eficiente que o aleatório.

O estudo aqui aplicado se limitou a uma única rede com configuração mista, porém muito pequena quanto comparado à estrutura de uma rede real, em que a quantidade de nós é muito grande, além de possuir muito mais elementos ativos aplicados a ela, como bombas e válvulas. Assim, é necessária a realização de trabalhos futuros, que apliquem a mesma metodologia apresentada por este trabalho, em redes com configurações mais complexas e de maior porte, com mais elementos ativos e com comportamento mais desfavorável do que o apresentado por esta pesquisa. Além disso, seria importante a realização de teste com mais iterações, aplicando-se da mesma tecnologia em redes teóricas de configurações diferentes da apresentada.

Também seria significativo realizar a comparação dos resultados apresentados pela metodologia desenvolvida com a metodologia baseada em redes neurais artificiais, quando aplicados sobre uma rede real de grande porte.

## REFERÊNCIAS

- ABE, N. **Proposição de calibração de redes de sistemas de abastecimento de água através de método híbrido**. 2014. 165p. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-24072014-094502/pt-br.php>. Acesso em: 20 out. 2021.
- ALEM SOBRINHO, P.; CONTRERA, C. R. **Introdução e Concepção de sistemas de abastecimento de água**. Disciplina: Saneamento Básico II. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2013. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/01-abastecimento-e-concepcao-2014-1-1/4843629/>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- ALVES, H. J. **Estudos de indicadores de eficiência hídrica, energética e de Sustentabilidade aplicados a sistemas de distribuição de água real do Sul de Minas Gerais**. 2018. 124p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Itajubá-MG. Disponível em: [https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1820/dissertacao\\_2018140.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1820/dissertacao_2018140.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 03 jan. 2023.
- AL-WASHALI, T. et al. Assessment of water losses in distribution networks: Methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 152, January 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104515>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- ANDRADE, M. R. **Balanco hidroenergético de sistemas de distribuição de água aplicado a um setor do município de Cambuí - MG**. 2016. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá-MG, 2016. Disponível em: [https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/494/dissertacao\\_andrade\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/494/dissertacao_andrade_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 03 jan. 2023.
- ANDRADE SOBRINHO, R. ; BORJA, P. C. Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: Um estudo dos fatores intervenientes na RMS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 783–795, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016116037>. Acesso em: 15 out. 2021.
- ARABZADEH, R. et al. WRSS: An Object-Oriented R Package for Large-Scale Water Resources Operation. **Water**, v. 13, n. 21, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13213037>. Acesso em: 02 mai. 2021.
- ARANDIA, E.; ECK, B. J. An R package for EPANET simulations. **Environmental Modelling and Software**, v. 107, p. 59–63, September, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.016>. Acesso em: 12 jun. 2021.
- ARAUJO, A. A. Q. Desempenho de rede de abastecimento de água a partir da simulação computacional utilizando o EPANET 2.0. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 55257 - 55269, Curitiba, August 2020. Disponível em: [org/10.34117/bjdv6n8-084](https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-084). Acesso em: 29 out. 2021.

ARAÚJO, A. A. Q. et al. Simulação de redes de abastecimento de água utilizando o EPANET 2.0. In: **Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade**. 12 de junho de 2020.

Disponível em:

[https://www.editorarealize.com.br/editora/ebooks/conimas/2019/ebook1/PROPOSTA\\_EV133\\_MD1\\_ID1805\\_28102019204428.pdf](https://www.editorarealize.com.br/editora/ebooks/conimas/2019/ebook1/PROPOSTA_EV133_MD1_ID1805_28102019204428.pdf). Acesso em: 12 jun. 2021.

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

ÁVILA, F. G. et al. Pressure management for leakage reduction using pressure reducing valves: case study in an Andean City. **Alexandria Engineering Journal**, v. 58, n. 4, p. 1313–1326, december 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.11.003>. Disponível em: 20 nov. 2021.

BAR, H.; MENTCH, L. R-CMap: an open-source software for concept mapping. **Evaluation and Program Planning**, v. 60, p. 284–292, February 2017. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2016.08.018>. Acesso em: 29 out. 2021.

BARBEDO, M. D. G. **Estudos de calibração de redes de abastecimento de água utilizando o acoplamento dos softwares R e EPANET**. 2022. 65p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2022. Disponível em:

<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3077>. Acesso em: 01 mai. 2022.

BERASTEGI, G. I.; ARRIBA, R. G. Using Open Source Software In Engineering Studies To Teach Water Operation & Management. In: **IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)**, p. 1397–1404, april 2017. Disponível em: doi:

10.1109/EDUCON.2017.7943030. Acesso em: 29 out. 2021.

BARROS FILHO, M. B. B. **Desenvolvimento de Sistema de Geoinformação como Suporte ao Gerenciamento das Redes de Distribuição de Água**. 2005. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Geodésica e Tecnologias da Geoinformação), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005. Disponível em:

<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/3340>. Acesso em: 16 jul. 2022.

BEZERRA, S. DE T. M.; DA SILVA, S. A.; GOMES, H. P. Operational optimisation of water supply networks using a fuzzy system. **Water SA**, v. 38, n. 4, p. 565–572, 2012.

BISCOS C.; MULHOLLAND M.; LANN M-V. L.; BUCKLEY C. A.; BROUCKAERT C.J. Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP. **Water AS**, v. 29, n. 4, p. 393-404, 2003.

BOZORG-HADDAD, O; LATIFI, M.; BOZORGI, A.; RAJABI, M. M.; NAEENI, S. T.; LOÁICIGA, H. A. Development and application of the anarchic society algorithm (ASO) to the optimal operation of water distribution networks. **Water Science & Technology: Water Supply**. v. 18.1, 2018.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Diagnóstico Temático Serviço de Água e Esgoto – Visão Geral**. Brasília, 2021.

Disponível em:

[http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO\\_TEMATICO\\_VISAO\\_GERAL\\_AE\\_SNIS\\_2021.pdf](http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2021.pdf). Acesso em: 15 out. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional da Saúde. **Redução de perdas em sistemas de abastecimento de água**. 2ª ed. Brasília: Funasa, 2014. Disponível em: [http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files\\_mf/reducao\\_de\\_perdas\\_em\\_saa74.pdf](http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/reducao_de_perdas_em_saa74.pdf). Acesso em: 12 jun. 2022.

CHAGAS, E. M. P. F.; RODRIGUES, D. L.; TAVARES, J. M. R. S. Método de segmentação de objectos em imagens baseado em contornos activos e algoritmo genético. **In: Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería**, n. May, p. 491–507, 2014.

CHAVEIRO, P.; ISIDORO, J. M. G. P. Modelação e Calibração da Rede de Abastecimento de Água de Reguengos de Monsaraz. **Revista Recursos Hídricos**, v. 42, n. 1, p. 41–48, Março 2021. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/356052697\\_Modelacao\\_e\\_Calibracao\\_da\\_Rede\\_de\\_Abastecimento\\_de\\_Agua\\_de\\_Reguengos\\_de\\_Monsaraz](https://www.researchgate.net/publication/356052697_Modelacao_e_Calibracao_da_Rede_de_Abastecimento_de_Agua_de_Reguengos_de_Monsaraz). Acesso em: 02 mai. 2021

CHEN, W. et al. Genetic optimization toward operation of water intake-supply pump stations system. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, january 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123573>. Acesso em: 25 set. 2021.

CHEUNG, P. B. **Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo**. 2004. 288p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2004. Disponível em: <https://doi:10.11606/T.18.2004.tde-30092008-185242>. Acesso em: 10 fev. 2022.

CHINI, C. M.; STILLWELL, A. S. The State of U.S. Urban Water: Data and the Energy-Water Nexus. **Water Resources Research**, v. 54, n. 3, p. 1796–1811, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2017WR022265>. Acesso em: 09 mai. 2021.

COSTA, L. H. M.; RAMOS, H. M.; DE CASTRO, M. A. H. Hybrid genetic algorithm in the optimization of energy costs in water supply networks. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 10, n. 3, p. 315–326, 2010.

COSTA, L. H. M.; DE CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H. **Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água**. [s.l:s.n.].

COSTA, L. H. M.; FROTA, A. F. Tutorial da ferramenta toolkit do Epanet para programadores. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL- SIBESA, XIV., 18 a 20 jun. 2018, Foz do Iguaçu/PR. **Anais [...]**, Foz do Iguaçu/PR, 2018. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/54702/1/2018\\_eve\\_lhmcosta.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/54702/1/2018_eve_lhmcosta.pdf). Acesso em: 26 mai. 2021.

COULBECK, B. Optimal operations in non-linear water networks. **Optimal Control Applications and Methods**, v. 1, n. 2, p. 131–141, 1980.

CRAN. **Comprehensive R Archive Network (CRAN)**. Disponível em <https://cran.r-project.org/>. Acesso em: 20 mai 2021.

ECK, B. J. An R package for reading EPANET files. **Environmental Modelling & Software**, v. 84, p. 149–154, october 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.027>. Acesso em: 23 mai. 2021.

ESTEVÃO, L. B. **Propagação de incertezas em redes bayesianas através do método de monte carlo e lógica fuzzy para aplicação em análise probabilística de segurança de centrais nucleares**. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.con.ufrj.br/wp-content/uploads/2019/07/Tese-Lilian-Braga-Estev%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2022.

FERREIRA, I. R. D. **Estudo da calibração de redes de distribuição de água submetidas ao regime transiente utilizando algoritmos genéticos e diferentes funções objetivo**. 2019. 186p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/44483>. Acesso em: 28 nov. 2022.

FONTANA, N.; GIUGNI, M.; PORTOLANO, D. Losses reduction and energy production in water-distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Reston, v. 138, n. 3, p. 237–244, 2012. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-). Acesso em: 13 jun. 2021.

FREIRE, F. B. F. Reservatórios e redes. In: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Sistemas Hidráulicos Urbanos**. Arquivo 08. Disponível em: [http://paginapessoal.utfpr.edu.br/flaviofreire/sistemas-hidraulicos-2/sistemas-hidraulicos-urbanos/SHU\\_08.pdf](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/flaviofreire/sistemas-hidraulicos-2/sistemas-hidraulicos-urbanos/SHU_08.pdf). Acesso em: 28 ago. 2021.

FRITZ, R. T.; GIMENES, J. DE C.; PINA FILHO, A. C. DE. Um estudo da automação para redução de perdas na rede de distribuição de água. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 56408–56416, 2020. Disponível em: [//doi.org/10.34117/bjdv6n8-161](https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-161). Acesso em: 27 mai. 2022.

GALVÃO, C. O. et al. **Sistemas inteligentes - aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Volume 7, Porto Alegre, 1999.

GAMBOA-MEDINA, M. **DETECÇÃO DE VAZAMENTOS E ALTERAÇÕES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO, DURANTE A OPERAÇÃO, USANDO SINAIS DE PRESSÃO**. 2017. 130 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-27102017-095158/publico/TeseMedinaMariaMercedesGamboaCorrig.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2022.

GOULART, T. D. C. **Estudo de Aprimoramento de Algoritmo de Calibração e Aplicação em Redes de Distribuição de Água de Cambuí (MG)**. 2015. 197p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/147>. Acesso em: 27 nov. 2022.

GUANAIS, A. L. R.; COHIM, E. B.; MEDEIROS, D. L. **Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água**. Artigo Técnico. 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522017146180.

GUPTA, A. D.; KULAT, K. Leakage reduction in water distribution system using efficient pressure management techniques. Case study: Nagpur, India. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 18, n. 6, p. 2015–2027, 2018.

HELLER, L; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para o consumo humano**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

HENNING, E. et al. Para além da computação estatística: o uso do ambiente R para o ensino de métodos numéricos. **RENOTE**, v. 14, n. 1, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.22456/1679-1916.67348>. Acesso em: 12 jun. 2021.

IGLESIAS-REY, P. L.; MARTÍNEZ-SOLANO, F. J.; RIBELLES-AQUILAR, J. V. Extending EPANET Capabilities with Add-In Tools. **Procedia Engineering**, v. 186, p. 626-634, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.279>. Acesso em: 12 jun. 2021.

JERICÓ, S. D. C.; FERNANDES, R.O.; SILVA, J. F. Avaliação hidráulica da rede de abastecimento de água da cidade de Várzea Alegre - CE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XX., 17 a 22 nov. 2013, Bento Gonçalves - RS. **Anais [...]**. Bento Gonçalves - RS, 2013. Disponível em: [https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/52104f79908ab9e6732fb26e260b28c8\\_c8b1a59eb6cce8966f8549ceb2cdd971.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/52104f79908ab9e6732fb26e260b28c8_c8b1a59eb6cce8966f8549ceb2cdd971.pdf). Acesso em: 29 out. 2021.

KANAKOUDIS, V.; MUHAMMETOGLU, H. Urban water pipe networks management towards non-revenue water reduction: two case studies from Greece and Turkey. **Clean - Soil Air Water**, v. 42, n. 7, p. 880–892, 2014. Disponível em: 10.1002/clen.201300138. Acesso em: 15 ago. 2021.

KEEDWELL, E.; KHU, S. T. A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution networks. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. v. 18, n 4, p. 461-472, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2004.10.001> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197604001423>. Acesso em: 29 nov. 2022.

KELLNER, E.; TINTI, G. D. Aplicação de algoritmo computacional para o dimensionamento de redes de distribuição de água. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 2, n. 1, p. 1–5, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18554/rbcti.v2i1.1105>. Acesso em: 29 ago. 2021.

KEPA, U. Use of the hydraulic model for the operational analysis of the water supply network: A case study. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 3, p. 1–15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13030326>. Acesso em: 02 mai. 2021.

KONRATH, A. C. et al. Desenvolvimento de Aplicativos Web Com R e Shiny: inovações no ensino de Estatística. **Abakós**, v. 6, n. 2, p. 55–71, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5752/P.2316-9451.2018v6n2p55-71>. Acesso em: 12 jun. 2021.



KUREK, W.; OSTFELD, A. Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems. **Journal of Environmental Management**, v. 115, p. 189–197, 2013.

KURIAN, V. et al. Optimal operation of water distribution networks with intermediate storage facilities. **Computers and Chemical Engineering**, v. 119, p. 215–227, november 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.04.017>. Acesso em: 29 set. 2021.

LANDEIRO, V. L. **Introdução ao uso do programa R**. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Programa de Pós Graduação em Ecologia, 2011. Disponível em: <https://cran.r-project.org/doc/contrib/Landeiro-Introducao.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2021.

LEHNS, Laboratório de eficiência energética e Hidráulica em saneamento. **EPANET 2.0**. Disponível em: <http://ct.ufpb.br/lehns/contents/menu/epanet>. Acesso em: 12 mai 2021.

LETTING, L. K.; HAMAM, Y.; ABU-MAHFOUZ, A. M. An interface for coupling optimization algorithms with EPANET in discrete event simulation platforms. In: IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics, INDIN, 24-26 July. **Proceedings[...]** 2017, p. 1235–1240, 2017. Disponível em: 10.1109/INDIN.2017.8104951. Acesso em: 16 mai. 2022.

LIMA, R. P.; SILVA, A. R.; SILVA, Á. P. Soil & Tillage Research soilphysics: an R package for simulation of soil compaction induced by agricultural field traffic. v. 206, february 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104824>. Acesso em: 20 ago. 2021.

LIMA, L. O.; ARAÚJO, J.T.; LIMA, A. M. S.; RIBEIRO, M. A. F. M. ARAÚJO, J. K. T. ESTIMATIVA DOS TIPOS DE PERDAS DE ÁGUA PELO MÉTODO DO BALANÇO HÍDRICO NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO EM CIDADES DA GRANDE JOÃO PESSOA. **Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa**. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2019. Disponível em : [https://www.aprh.pt/ZonasCosteiras2019/docs/REV\\_IXzonasCosteiras\\_47\\_poster.pdf](https://www.aprh.pt/ZonasCosteiras2019/docs/REV_IXzonasCosteiras_47_poster.pdf). Acesso em: 05 mai. 2022.

MACEDO, L. Q. **Avaliação hidráulica de rede teórica com acoplamento de módulo EPANET ao programa R**. 2020. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2020.

MAKISHA, N; KAZIMIROVA, T. Principles of energy saving in water supply and sewage systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH IN MECHANICAL ENGINEERING SCIENCES, 2017, Manipal. **Proceedings [...]**. Paris: EDP Sciences, 2018. p. 1-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814404013>. Acesso em: 15 jun. 2021.

MARCHI, A.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Optimization of Pump Operation Using Rule-Based Controls in EPANET2: New ETTAR Toolkit and Correction of Energy Computation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 7, 2007.

MARTÍNEZ, F. et al. Optimizing the operation of the Valencia water-distribution network. **Journal of Hydroinformatics**, v. 9, n. 1, p. 65–78, 2007.

MARTINHO, W. C. S.; MELO, R. A.; SÖRENSEN, K. An enhanced simulation-based iterated local search metaheuristic for gravity fed water distribution network design optimization. **Computers and Operations Research**, v. 135, november 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105429>. Acesso em: 18 mai. 2022.

MARTINHO, W. C. S. **An improved simulation-based iterated local search metaheuristic for gravity fed water distribution network design optimization**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2020.

MAURER, Ed. T. **Package ‘Hydraulics’**. 2019. Disponível em: <https://cran.rproject.org/web/packages/hydraulics/hydraulics.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2021.

MEYERS, S.; SHAMIR, U. Optimal annual operation of a water supply and distribution system. **Advances in Water Resources**, v. 5, n. 4, p. 240–247, 1982.

MONTENEGRO, L. L.; SALVINO, M. M.; SANTOS, D. S. AVALIAÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO NOS HIDRÔMETROS DOMICILIARES DAS LIGAÇÕES DE ÁGUA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE JOÃO PESSOA-PB. **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES**, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://abesnacional.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento29/TrabalhosCompletoPDF/XI-066.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2022.

MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS DE CONTROLE DE PERDAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA. **Pesquisa Operacional**, v. 30, n. 1, p. 15-32, janeiro a abril 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pope/a/mCgyZSttZsVt67SqGng6mFF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 jun. 2022.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Methods and tools for managing losses in water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 139, n. 2, p. 166–174, 2013. Disponível em: [doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000245). Acesso em: 11 mai. 2022.

NAVEIRO, A. P.; OLIVEIRA, F. L. C.; MAÇAIRA, P. M. O uso do software R como ferramenta de apoio à Probabilidade, Estatística e Pesquisa operacional em Engenharia de Produção. **Departamento de Engenharia Industrial**, p. 84, 2016. Disponível em: [https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio\\_resumo2016/relatorios\\_pdf/ctc/IND/IND-Andr%C3%A9%20Provenzano%20Naveiro.pdf](https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2016/relatorios_pdf/ctc/IND/IND-Andr%C3%A9%20Provenzano%20Naveiro.pdf). Acesso em: 22 mai. 2022.

NETO, R. E. P. **AVALIAÇÃO DA CODIFICAÇÃO REAL E BINÁRIA NA IDENTIFICAÇÃO DAS RUGOSIDADES DE TUBULAÇÕES APLICANDO ALGORITMO GENÉTICO COM O MÉTODO TRANSIENTE INVERSO**. 2021. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/58450>. Acesso em: 28 nov. 2022.

ODAN, F. K.; RIBEIRO REIS, L. F.; KAPELAN, Z. Real-time multiobjective optimization of operation of water supply systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 9, p. 1–11, 2015

OLIVEIRA, P. F. DE; GUERRA, S.; MCDONNELL, R. **Ciência de Dados com R**. Brasília: Editora IBPAD, 2018.

OLIVEIRA G.et al. **Perdas de água 2019 (SNIS 2017):** desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico. Go associados. São Paulo. 2019. Disponível em: [https://tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/Estudo\\_de\\_Perdas\\_2019\\_5.pdf](https://tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/Estudo_de_Perdas_2019_5.pdf). Acesso em: 12 jun. 2022.

OUGUI, J. Y. **Estudo da operação otimizada de sistema de bombeamento de água**. 2003. 145p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-01112016-162819/publico/Dissert\\_Ougui\\_JorgeY\\_corrigeida.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-01112016-162819/publico/Dissert_Ougui_JorgeY_corrigeida.pdf). Acesso em: 29 out. 2021.

PAPAIIOANNOU, I.; BETZ, W.; ZWIRGLMAIER, K.; STRAUB, D. MCMC algorithms for Subset Simulation. **Probabilistic Engineering Mechanics**. v. 41, p. 89-103, 2015

PEZESHK, S.; HELWEG, O. J.; OLIVER, K. E. Optimal Operation of Ground-Water Supply Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 120, n. 5, p. 573–586, 1994.

PLAKIDAS, K.; SCHALL, D.; ZDUN, U. Evolution of the R software ecosystem : Metrics , relationships , and their impact on qualities. **The Journal of Systems and Software**, v. 132, p. 119–146, 2017.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006

PRICE, E.; OSTFELD, A. Discrete pump scheduling and leakage control using linear programming for optimal operation of water distribution systems. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 140, n. 6, p. 1–16, 2014.

RACINE, J. S. Rstudio: A Platform-Independent IDE for R and Sweave. **Journal of Applied Econometrics**, v. 27, n. 1, p. 167–172, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jae.1278>. Acesso em: 12 mai. 2021.

RIGHETTO, Antonio Marozzi. Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água. **Seminário de planejamento, projeto e operação de redes de abastecimento de água: o estado da arte e questões avançadas**. João Pessoa. 16p. CD-ROM, 2002.

ROSSMAN, L. A. **EPANET programmer’s Toolkit Manual**. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency: Cincinnati, 2000. Disponível em: [https://lopez-ibanez.eu/doc/toolkit\\_help.pdf](https://lopez-ibanez.eu/doc/toolkit_help.pdf). Acesso em: 22 out. 2022.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2.0 Manual do Usuário**. traduzido e adaptado por Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. Universidade Federal da Paraíba,

2009. Disponível em: [http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/documentos/programa-epanet/manual\\_do\\_epanet\\_brasil.pdf](http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/documentos/programa-epanet/manual_do_epanet_brasil.pdf). Acesso em: 12 jun. 2021.

RStudio TEAM. **Download the RStudio IDE**. Disponível em: <https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/>. Acesso em: 12 mai. 2021.

SALOMONS, E. et al. Optimizing the operation of the Haifa-A water-distribution network. **Journal of Hydroinformatics**, v. 9, n. 1, p. 51–64, 2007.

SAMIR, N. et al. Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems. **Alexandria Engineering Journal**, v. 56, n. 4, p. 601–612, 2017.

SANZ, G.; PÉREZ, R.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. Leak detection and localization through demand components calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management, Reston**, v. 142, n. 2, p. 159-164, 2016. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000592](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000592). Acesso em: abr. 2021.

SCRUCCA, L. “GA: A Package for Genetic Algorithms in R.” **Journal of Statistical Software**, 53(4), 1–37, 2013. DOI:10.18637/jss.v053.i04.

SELA, L.; SALOMONS, E.; HOUSH, M. Environmental Modelling & Software Plugin prototyping for the EPANET software. **Environmental Modelling and Software**, v. 119, p. 49–56, may 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.05.010>. Acesso em: 26 ago. 2021.

SHAMIR, U.; SALOMONS, E. Optimal real-time operation of urban water distribution systems using reduced models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 134, n. 2, p. 181–185, 2008.

SILVA, A. T. Y. L. **Proposição de estratégia operacional ótima em rede de distribuição de água**. 2019. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2019.

SILVA, H. B. **Rastreamento da água da rede de abastecimento da cidade de Guarabira – PB**. 2020. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/20324>. Acesso em: 12 jun. 2021.

SILVA JÚNIOR, J. F. **Deteção de Perdas em Sistemas de Distribuição de Água através de Redes de Sensores Sem Fio**. 2017. 166p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/29444/1/DISSERTA%20c3%87%20c3%83O%20J%20o%20c3%a3o%20Ferreira%20da%20Silva%20J%20c3%banior.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2021.

SIMPSON, A.R.; DANDY, G.C.; MURPHY, LAURENCE (1994). Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v.120, n.4, p.423-443.

SOBRINHO, R. A; BORJA, P. C. Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: Um estudo dos fatores intervenientes na RMS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. n. 4, v. 21, p. 783-795, 2016.

SOLGI, R.; BOZORG-HADDAD, O.; SEIFOLLHAHI-AGHMIUNI, S.; ABIAZANI, P. G. Optimal Operation of Water Distribution Networks under Water Shortage Considering Water Quality. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 7, n. 3, 2016.

SOUSA, A. C. **Otimização hidroenergética da operação de sistemas de distribuição de água**. 2013. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3598>. Acesso em: 20 set. 2022.

SOUSA, A. C. DE; SOARES, A. K. Modelo para otimização da operação de sistemas de distribuição de água utilizando o algoritmo genético multiobjetivo SPEA. **Exacta-EP**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 313–324, 2014. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/5193/2896>. Acesso em: 11 jun. 2022.

SOUSA, A. C.; SOARES, A. K. Modelo para otimização hidroenergética da operação de bombeamento em sistemas de distribuição de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, n. 3, p. 429–440, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190255>. Acesso em: 29 out. 2022.

SOUSA, D. F. et al. R software packages as a tool for evaluating soil physical and hydraulic properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 168, january 2020. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1016/j.compag.2019.105077>. Acesso em: 29 out. 2021.

TARDELLI FILHO, J. Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água. **Revista DAE**, v. 64, n. 201, p. 6–20, 2015. Disponível em: [http://revistadae.com.br/artigos/artigo\\_edicao\\_201\\_n\\_1622.pdf](http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_201_n_1622.pdf). Acesso em: 10 set. 2021.

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

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 125, n. 3, p. 277–285, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:3\(277\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:3(277))

VIEIRA, L. T. DA S. **Análise e avaliação do comportamento de parâmetros hidráulicos de uma rede de distribuição de água do Sul de Minas Gerais**. 2019. 97p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1967>. Acesso em: 14 mai. 2021.

WANG, J. SWITCHED CONTROL STRATEGIES FOR OPTIMIZED OPERATION OF DWDS. [s.l.] IFAC, v. 40, 2007

WERNER, L.; MARTINS, V. L. M.; BIGUELINE, C. B. Aplicação da Simulação de Monte Carlo para Modelagem dos Volume Total de um Cosmético, **XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Belo Horizonte-MG, 2011.

WICKHAM, H.; GROLEMUND, G. **R para data Science - Importe, Arrume, Transforme, Visualize e Modele Dados**. Tradução de Samantha Batista. Rio de Janeiro: Editora Alta Books, 2019.

XU, Q. et al. Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks. **Ecological Informatics**, v. 26, n. P1, p. 111–116, 2015.

YORIYAZ, H. Monte Carlo Method: principles and applications in Medical Physics (in Portuguese), **Brazilian Journal of Medical Physics**. São Paulo, 2009.

ZHANG, Y. et al. Multi-model based pressure optimization for large-scale water distribution networks. **Control Engineering Practice**, v. 95, february 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104232>. Acesso em: 29 out. 2022.

ZYL J. E. V.; SAVIC D.; WALTERS G. A. Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 2, p. 160-170, 2004.