

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

**Estudos de Calibração de Rede de Distribuição de Água Real com Uso de Redes Neurais
Artificiais com Vistas ao Controle de Perdas de Água**

Mateus Cortez Marcondes

Itajubá (MG)

2023

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

Mateus Cortez Marcondes

Estudos de Calibração de Rede de Distribuição de Água Real com Uso de Redes Neurais
Artificiais com Vistas ao Controle de Perdas de Água

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

Agradeço primeiramente a Deus por abençoar minha caminhada acadêmica, à minha família que está sempre presente e que me orgulho muito, meus pais, Célio e Lúcia, minha irmã Ana Cristina, minha namorada Mariana e todos que contribuíram diretamente especialmente ao Professor Doutor Fernando que acompanhou de perto esta trajetória e ao doutorando Alex Takeo Yasumura Lima Silva que contribuiu com os estudos de calibração e apoio no acoplamento dos *softwares*.

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 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.

RESUMO

O abastecimento de água compreende uma das vertentes do saneamento básico onde os direitos fundamentais de todo cidadão devem ser garantidos em virtude das leis que regem suas diretrizes. O poder público, em âmbito municipal, é um dos principais responsáveis sobre a gestão e funcionamento dos sistemas de abastecimento de água, gerenciando a infraestrutura e instalações em todos os processos para garantir o pleno funcionamento para o cumprimento das obrigações em torno do fornecimento dos recursos. Considerando a temática de perdas de água, as abordagens de simulações de redes permitem adequações e proposições de melhorias que garantem o fornecimento de água eficiente, entretanto devido às incertezas com relação a parâmetros de entrada para previsões realistas é necessário a etapa de calibração. O trabalho tem por objetivo aplicar uma metodologia de calibração com redes neurais artificiais para uso em rede de distribuição de água. A metodologia consiste no uso de redes neurais artificiais para fazer a calibração a partir de dados de entrada na rede real, com o uso do Python como ambiente de programação utilizado. Os resultados apresentam que estas ferramentas se demonstram promissoras para analisar este tipo de problema, tendo em vista a complexidade de análise hidráulica diante de diferentes cenários e grande quantidade de informações geradas. As calibrações evidenciam que o uso de Redes Neurais Artificiais consegue bons níveis de calibração em meio ao cenário escasso de informações em redes reais e atinge melhores resultados comparado a outros métodos de calibração como o método de busca iterativa aleatória. Assim a continuidade desta pesquisa pode fortalecer melhores calibrações visando sistemas reais e o controle de perdas em seus sistemas de distribuição de água. Novos estudos e tecnologias podem contribuir para a diminuição de perdas e conseqüentemente a economia de água, recurso este que é escasso e determinante para a sociedade.

Palavras-chave: Sistema de Abastecimento de Água, Redes de distribuição de Água, Inteligência Artificial, Calibração de Redes, Simulação Hidráulica.

ABSTRACT

Water supply comprises one of the aspects of basic sanitation where the fundamental rights of every citizen must be guaranteed by virtue of the laws that govern its guidelines. The public power, at the municipal level, is one of the main responsible for the management and operation of water supply systems, managing the infrastructure and facilities in all processes to ensure the full operation to fulfill the obligations surrounding the supply of resources. Considering the theme of water losses, network simulation approaches allow adjustments and propositions of improvements that ensure efficient water supply, however due to the uncertainties regarding input parameters for realistic predictions the calibration step is necessary. This paper aims to apply a calibration methodology with artificial neural networks for use in water distribution networks. The methodology consists in the use of artificial neural networks to make the calibration from input data in the real network, with the use of Python as the programming environment used. The results show that these tools prove to be promising for analyzing this type of problem, considering the complexity of the hydraulic analysis in the face of different scenarios and the large amount of information generated. The calibrations show that the use of Artificial Neural Networks achieves good levels of calibration amid the scarcity of information in real networks and achieves better results compared to other calibration methods such as the random iterative search method. Thus the continuity of this research can strengthen better calibrations targeting real systems and the control of losses in their water distribution systems. New studies and technologies can contribute to the reduction of losses and consequently the saving of water, a resource that is scarce and crucial for society.

Keywords: Water Supply System, Water Distribution Networks, Artificial Intelligence, Network Calibration, Hydraulic Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Artigos sobre calibração de redes de distribuição de água.....	14
Figura 2 -Artigos sobre calibração de redes de distribuição de água	15
Figura 3 – Artigos sobre redes neurais aplicadas em redes de distribuição de água	16
Figura 4 - Artigos sobre redes neurais aplicadas em redes de distribuição de água.....	17
Figura 5 – Artigos sobre distribuição de água e calibração com redes neurais.....	17
Figura 6 – Artigos sobre distribuição de água e calibração com redes neurais.....	18
Figura 7 - Sistema de abastecimento de água.....	19
Figura 8 - Tipos de rede de distribuição.....	21
Figura 9 - Consumo de energia no processo de abastecimento de água	22
Figura 10 - Balanço Hídrico	24
Figura 11 - Índice de perdas por região	26
Figura 12 - Interface do <i>software</i> Epanet.....	31
Figura 13 - Etapas dos materiais e métodos	43
Figura 14 - Interface do <i>software</i> Epanet.....	44
Figura 15 - Programação em Python	46
Figura 16 – Imagem da área estudada.....	47
Figura 17 - Arranjo do sistema real de abastecimento de água.....	48
Figura 18 - Arranjo do sistema de distribuição de água	49
Figura 19 - Pressões nos nós	50
Figura 20 - Velocidade da água nos nós	50
Figura 21 - Rede de distribuição - Epanet.....	52
Figura 22 - Fluxograma do processo de calibração	54
Figura 23 – Fluxograma da calibração pelo método de busca iterativa aleatória.....	55
Figura 24 - Fluxograma da calibração com Redes Neurais	56
Figura 25 – Mapa de pressão – simulação sem demanda	58
Figura 26 - Pressão estática nos nós após simulações iniciais	59
Figura 27 – Mapa de pressão após simulação dinâmica	60
Figura 28 - Pressões medidas e calculadas.....	61
Figura 29 - Comparativo de pressões após o método de busca iterativa aleatória	62
Figura 30 – Erros com demanda.....	64
Figura 31 - Comparativo de pressões com Redes Neurais (Demanda)	65
Figura 32 - Comparativo de Redes Neurais	66

Figura 33 - Comparativo entre pressões com demanda	67
Figura 34 - Erros Demanda e Rugosidade	67
Figura 35 - Comparação das pressões com e sem calibração.....	68
Figura 36 - Amostra de pressões sem calibração.....	69
Figura 37 - Amostra de pressões com calibração	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de pressões de campo e Epanet	60
Tabela 2 – Comparativo de pressões com método de busca iterativa aleatória	61
Tabela 3 Comparativo com Redes Neurais (demanda).....	63
Tabela 4 - Redes Neurais Artificiais (Demanda e Rugosidade).....	65

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3.	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA GERAL	14
3.1	Análise sobre Rede de Distribuição de água e Calibração	14
3.2	Análise sobre Rede de Distribuição de água e Redes Neurais Artificiais	16
3.3	Análise sobre Distribuição de água, Redes Neurais Artificiais e Calibração	17
4.	REVISÃO DE LITERATURA	19
4.1	Sistemas de distribuição de água.....	19
4.2	Eficiência hídrica energética em Sistemas de abastecimento de água.	21
4.3	Perdas de água em sistemas de abastecimento de água.....	23
4.3.1	Problemática de perdas no Brasil e no mundo	25
4.3.2	Metodologias de controles de perdas em sistemas reais	27
4.3.3	Controle ativo de vazamentos	29
4.3.4	Reparo de vazamentos	30
4.4	Ferramentas para análise computacional de redes de distribuição de água	30
4.4.1	Aplicações de Epanet e Python em sistemas de distribuição de água	32
4.5	Calibração de redes de distribuição de água	33
4.6	Redes neurais artificiais aplicadas a sistemas de distribuição de água	38
4.7	Calibração de redes de distribuição de água usando Redes Neurais.....	39
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
5.1	Avaliação de potencialidades do <i>software</i> Epanet	43
5.2	Treinamento de linguagem Python e Redes Neurais Artificiais	45
5.3	Definição de sistema real para base dos estudos	46
5.4	Levantamento de dados sobre o sistema de abastecimento.....	47
5.5	Modelagem do sistema e simulações hidráulicas iniciais	50
5.5.1	Arranjo inicial da rede real para estudo.....	51
5.6	Acoplamento de Epanet e Python	52
5.7	Definição de cenários para análise	53
5.8	Calibração da Rede	54
5.8.1	Calibração pelo método de busca interativa aleatória	55
5.8.2	Calibração Redes Neurais com Demanda e Demanda e Rugosidade	56

6.	RESULTADOS	58
6.1	Resultados iniciais	58
6.2	Simulação Dinâmica	59
6.3	Calibração pelo método de busca interativa aleatória	61
6.4	Calibração Redes Neurais com Demanda	63
6.5	Calibração Redes Neurais com Demanda e Rugosidade	65
7.	Considerações e Recomendações	71
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXOS	78
	ANEXO A – INFORMAÇÕES DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	79
	ANEXO B – DADOS DE DEMANDA PARA CALIBRAÇÃO	83
	ANEXO B – DADOS DE DEMANDA APÓS A CALIBRAÇÃO (REDES NEURAIIS) .	85

1. INTRODUÇÃO

Com base no relevante papel da gestão dos recursos hídricos, nota-se a necessidade da mitigação dos problemas relacionados aos impactos ambientais gerados no decorrer do processo de um sistema de abastecimento de água (BRASIL, 2014).

Dentre as diversas vertentes que originam perdas em um sistema, a rede de distribuição tem grande parcela e é responsável por impactos significativos no meio ambiente, a partir dos diversos índices de perdas presentes no decorrer da rede de distribuição (BRASIL, 2014).

Considerando os aspectos sociais do saneamento básico e a influência dos sistemas de abastecimento de água no desenvolvimento humano, nota-se a necessidade de metodologias que proporcionem melhorias e desempenhe seu papel contínuo e com qualidade, na garantia dos direitos fundamentais de todo cidadão (BRASIL, 2015).

Portanto, para o funcionamento de todo o processo, visando à economia e eficiência no sistema de abastecimento de água, os municípios e companhias de água devem buscar formação e capacitação de equipes para a gestão e coordenação do uso da água que resultará em um gerenciamento direcionado às necessidades próprias de cada sistema com base nas metodologias disponíveis (SILVINO, 2018).

Com a escassez hídrica e gestões inadequadas de sistemas, as aplicações computacionais e a utilização de simulações possibilitam alcançar resultados satisfatórios em vista à redução de perdas. Os dimensionamentos gerados em simulações podem proporcionar melhor controle e operação do sistema de abastecimento de água, principalmente em sistemas reais que não possuem métodos eficientes de medição ao longo da rede para mensurar as perdas e a resultante a partir desta problemática (GUANGTAO et al. 2022).

Com o monitoramento do comportamento hidráulico do sistema, a gestão dos recursos hídricos passa a ser mais eficiente, obtendo melhoria na sua utilização e a diminuição das perdas e impactos ambientais. Essas melhorias se tornam mais presentes diante modelagem computacional e a aplicação de *softwares* proporcionam simulações e estudos para aplicação de soluções reais em conformidade com as necessidades dos sistemas de abastecimento de água.

Considera-se o *Software* Epanet como um dos mais utilizados no mundo para análise hidráulica de redes de abastecimento água, pois permite fazer análises hidráulicas de diferentes cenários em um tempo muito reduzido e permitir avaliar diferentes parâmetros inerentes do processo, além de ser gratuito.

O *Software* Python também tem sido usado por muitos pesquisadores para fazer a análise de dados estatísticos em diferentes problemas da Engenharia em suas mais variadas

áreas, sendo fundamental para as pesquisas relacionadas à Redes Neurais e suas análises. Nos estudos de Recursos Hídricos e especialmente em sistemas de abastecimento de água é utilizado para modelagens e simulações com foco em controle de perdas. O uso conjunto de Python e Epanet abre oportunidade de uma ferramenta muito útil na análise de problemas diversos como a necessidade de calibrações em redes de distribuição.

Desta forma o presente estudo, ao realizar a calibração de um sistema de abastecimento de água real com o uso de Redes Neurais Artificiais, busca utilizar estas ferramentas para análise e potenciais melhorias de eficiência hídrica e energética sobretudo associado ao controle de perdas de água.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento e aplicação de metodologia de calibração baseada em redes neurais artificiais para calibração para rede de distribuição de água real visando possibilidades de estudo de controle de perdas.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

1. Modelar sistema hidráulico real de abastecimento de água;
2. Implementar o acoplamento de Python e Epanet para o estudo;
3. Testar sistemática de calibração de redes de distribuição de água usando inteligência artificial para sistema real.

3. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA GERAL

Diante das pesquisas realizadas, destaca-se a Análise Bibliométrica que incrementa as informações coletadas nas pesquisas bibliográficas de modo mais geral para observação de dados que ilustram a trajetória e avanço das pesquisas no Brasil e no Mundo.

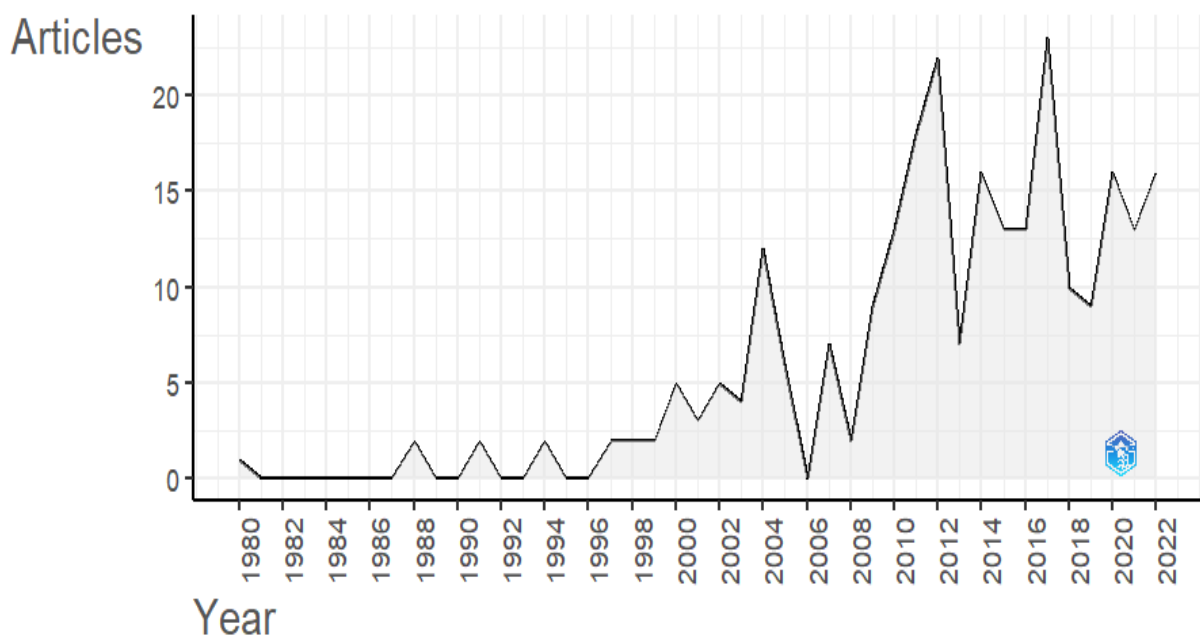
Para início das análises foram realizados *downloads* de dados da plataforma Scopus com base nas buscas por publicações feitas em todo o mundo que incluem os temas de Redes de Distribuição de Água, Calibrações e Redes Neurais Artificiais.

3.1 Análise sobre Rede de Distribuição de água e Calibração

Dentro das pesquisas do tema, encontra-se cerca de 255 publicações realizadas, com mais de 500 autores e 23 autores de autoria única nos documentos. Dentre todas as publicações, encontram-se 109 fontes, entre revistas e jornais e livros, que juntos resultam em um crescimento anual de 6,82% de publicações.

Na Figura 1 observa-se o número de publicações ao longo dos anos a partir do ano de 1982, quando ocorreu as primeiras citações e pesquisas do tema. Destaca-se na análise gráfica, os aumentos significativos de publicações em 2010 e 2017 que pode ser ocasionado por aumento da necessidade de abordagem do tema.

Figura 1 – Artigos sobre calibração de redes de distribuição de água

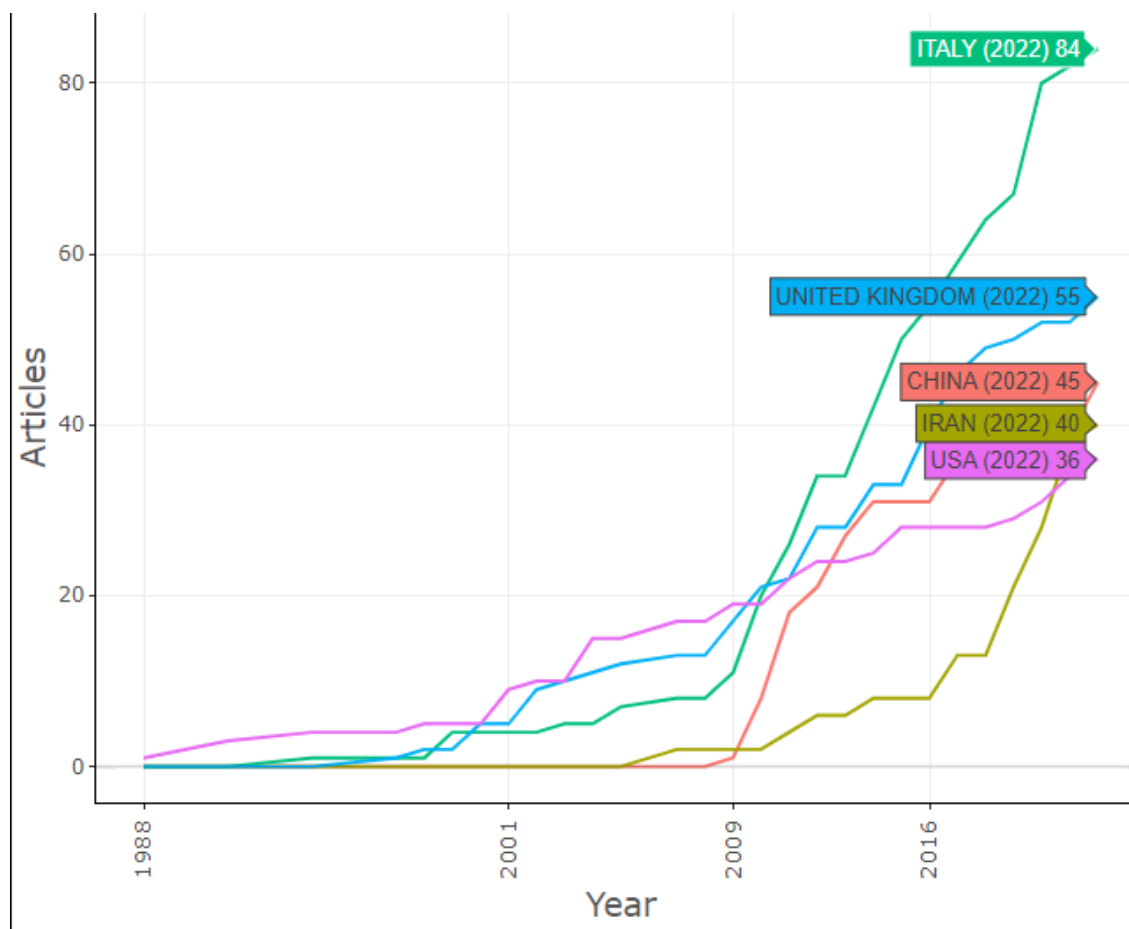


Fonte: Base Scopus adaptado por Bibliometrix (2022)

Entre os locais de publicação de maior impacto estão o Journal Of Water Resources Planning And Management, Procedia Engineering e Urban Water Journal, onde juntas somam 30 publicações ao longo de toda a história de pesquisas do tema.

Diante de toda a trajetória os países com maior relevância e quantidade de publicações conta com pesquisas da Itália, Reino Unido, China, Irã e Estados Unidos. Na Figura 2 observa-se um cenário interessante que mostra o pioneirismo dos Estados Unidos diante das pesquisas desde 1988 até o final de 2009, dando lugar ao grande volume de pesquisas da Itália e Reino Unido, que se destacam até hoje.

Figura 2 -Artigos sobre calibração de redes de distribuição de água



Fonte: Base Scopus adaptado por Bibliometrix (2022)

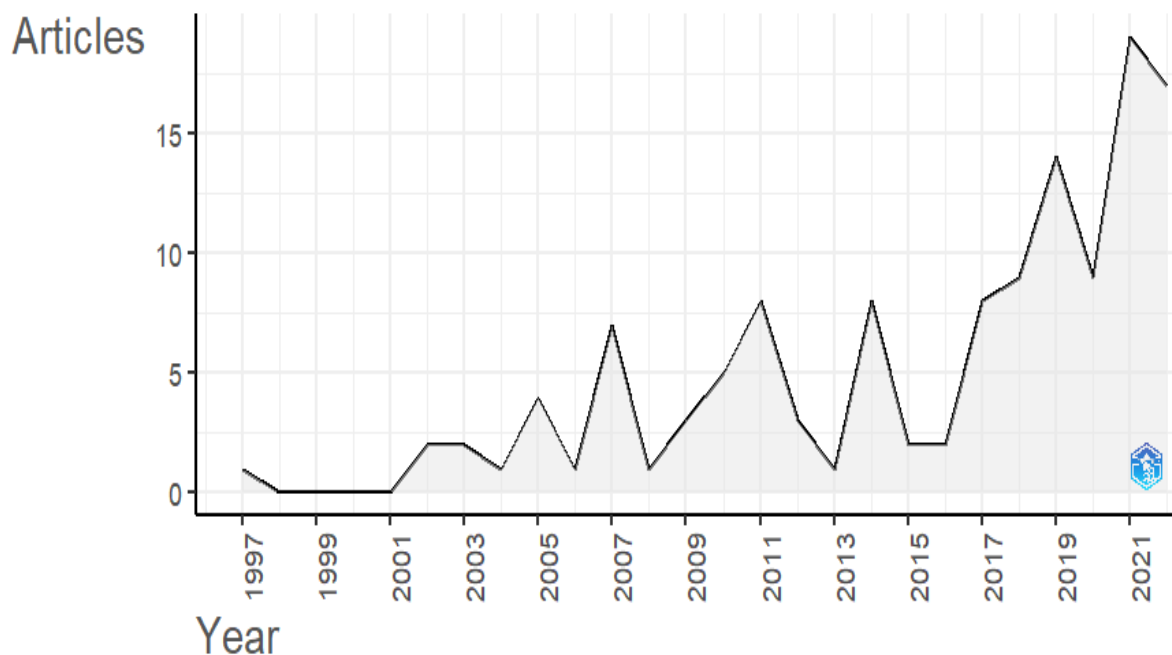
Ainda entre os Países com maior produção acadêmica ao longo dos anos, destaca-se o crescimento recente da China e do Irã, que supõe o investimento nas pesquisas diante de realidades enfrentadas diante das necessidades de desenvolvimento em torno do tema de Redes de distribuição de água e calibrações.

3.2 Análise sobre Rede de Distribuição de água e Redes Neurais Artificiais

Com o advento do tema de Redes Neurais Artificiais encontra-se cerca de 127 publicações desde 1997, com aproximadamente de 300 autores gerais e apenas 5 autores de autoria única dos documentos. Em todos os artigos listados pela base Scopus, encontram-se 79 fontes, entre revistas e jornais e livros, que resultam em crescimento anual de 12%, o dobro da do crescimento anual sobre calibrações.

Na Figura 3 observa-se o número de publicações a partir do ano de 1997, quando ocorreu as primeiras citações e pesquisas do tema e o pequeno crescimento anual, com destaque ao aumento significativo a partir de 2015 e a estabilidade de novas publicações sem grandes quedas nos anos seguintes.

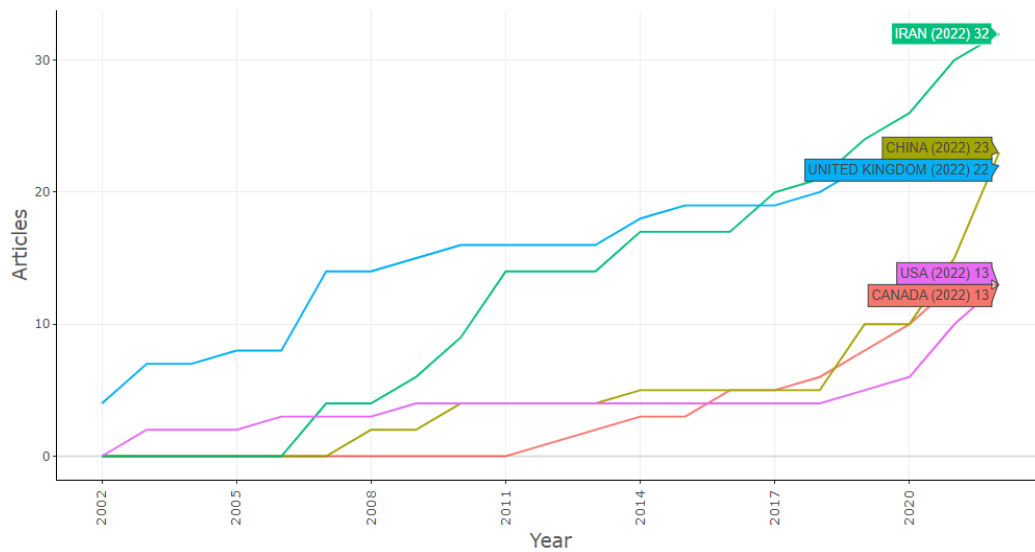
Figura 3 – Artigos sobre redes neurais aplicadas em redes de distribuição de água



Fonte: Base Scopus adaptado por Bibliometrix (2022)

Com base no avanço tecnológico dos países, destaca-se os de maior relevância e quantidade de publicações sobre Redes Neurais e Redes de Abastecimento de água. Em primeiro lugar está o Irã, que já obteve destaque e relevância sobre Calibrações em Redes de Abastecimento de água. Depois encontra-se a China e o Reino Unido, seguidos do Canadá e Estados Unidos. Na Figura 4 observa-se um cenário semelhante ao tema de Calibrações que mostra o avanço recente do Irã e China nas publicações recentes.

Figura 4 - Artigos sobre redes neurais aplicadas em redes de distribuição de água



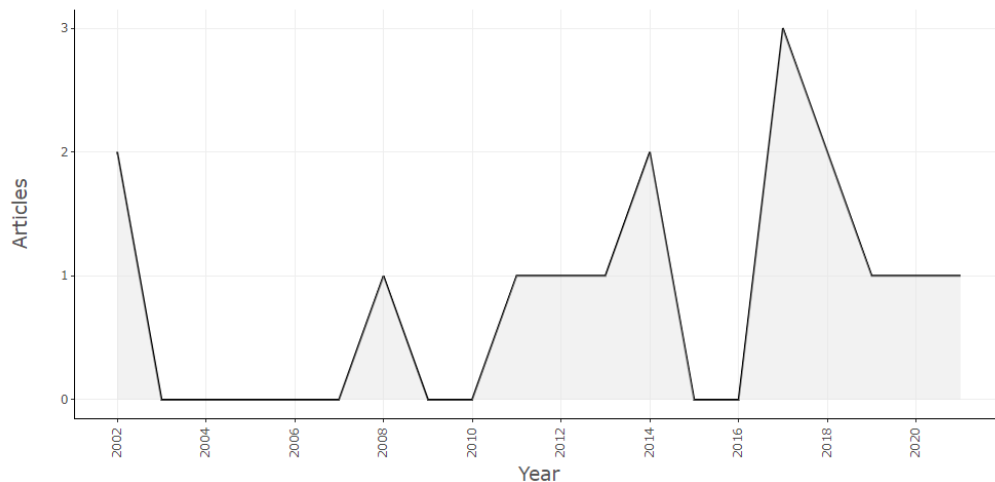
Fonte: Base Scopus adaptado por Bibliometrix (2022)

3.3 Análise sobre Distribuição de água, Redes Neurais Artificiais e Calibração

Ao analisar de maneira conjunta os assuntos mencionados nos tópicos anteriores, observa-se uma relação de baixa quantidade de publicações, justificado pela especificidade dos temas. Na base Scopus foram encontradas apenas 16 publicações, com 46 autores e nenhum com autoria única nos documentos. Dentre todas as publicações, houve uma diminuição anual de 3,58% de publicações.

Na Figura 5 observa-se o número de publicações ao longo dos anos, sendo que seu início é recente, onde evidencia a carência de informações sobre Calibrações com o uso de Redes Neurais Artificiais em Sistemas de Distribuição de água.

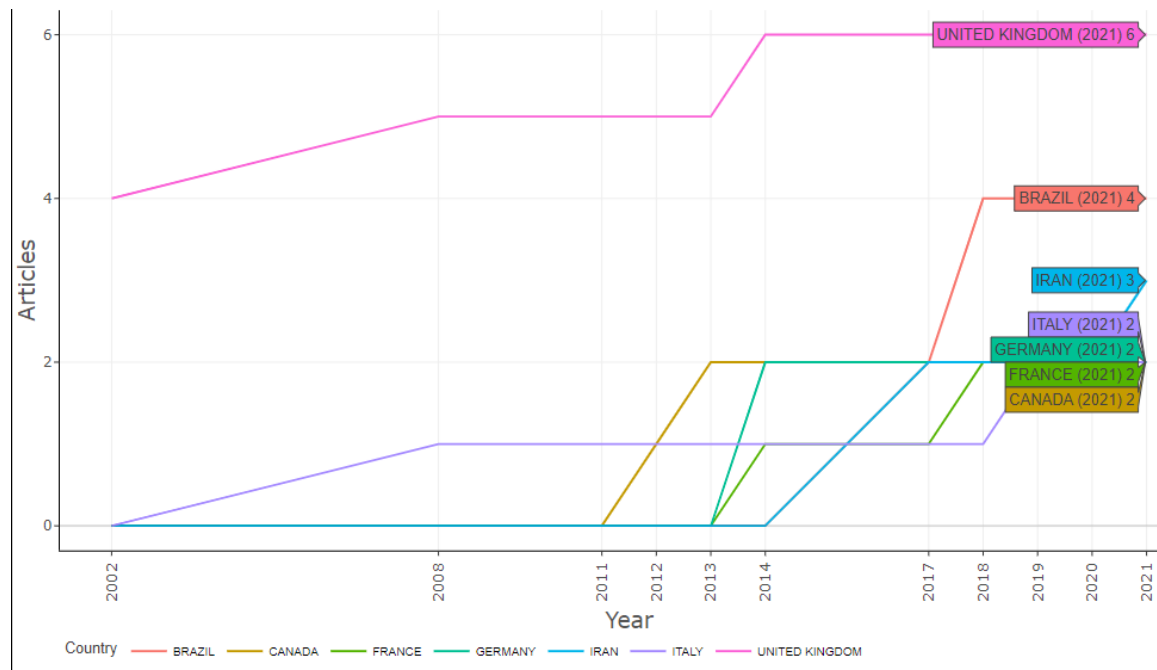
Figura 5 – Artigos sobre distribuição de água e calibração com redes neurais



Fonte: Base Scopus adaptado por Bibliometrix (2022)

Para as pesquisas com uso de Redes Neurais Artificiais e Calibração em Redes de distribuição de água, assim como nas pesquisas anteriores, o Reino Unido apresenta como pioneiro nas pesquisas, porém, como mostra a Figura 6, ocorre um movimento importante de produção científica do Brasil, junto aos demais países.

Figura 6 – Artigos sobre distribuição de água e calibração com redes neurais



Fonte: Base Scopus adaptado por Bibliometrix (2022)

A partir destas pesquisas avalia-se que existem poucos trabalhos em escala mundial de calibração e inteligência artificial aplicadas a redes de distribuição de água. Neste trabalho considera-se o diferencial de aplicação desta ferramenta aplicada a sistema de distribuição real de região montanhosa brasileira com visando o controle de perdas e eficiência hídrica e energética em geral.

4. REVISÃO DE LITERATURA

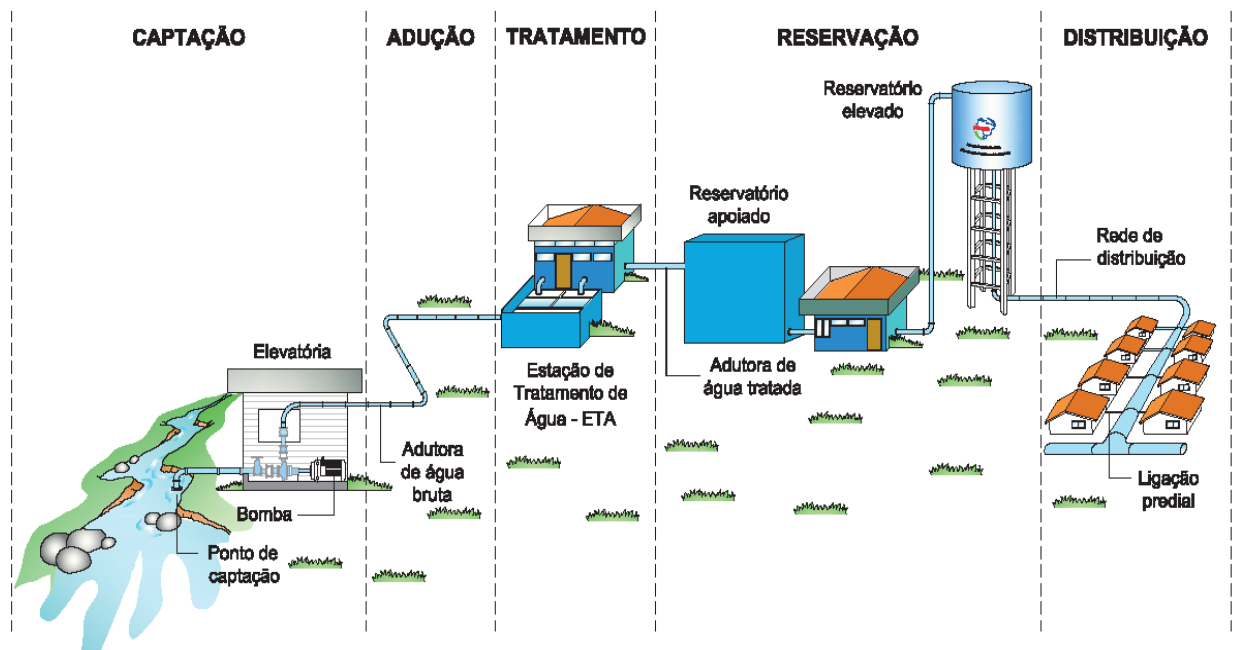
Nesta revisão de literatura, serão abordados os aspectos que permeiam os sistemas de abastecimento de água, as perdas provenientes das operações dos sistemas e as interferências que podem ser adotadas para redução de perdas vinculadas às tecnologias de calibração de redes com o uso de Epanet e o Python.

4.1 Sistemas de distribuição de água

Segundo Tsutiya (2006) um sistema de abastecimento de água compreende diversos componentes operacionais, abrangendo desde o manancial até o consumidor final, podendo variar seus processos com base nas necessidades de cada localidade, determinando as ações para sua implantação, gerenciamento e operação vinculados aos processos de manutenção e diagnóstico através dos indicadores que são determinantes para o seu pleno funcionamento.

De modo geral um sistema de abastecimento de água é constituído por etapas que garantem sua operação e determina a entrega final do produto após diversos processos intermediários a partir da captação da água em seu estado natural de acordo com sua disponibilidade. A Figura 7 delimita um exemplo geral de um sistema de abastecimento de água (BRASIL, 2015).

Figura 7 - Sistema de abastecimento de água



Fonte: BRASIL (2015)

De acordo com a Agência Nacional das Águas – ANA (2018) o Brasil possui condição hídrica satisfatória comparado ao restante do mundo, entretanto, ao longo dos anos o consumo tem se intensificado. Entre os mais diversos fins, uma parcela da utilização de seus recursos hídricos está diretamente relacionada à urbanização e o crescimento econômico, fatores estes que elevam a importância dos sistemas de abastecimento de água e o controle em torno dos processos de distribuição de água.

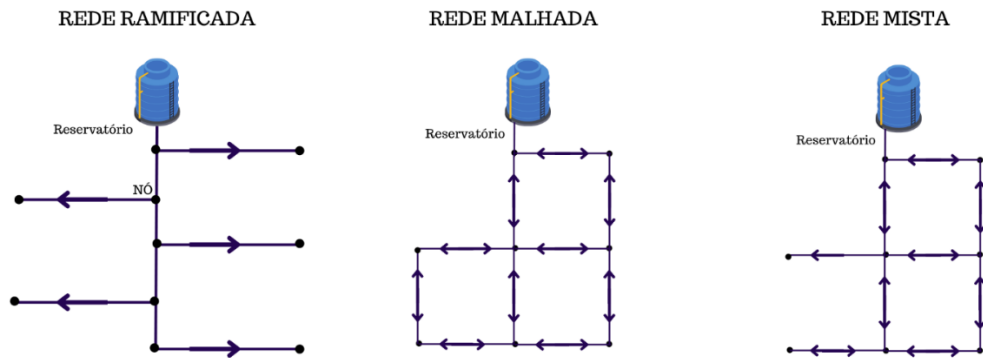
Em cada sistema de abastecimento pode-se delimitar algumas variações em torno de cada etapa do processo, tendo em vista a função do sistema e as necessidades que precisa atender. Independente das variações desses arranjos, todo sistema consta com operações indispensáveis relacionadas à captação, que podem estar instaladas em mananciais, rios, nascentes ou represas. Considerando este ponto inicial, todo sistema necessita de adutoras que podem utilizar estações elevatórias de acordo com sua necessidade para atingir a estação de tratamento (PORTO, 2006).

Na estação de tratamento de água é realizado a adequação das características aos padrões de potabilidade exigidos para armazenamento nos reservatórios e posterior distribuição para atender a demanda dos consumidores finais, em que o atendimento da população é respaldado perante às normativas vigentes (MOTTA, 2010).

Segundo BRASIL (2015), o sistema de distribuição de água exerce função primordial no abastecimento de água e depende de seu funcionamento adequado, de maneira contínua para atender aos consumidores finais. Essa operação tem êxito com seu correto dimensionamento e a utilização apropriada de registros, conexões, peças e dispositivos vinculados às tubulações para atingir as pressões determinadas em norma e as perdas de cargas compatíveis com seu dimensionamento.

Cada rede de distribuição apresenta determinadas características para atender à demanda de fornecimento, podendo variar entre redes ramificadas e redes malhadas de acordo com a necessidade de cada localidade, como mostrado na Figura 8. Nas redes ramificadas o fluxo das vazões são pré-definidos e direcionados em único sentido através dos nós entre as tubulações, enquanto na rede malhada os sentidos do fluxo das vazões são estabelecidos após análises por meio de cálculos, observando as vazões e mantendo sempre fluxo igual entre os nós e a vazão dos trechos. Pode-se ainda haver situações onde é necessária a união entre esses dimensionamentos onde se dá o nome de redes mistas diante da junção de redes ramificadas e malhadas. (MOTTA, 2010).

Figura 8 - Tipos de rede de distribuição



Fonte: Próprio autor (2022)

4.2 Eficiência hídrica energética em Sistemas de abastecimento de água.

A energia é necessária em todos os estágios do ciclo de uso da água. Entretanto, é muito difícil medir a quantidade de energia consumida com o uso da água. Sabe-se que um dos fatores determinantes para a eficiência do setor é o controle e a automação do sistema visando a observação dos índices de pressão, níveis da água e funcionamento dos dispositivos como válvulas e outros elementos (SILVINO, 2018).

Cada litro de água que se move pelo sistema, possui em seu processo um consumo significativo de energia elétrica. As perdas de água na forma de vazamento, furto, desperdício do consumidor e distribuição ineficiente, afetam diretamente a quantidade de energia elétrica necessária para fazer a água chegar ao consumidor, ou seja, o desperdício de água leva ao desperdício de energia (MOURA, 2010).

De acordo com BRASIL (2014) dentro da responsabilidade ambiental, o gerenciamento do sistema de abastecimento de água deve ser embasado em métodos de redução de perdas, vinculados ao conhecimento técnico, para definição de metas, monitoramentos e desenvolvimento de equipes para alcançar resultados satisfatórios na melhoria do uso dos recursos hídricos.

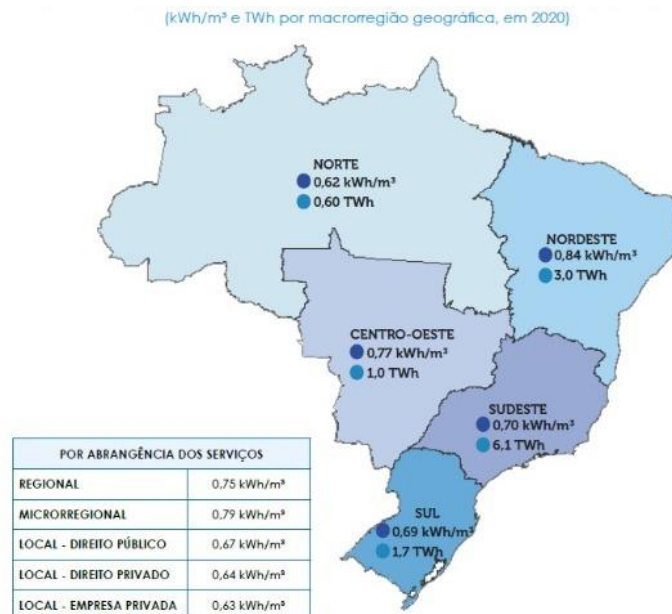
Com base na Lei nº. 12.862/2013 (BRASIL, 2013) que prevê as diretrizes referentes ao saneamento básico, juntamente com a lenta evolução dos sistemas de abastecimento de água das cidades brasileiras e a necessidade constante de melhorias nos sistemas atuais, faz-se necessária a adoção de conceitos e projetos vinculados ao poder público, que podem pôr em prática as soluções dos problemas enfrentados no município no âmbito ambiental e econômico.

Da mesma forma que as perdas estão atreladas ao abastecimento de água, o uso de energia elétrica se faz presente de maneira significativa. A partir da sua utilização torna-se possível o acionamento de equipamentos, execução de serviços de infraestrutura e demais trabalhos efetuados na distribuição, como o uso de bombas e reservatórios. Com base nesses elementos estima-se que em 2020 as despesas com energia elétrica tenham alcançado 7,4 bilhões de reais com crescimento de 4,1% em relação ao ano de 2019, evidenciando que a demanda de consumo de água consequentemente proporciona o aumento nos custos de energia na produção. (BRASIL, 2021).

Para este cenário comprova-se que regiões com maior demanda industrial e populacional implica no maior consumo e a necessidade de maior disponibilidade de energia para o abastecimento. Entretanto a quantidade de energia por metro cúbico varia de acordo com cada região, tendo em vista as características de cada localidade e a influência de fatores locais em sua produção (BRASIL, 2021).

Para demonstrar a utilização de energia elétrica no processo de abastecimento de água, a Figura 9 delimita a diferenciação das regiões do país com base no consumo de kWh/m³ e TWh. Esta análise pode ser bastante relevante a partir da necessidade de avaliar os impactos no consumo de energia no processo, garantindo ações proporcionais e assertivas na melhoria da produção energética e consequentemente melhor prestação de serviços no âmbito dos sistemas de abastecimento visando produção de água tratada e condições sustentáveis para o custo de produção e redução de perdas (SNIS, 2021).

Figura 9 - Consumo de energia no processo de abastecimento de água



Fonte: SNIS (2021)

Para Pertel (2014) as perdas no sistema de abastecimento ocorrem incessantemente em todos os processos, incluindo o sistema de distribuição. São perdas provenientes de todas as etapas, desde o tratamento, tubulações, equipamentos e extravasamentos. Ou seja, a diminuição desses elementos resultantes de perdas, pode minimizar o custo de produção, pois as perdas resultam em aumento de receita tarifária devido os consumos da rede. Assim a eficiência energética está atrelada ao custo de produção vinculado a todos os atores do sistema e não exclusivamente de um elemento apenas.

Em meio ao cenário de escassez de água no mundo, faz-se necessária a busca pela minimização das perdas e a elaboração de planos de ação para enfrentamento do problema. Mesmo que a redução de vazamentos demande grande atenção em meio aos problemas da gestão da água, os impactos devem ser considerados e discutidos mais amplamente para que as políticas de proteção ambiental sejam associadas diretamente à redução da produção de água e a diminuição dos gastos vinculados em demais processos, como a captação e tratamento (PILLOT, et al., 2014).

Para Pertel (2014) perdas na rede de distribuição impactam diretamente no consumo elétrico e direciona seus custos resultantes para o consumidor final, aumentando a necessidade de medidas de redução visando impacto financeiro positivo para todos os atores da sociedade em torno do abastecimento de água, desde o gestor do recurso até o consumidor final.

Para Silva e Monte-Mor (2022) a grande demanda de energia em sistemas de abastecimento impacta o desempenho dos sistemas em diversas frentes, contribuindo para que a sustentabilidade dos projetos seja prejudicada. Porém, a escassez hídrica, muito presente nos dias atuais, intensifica a necessidade de captações para mitigação de problemas no abastecimento. Sendo assim, em diversos casos, o alto consumo energético no processo se deve a alta demanda de água, vinculada a escassez de alternativas mais econômicas.

Portanto, os sistemas de abastecimento de água devem contribuir para a efetividade do saneamento básico na sociedade, mesmo que isso demande despesas significativas no processo de produção dos recursos. Assim se faz importante os estudos para análise econômica, considerando que a sustentabilidade do sistema está atrelada aos fatores econômicos, mas também ao bem-estar da população. (SILVA; MONTE-MOR, 2022).

4.3 Perdas de água em sistemas de abastecimento de água

Considera-se perda de água a diferença obtida entre o volume de água disponível para distribuição e o consumo autorizado pelo sistema. As perdas estão presentes ao longo de todo

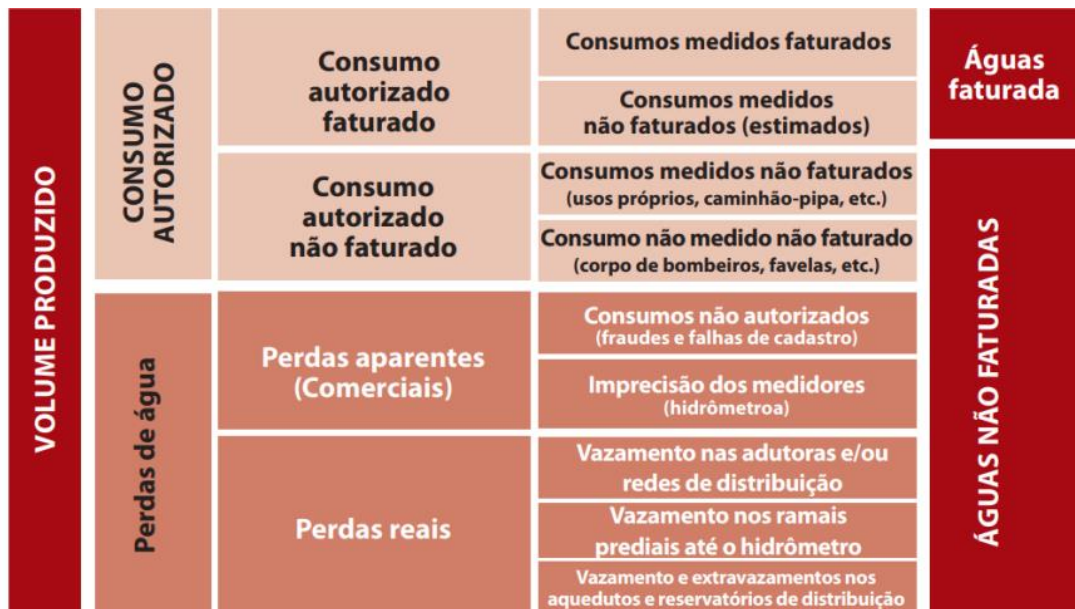
o processo de abastecimento de água, desde a captação até a distribuição final, podendo alcançar valores significativos comparado com o total consumido. Grande parte dessa problemática é resultante de vazamentos, dificultando ainda mais o controle e as operações para redução de perdas (BRASIL, 2021).

As perdas podem ser definidas de acordo com sua ocorrência e a situação em que se encontram. Segundo Brasil (2014), como demonstrado no relatório de Redução de Perdas em sistemas de abastecimento de água, pode-se determinar as perdas como reais e aparentes sintetizando seus tipos de interferência e no sistema e a maneira em que se ocorrem.

As perdas aparentes também podem ser definidas como perdas comerciais e são caracterizadas pelos consumos não autorizados, como fraudes e falhas em cadastros dos sistemas ou ainda as imprecisões em medidores dos hidrômetros. Já as perdas reais são determinadas pelos vazamentos em adutoras e redes de distribuição, vazamentos nos ramais prediais, vazamentos em reservatórios e outros componentes do sistema da rede de distribuição de água (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

Na Figura 10 pode-se observar as definições das perdas e os consumos de água, em sequência a delimitação de água faturada e não faturada com base em todo o volume produzido, considerando todo o processo e o balanço hídrico definido por Brasil (2014).

Figura 10 - Balanço Hídrico



Fonte: Adaptado por BRASIL (2014)

Para Tardelli Filho (2006) o método do Balanço Hídrico, traz vantagens significativas por seu custo reduzido, facilitando a aplicação em áreas de tamanhos diversos, com dados de

macromedição e micromedição disponíveis e embasado nas hipóteses de estimativas de perdas com base em estudos existentes da literatura atual. Apesar das vantagens, o método tem uma precisão reduzida devido às hipóteses utilizadas para a obtenção dos resultados. Mesmo assim é amplamente utilizado pelas companhias de saneamento e traz uma padronização na metodologia e estruturada internacionalmente para este método de estudo.

De acordo com Xuan et al. (2021) o aumento da urbanização ao longo dos anos exige planejamento em meio ao crescimento. Organização e controle em torno dos arranjos físicos, e a utilização de categorias de identificação da rede podem resultar melhores detecções de problemas de perdas.

Xuan et al. (2021) afirma que para detecções das perdas pode-se utilizar modelos para observação dos vazamentos. A utilização de métodos pode resolver o problema de detecção de área de vazamento, com ação ativa para diminuição de perdas de água e garantia de eficiência energética.

Portanto a problemática de perdas de água influencia diretamente em todo o arranjo do sistema, exigindo o seu controle. Buscando inicialmente a detecção de vazamentos visando a etapa operacional e gerenciamento dos sistemas de água, destaca-se a utilização de técnicas mais atualizadas e tecnologias recentes que evoluem para uma revisão ativa das realidades urbanas, com aprendizagem profunda dos sistemas para ajudar a alcançar a gestão sustentável da água (GUANGTAO et al. 2022).

4.3.1 Problemática de perdas no Brasil e no mundo

De acordo com Pertel (2014), o uso racional de água vem ganhando notoriedade nas discussões no meio acadêmico e nos atores principais do saneamento, como concessionárias e gestores públicos. A lei n°. 12.862/2013 (BRASIL, 2013) exemplifica a discussão desta problemática, considerando suas diretrizes para o Saneamento Básico, visando o incentivo e da economia de água e o seu uso consciente.

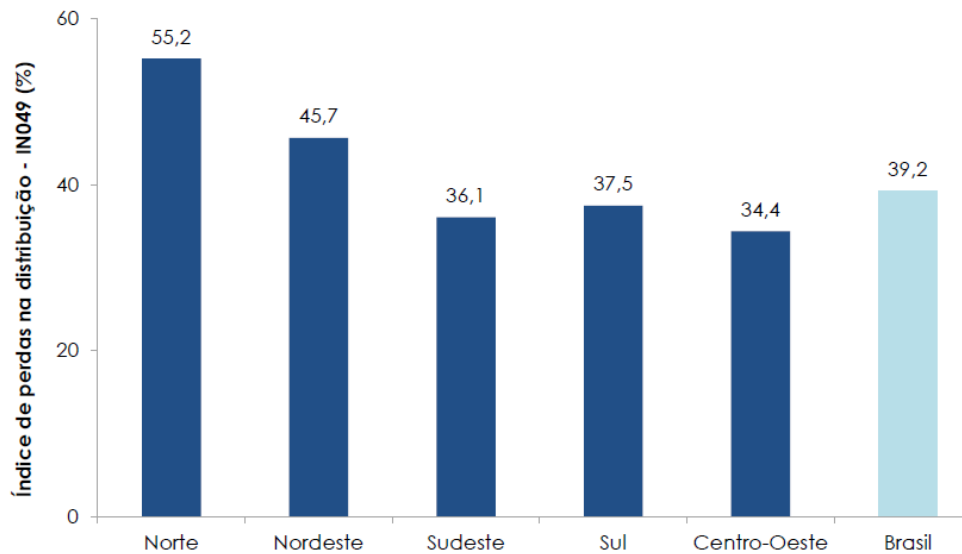
No Brasil, os dados estatísticos e indicadores que representam as perdas em sistemas de abastecimento de água são gerenciados pelo Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento - SNIS, que dá subsídios para a avaliação das perdas e determina a partir do desempenho dos prestadores de serviço, suas eficiências e falhas perante à problemática das perdas. Assim, o foco é a avaliação dos índices visando à discussão sobre as perdas por ligações no contexto geral de perdas de água no país (BRASIL, 2019).

Em 2018, aproximadamente 39,7 milhões de pessoas não tiveram acesso à água tratada, entretanto, o desperdício dos recursos hídricos é estimado em 6,5 bilhões de m³, valor 7 vezes a mais que capacidade do sistema Cantareira em São Paulo (BRASIL, 2019).

Considerando os dados disponíveis pelo SNIS, a média nacional de índice de perdas na distribuição de água, incluindo perdas reais e aparentes, aproximam de 40%, sendo que o desperdício apresenta diferenças significativas se comparado entre as regiões do país, que de modo geral apresentam variações socioeconômicas.

Na Figura 11 os índices de perdas de água por região revelam a grande variação entre regiões e pode-se considerar que as variações provenientes de questões socioeconômicas e o desenvolvimento industrial podem ser atenuadas com políticas públicas em torno do saneamento básico, visando à diminuição das perdas após a otimização das redes de abastecimento de água (BRASIL, 2019).

Figura 11 - Índice de perdas por região



Fonte: Brasil (2019)

De acordo com a COPASA (2003) a questão do desperdício deve ser amplamente discutida em busca de melhorias, considerando que grande parte das redes de abastecimento apresentam problemas e vazamentos que comprometem a qualidade do sistema. Com base no Programa de redução de perdas de água no sistema, em situações onde não existem dados estatísticos relativos a perdas reais e o índice percentual de perdas pode aproximadamente a 37,2% de todo o consumo, comprovando assim a necessidade de se atentar para os problemas da rede que comprometem o abastecimento, visando melhorias e investimentos nos sistemas.

Paralelo à questão das perdas, os estudos científicos ao longo dos anos evidenciam a questão das mudanças climáticas e a variabilidade dessas mudanças nas regiões do país, proporcionando variações significativas na precipitação que unida à diversos problemas socioambientais e políticos intensificam as dificuldades para a gestão da água (FERREIRA FILHO, 2020).

A incidência de chuvas no país depende diretamente do clima e dos ciclos anuais de precipitações, portanto, as mudanças climáticas podem intensificar problemas em torno da disponibilidade hídrica. Grande parte das interferências climáticas são de origem antropogênica e podem ser combatidas com políticas que contribuam para diminuição de impactos ambientais gerados ao longo dos anos (MARENGO, 2008).

Apesar do combate ao grande índice de perdas provenientes dos sistemas e da má gestão dos recursos, o conhecimento climático-hidrológico deve ser aliado para o conhecimento dos cenários futuros para estimativas de demandas e definição de políticas ambientais para o gerenciamento hídrico futuro. A maior incidência de chuvas ou séries históricas de grandes estiagens impactam diretamente na vazão de rios, na geração de energia, no custo de sua produção, no tratamento e na própria disponibilidade do recurso e prováveis racionamentos e perdas do sistema (BRASIL, 2020).

Portanto, o combate e controle do índice de perdas inicia-se no bom gerenciamento do sistema, buscando a redução dos altos índices recorrentes por todo o país, visando melhorias imediatas no desperdício proveniente das perdas. Não obstante a preocupação para com as mudanças climáticas também são válidas e necessitam de medidas atuais para atenuação das variabilidades hidrológicas de médio e longo prazo (FERREIRA FILHO, 2020).

4.3.2 Metodologias de controles de perdas em sistemas reais

Segundo Pertel (2014) o controle de perdas em sistemas reais se dá por diversos fatores atuantes na infraestrutura da rede de distribuição. Entre essas ações estão a escolha adequada dos materiais para composição dos tubos da rede, levando em consideração a qualidade da água e o solo da área de implantação.

A observância das especificações na execução dos serviços define os limites de projeto para cada instalação, torques e ajustes de parafusos, flanges e roscas. Vinculado ao cuidado da execução está a o manuseio e cuidado no transporte, a qualidade de futuros reparos em juntas e tubulações (LAMBERT et al., 1998).

De acordo com suas características, o sistema requer ações para controle de pressão, que garantirá a resistência para suportar esforços repetitivos de pressão que podem intensificar vazamentos e rompimentos (PERTEL, 2014).

Segundo Santos e Montenegro (2014) para obter o controle de perdas em sistemas reais, podem ser utilizar diversas ações que poderão nortear a diminuição de perdas visando à minimização do volume distribuído desperdiçado através de vazamentos, por exemplo, o controle ativo de vazamentos a gestão da infraestrutura, a rapidez e qualidade nos reparos e controle de pressão. Outras ações poderão complementar estes métodos, apesar de serem os principais nos estudos de casos.

Para tornar possível o controle ativo de vazamentos, deve-se realizar varreduras constantes, com o auxílio de equipamentos de detecção acústica. Assim, vazamentos não visíveis e ocultos poderão ser detectados notificados e corrigidos antes mesmo da existência de notificações feitas por clientes (TARDELLI FILHO, 2006).

Outro fator importante para a minimização das perdas é a rapidez e a qualidade dos reparos, garantindo que o tempo entre a detecção do vazamento e execução do reparo seja o mínimo possível. Para isso é importante que a concessionária seja eficiente na gestão do monitoramento, além de garantir uma equipe treinada e capacitada para correção dos problemas encontrados (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

Para o controle das pressões podem ser utilizados diversos sistemas como a telemetria que armazena os dados coletados na rede de abastecimento e apresenta os parâmetros das operações garantindo o controle por meio de equipamentos eletrônicos que acionam válvulas controlam vazões e regulam as pressões (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

Para que a gestão de um sistema de abastecimento de água alcance resultados satisfatórios é importante que a gestão da infraestrutura da rede seja sempre monitorada e padronizada, buscando a diminuição das manutenções para correções de problemas. Essas ações também contribuem para redução de perdas aparentes pois o monitoramento da rede otimiza o combate de fraudes e medições incorretas (TSUTIYA, 2006).

De acordo com Palo (2010), a partir de 1990 surgiram diversos estudos que dividiram os fatores em torno da perda de água, a fim de elencar seus componentes e desenvolver soluções que atuassem ativamente em cada necessidade. Assim surgiram os primeiros modelos matemáticos a partir de equações desenvolvidas com base nas avaliações estatísticas de dados reais, como a quantidade e os tipos de vazamentos, o tempo para suas detecções, os materiais utilizados nas tubulações e outros fatores inerentes do sistema.

Ainda a partir de 1990, no Reino Unido foi empregado um método para gestão de perdas baseado na análise de campo, diferenciando dos modelos gerais, pois utiliza uma combinação dos dados de medições, estimativas e testes práticos, com objetivo de caracterizar individualmente cada componente da perda real e comparar com o balanço hídrico ou pelo método de vazão mínima noturna. Este método ficou conhecido como *burst and background estimates* (BABE), e atua em modelagens de perdas reais vinculadas a vazamentos e extravasamentos (PALO, 2010).

Outra alternativa metodológica é o método Vazão Mínima Noturna (VMN), que atua na medição das vazões e pressões dentro de uma área de estudo e delimita o volume disponibilizado e consumido dentro do espaço de tempo. De modo geral, o consumo é atuante entre 11 e 14 horas por dia e o período de menor consumo recebe o nome de Vazão Mínima Noturna, norteando o método a partir da consideração do baixo consumo dentro do espaço de tempo. Assim considerando o período de baixo consumo, uma parcela dessa vazão refere-se a vazamentos originados pela pressão da rede (PALO, 2010).

4.3.3 Controle ativo de vazamentos

O controle ativo de vazamentos contribui para o monitoramento periódico a partir da utilização de equipamentos de detecção acústica tendo em vista vazamentos ocultos no sistema. Diferente do controle passivo que visa à correção após a notificação do problema, o controle ativo antecipa esses problemas para solucionar e mitigar as falhas imperceptíveis que causariam grandes prejuízos e que muitas vezes passam despercebidos por longos anos (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

Para realização de controles ativos são necessárias campanhas de medição de vazão e pressão com auxílio dos cadastros da rede para melhoria das pesquisas para identificação dos percursos a serem realizados (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

Após a identificação dos percursos são realizadas escutas por meio da haste mediante aproximação dos pontos, cavaletes, registros e hidrantes. A utilização da haste tem por objetivo captar ruídos e vibrações que podem acusar problemas e pontos suspeitos que representam vazamentos e falhas (PERTEL, 2014).

Após as detecções são emitidos relatórios paralelos às ações das equipes treinadas que devem estar disponíveis a fim de providenciar reparos e manutenções corretivas para corrigir as falhas encontradas. Assim, o controle ativo intensifica suas metas e conclui suas atividades com ações corretivas e geração de dados de em torno dos vazamentos detectados. Esses

relatórios contribuem com futuras identificações com base nas pressões de trechos percorridos (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

4.3.4 Reparo de vazamentos

Para Santos e Montenegro (2014), o reparo em vazamento é um processo extremamente importante e que demanda eficiência para otimização do tempo entre sua detecção e execução do reparo. Seu início se dá no momento em que é recebido algum relatório de ocorrência de vazamento, determinando assim a programação dos reparos a serem feitos imediatamente.

A agilidade no processo é determinante para mitigar a falha, evitar maiores desperdícios e prevenir problemas decorrentes da perda de água contínua em pavimentos, fundações e estruturas. Em casos de ocorrências maiores, deve-se atentar para os riscos de segurança e solicitar maiores supervisões visando a segurança da operação (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

Em alguns casos a interrupção do fornecimento de água pode ocasionar contaminação da água após os reparos e é imprescindível que os clientes sejam comunicados para amenizar os problemas. Além dos cuidados com a qualidade da água, deve-se tomar medidas de segurança, como sinalizações e escoramentos para as atividades a serem decorridas no local (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

Em casos mais extremos, os reparos devem ser desconsiderados, adotando a substituição total do ramal, sempre utilizando métodos adequados, materiais de qualidade comprovada e mão de obra capacitada com treinamento efetivo para as correções, visando a garantia do trabalho, evitando reincidências e vazamentos futuros decorrentes de falhas na correção (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

4.4 Ferramentas para análise computacional de redes de distribuição de água

A capacidade de utilização de técnicas para modelagem e simulação com objetivo de reduzir a perda de água tratada é uma realidade necessária e importante para o desenvolvimento tecnológico e para a melhoria da gestão dos recursos (ZANCA et al., 2019).

Segundo Arandia e Eck (2018) a partir do surgimento do *software* Epanet ampliou-se a capacidade de analisar as redes de distribuição de água e obter resultados do desempenho do sistema com base nas simulações realizadas.

O Epanet pode ser utilizado de maneira abrangente em paralelo a outras linguagens de programação, assim como outras ferramentas complementares para melhoria da modelagem

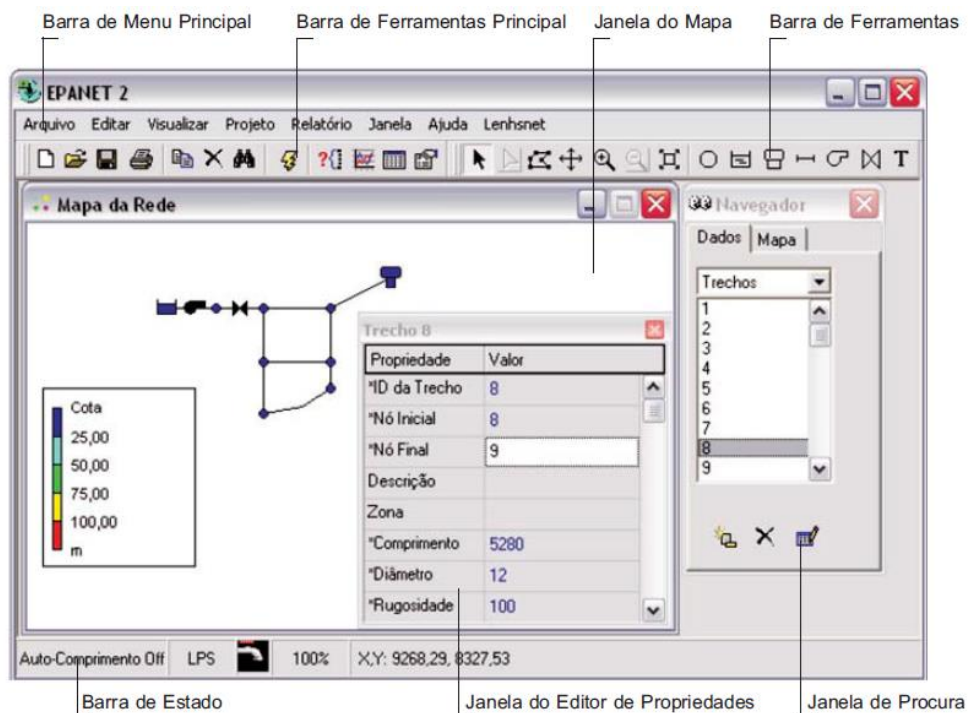
executada. Sua origem remete-se ao ano de 1993 pelo desenvolvimento de Lew Rossman e lançamento por meio da Agência Ambiental dos EUA. Amplamente utilizado, o Epanet tornou-se referência na gestão de sistemas de abastecimento de água e possui grande confiabilidade nos dados gerados (ARANDIA; ECK, 2018).

Para realizar as simulações, o usuário deve inserir alguns dados iniciais exigidos pelo *software*, como cotas entre os nós que compõem o sistema, dados do reservatório, diâmetros nos trechos e dados de consumo. A partir dessas informações o programa está habilitado para processar os dados e realizar as simulações que ocasionará em resultados específicos de determinados componentes do sistema (ROSSMAN, 2009).

Os dados gerados pelo Epanet possibilitam análises de vazão, pressão nos trechos, perda de carga, energia consumida e custos de operação para determinadas situações e cenários propostos pela modelagem, permitindo assim a realização de estudos que não seriam possíveis devido à complexidade das redes de abastecimento (DIUANA; OGAWA, 2015).

Na Figura 12 a interface do programa Epanet 2.0 ilustra com clareza suas funções e ferramentas disponíveis. Os menus dão acesso em ferramentas complementares para inserção de dados e obtenção de resultados de pressão atuante em nós e níveis em reservatórios e parâmetros químicos e físicos. Assim podem ser obtidos mapas e tabelas com gráficos e séries práticas para utilização dos resultados (SILVA; VALADAO; BARROS, 2007).

Figura 12 - Interface do *software* Epanet



Fonte: Rossman (2009)

Considera-se como vantagem da utilização do Epanet está na união da disponibilidade do código aberto, que permite interações com demais pacotes de acordo com outras simulações e pesquisas, e a garantia da gratuidade da ferramenta. Desde seu desenvolvimento, esses diferenciais são importantes para a difusão do *software* e aceitação na comunidade científica e pelos gestores dos sistemas de abastecimento (SILVA, 2014).

Nos temas atuais o cuidado com os recursos hídricos é essencial para a manutenção e funcionamento dos dispositivos que compõe os sistemas de abastecimento de água, principalmente pelo alto índice de perdas, que por diversos motivos, tornam o processo mais oneroso e ineficaz. Evidenciando que as tecnologias para calibrações e otimizações visam procedimentos e estratégias operacionais de controle de pressões, motivo principal dos desajustes causadores de perdas (GONÇALVES, et al. 2021).

Segundo Meirelles et al. (2017) a precisão dos modelos de simulação hidráulica em sistemas de distribuição de água garante o êxito desses processos e a sua grande funcionalidade. Para o sucesso em todas as etapas, o processo de calibração demanda grande atenção devido a sua relevância no processo.

4.4.1 Aplicações de Epanet e Python em sistemas de distribuição de água

A utilização de rotinas em Python complementa as modelagens desenvolvidas pelo Epanet e desempenha simulações importantes com as ferramentas de programação. Após a geração dos resultados outro *software* pode compreender os dados e aproximar as informações, usando dos seus recursos para mensurar erros e diminuir falhas (BARBEDO, 2022).

De modo mais específico, o modelo matemático representa de maneira simplificada a realidade de um sistema, com base na estrutura dos conceitos experimentais aplicados à teoria. Assim a modelagem computacional aplica os modelos já desenvolvidos com objetivo de tornar possível questões de execuções inviáveis e simular, prever e gerar dados e projeções ao longo do tempo para modelos experimentais e soluções analíticas (ABE, 2014).

Com a caracterização da rede no Epanet, a modelagem gerada é confiável e sua utilização com o auxílio de suas ferramentas propicia a obtenção de seus parâmetros. A capacidade de modelagem hídrica permeia os cálculos de perdas de cargas, energia, vazão, níveis e volumes, diversificando as possibilidades de embasamento das condições da operação do sistema e proporcionando métodos de controles em condições múltiplas (ROSSMAN, 2009).

Um sistema de distribuição busca o pleno fornecimento da água, mas não obstante, a qualidade dos recursos hídricos determina seu funcionamento e eficiência. Portanto a modelagem atinge diretamente os parâmetros de potabilidade de acordo com o transporte, mistura e transformações reativas ao longo do tempo, como por exemplo os índices de decaimento e crescimento de cloro residual (ROSSMAN, 2009).

São inúmeras as vantagens da modelagem em sistemas de abastecimento de água e sua ação se intensifica nas possibilidades de alterações durante a utilização de múltiplas origens de água em um sistema, alterações de funcionamento em grupos elevatórios e controle de níveis de reservatórios, utilização de tratamentos adicionais no tratamento e a seleção de tubulações para limpeza e substituição na rede (GOULART, 2015).

Após o levantamento e simulação dentro da interface do Epanet, a utilização do Python dispõe de rotinas que são ferramentas complementares que definem as etapas de processamento de dados com mais diversos objetivos, entre eles a calibração de valores reais e teóricos tendo em vista melhores resultados dentro dos parâmetros simulados inicialmente. Os comandos principais proporcionam a elaboração de tabelas de dados, valores e gráficos para análises posterior à execução que serão finalizadas após as análises necessárias de acordo com o objetivo do trabalho executado.

4.5 Calibração de redes de distribuição de água

Segundo Silva (2003) a calibração pode ser compreendida pela determinação das características físicas, comparações de simulações e minimização da diferença em relação as análises reais e suas características operacionais.

A calibração pode ser feita até mesmo de forma manual, porém demanda maior tempo de estudo além de diminuir a precisão. Ao observar uma rede com objetivo de estudo, o tempo de calibração é proporcional ao seu tamanho, sendo mais viável a calibração manual diante redes simplificadas, já que em redes maiores demandam meios mais complexos (ABE, 2014).

Para Abe (2014) é importante a identificação do modelo a ser calibrado e seu uso pretendido, propondo estimativas iniciais de seus parâmetros para início dos estudos. Posteriormente os parâmetros permitem a coleta de dados para calibração em função dos resultados iniciais. Consequentemente, a avaliação dos resultados garante a calibração em nível mais detalhado, considerando as alterações sensíveis do modelo e permitindo a calibração em âmbito mais abrangente.

Segundo Rossman (2002), dentre diversas possibilidades de calibração, a calibração hidráulica direciona para os parâmetros hidráulicos do sistema, com a utilização de parâmetros de consumo, rugosidade nos trechos, a pressão nos nós e informações dos reservatórios. Possibilitando a comparação de valores obtidos através do modelo com os dados coletados em campo após os ajustes necessários, para sua coerência de informações.

Para Rossman (2002) é fundamental o conhecimento dos dados característicos do sistema, como número de nós, condutores e reservatórios assim como o consumo do sistema e as condições operacionais em que o sistema se encontra. Modelos matemáticos devem ser aliados ao processo de construção da análise e comportamento hidráulico. Assim, algoritmos numéricos contribuem conjuntamente para a execução dos modelos com os dados obtidos no sistema.

Em meio ao cenário de grande demanda e uso dos recursos hídricos, o processo de calibração é de extrema importância para a gestão, controle e otimização dos índices de perdas e melhoria das condições de utilização da rede. Analisar o comportamento da água e os cenários que ela está inserida permite que após a construção de modelos representativos efetue processos complexos de maneira eficiente cada vez mais rápido. (GAMEIRO, 2014).

Os modelos de simulação hidráulica podem contribuir para análise da água e seu comportamento dentro de um sistema de distribuição, porém, dentro das interferências do sistema, as incertezas podem intensificar a necessidade de calibrações para gerenciamento consciente, tendo em vista a confiabilidade dos estudos (ZANFEI, et al. 2020).

Segundo Barbedo (2022) o avanço das pesquisas realizadas em torno das calibrações de redes apresenta inicialmente rotinas computacionais visando a implementação de algoritmos genéricos, como demonstrado através de Silva (2003). Outros avanços ocorreram em 2009 com revisão de modelos de calibração direcionando novos estudos de Savic et al. (2009).

Ao longo dos anos, os estudos acadêmicos vêm acrescentando experiência em torno do tema, como nos estudos voltados à rotina computacional propostos por Silva (2003). O experimento consistiu na proposição de calibração de redes reais com presença de vazamentos consistentes para melhoria das informações sobre o sistema com o auxílio dos algoritmos genéricos existentes.

Posteriormente novas redes seguiram os mesmos estudos para análise e calibração com algoritmos genéricos, como no caso proposto por Santos (2010) onde usou das análises anteriores para aplicação em Itajubá, obtendo novos resultados e contribuição ao tema.

Para sua confiabilidade o modelo hidráulico demanda processos de modificação de parâmetros sensíveis que conduzem os resultados para a calibração pretendida e seus ajustes que permitem a aproximação do resultado real da rede de distribuição de água (VASSILJEV, et al. 2015)

Por meio do avanço tecnológico a disponibilidade de recursos para calibrações automáticas proporcionou o processo que antes era manual, mas com a capacidade de execução rápida e eficiente e ajustável, porém com grande necessidade de observação ativa para correções e análises necessárias, já que o processo automatizado é passível de erros devido a não existência de senso analítico do próprio processo (ABE, 2017).

Para Tabesh et al. (2011) é importante o desenvolvimento de calibrações que se adequam em diversas simulações. Não obstante, propôs análises com variações de pressão e com o uso de algoritmos genéricos que possibilitam essas otimizações em diversos cenários.

Para Meirelles et al. (2017) busca suprir a inexistência de dados completos em uma rede monitoradas usando Rede Neural Artificial para estimativa de pressão em nós de uma rede. A partir da calibração da rugosidade de uma tubulação visa a minimização de função objetiva entre o simulado e previsto. Existem diversas metodologias para obtenção dessas calibrações, entretanto, recentemente esses parâmetros estão sendo vinculados ao *software* Epanet e Python, onde os diversos cenários apresentam iterações que ao longo dos testes vão aproximando os melhores resultados teóricos em conformidade com os dados reais.

Para Santos (2016) a calibração proporciona o ajuste de parâmetros como rugosidade e demanda e gera melhorias de eficiência energética, inclusive em redes reais, como em seu modelo proposto.

Fica evidenciado que diversos fatores podem dificultar os processos citados anteriormente, basicamente pela indisponibilidade de informações e dados do sistema ou redes de distribuição que não possuem setorização ou organização dos processos vigentes. Esta organização pode aumentar o controle sobre o sistema e sua inexistência prejudica estudos reais e suas implantações (SANTOS, 2016)

Calibrações eficientes partem do conceito de identificação de áreas de pressão e os índices de perdas presentes em seus setores, fatores determinantes para tomada de decisão. Outras ações posteriores complementam as fases iniciais como a determinação de energia inserida no sistema para funcionamento do processo, incluindo bombas e outros elementos (SANTOS, 2016).

Para Goulart (2015) a calibração das redes de distribuição de água é a forma de aplicar aprimoramentos e procedimentos disponíveis diante das dificuldades encontradas em sistemas reais visando combater principalmente a precariedade de informações disponíveis por parte dos mecanismos gestores de recursos hídricos.

Para Goulart (2015) por meio do aprimoramento de modelos com o uso de algoritmos genéricos pode-se alcançar melhores resultados, devido a inserção de variáveis que determinam as demandas e atribuem valores para ajustes ao longo dos testes visando diminuição de erros.

Assim, em determinados casos o erro obtido pode chegar a 0,5 m.c.a. para 100% dos nós em redes fictícias e até 0,75 m.c.a. para 95% de toda a área estudada em setores reais. Isso mostra que a introdução de metodologias de calibração com base na demanda dirigida por pressão se mostra significativamente positiva para o uso em diversas situações (GOULART, 2015).

Para validação de resultados simulações tendem a ser comparadas a dados reais, a partir de avaliação e observação de campo, sendo assim, o método híbrido se mostrou eficiente para a melhor qualidade de calibração com dados de pressões e vazões, comparados aos dados disponíveis e aos resultados de outros métodos clássicos, destacando-se principalmente pela velocidade para obtenção de resultados (ABE, 2014).

Outra maneira de obter calibrações satisfatórias é por meio do método inverso aplicado a escoamento transiente, onde o problema matemático é resolvido com uso de abordagens indiretas visando comparar os dados de carga hidráulica disponíveis no início do processo mesmo com o desconhecimento de outras informações como vazões, diâmetros e rugosidades (ARAÚJO, 2003).

Estudos comprovam que o método inverso é viável e de possível aplicação diante das soluções alcançadas e com grande contribuição tendo em vista aos poucos dados observados e outros tantos parâmetros desconhecidos (ARAÚJO, 2003).

Em casos de escoamento transitório a calibração se torna grande aliada para detecção de vazamentos. As análises comprovam que de acordo com a quantidade de informações sobre o sistema e as propriedades físicas obtidas existem influências positivas em casos de modelos hidráulicos com comportamentos viscoelásticos (SOARES, 2007).

Em estudos reais no sul de Minas, a calibração de mostrou satisfatória, mostrando desvios entre valores simulados e medidos dentro de limites estabelecidos por metodologias anteriores e adequadas para o modelo computacional base, desenvolvido por Silva (2003),

garantindo confiabilidade entre os valores de pressão e vazões e a consistência dos resultados finais (SANTOS, 2010).

Naturalmente em sistemas reais certas inconsistências devem ser atribuídas às incertezas de cadastros da rede, baixa disponibilidade de informações da rede, inexistência de dados de profundidade de tubulações e os detalhes de cada trecho disponível para estudo. Até mesmo os aparelhos de medição e os operadores do sistema podem ser passíveis de erros que irão contribuir para diferentes resultados (SANTOS, 2010).

Santos (2010) recomenda que trabalhos com área de estudo real seja monitorada e investigada para maior número de dados consistentes, para melhor avaliar e identificar os elementos que compõe o sistema. Entretanto sabe-se da dificuldade de informações reais, onde aumenta a importância de calibrações confiáveis para mitigar a ausência de dados iniciais mais aprofundados.

Na maioria dos casos de calibrações executadas, iniciam-se os estudos a partir de ajustes de parâmetros de pressão, rugosidade e demanda, visando de modo geral, melhorias nos vazamentos existentes. Casos reais simulados apresentam melhores pressões finais após ajustes dos dados de entrada. Mostrando que o monitoramento de pressões e calibrações em campo e o acompanhamento das calibrações podem melhorar os índices de perdas redução de vazamentos (SANTOS, 2016)

Para Silva (2003) o estudo sobre calibração de redes de abastecimento de água trouxe contribuições no decorrer das pesquisas realizadas, com uma metodologia de determinação condições de operação de possíveis em elementos do sistema, como válvulas outros dispositivos, visando o controle de vazamentos, com base em informações reais obtidas junto ao gestor do sistema de abastecimento de água.

Outra contribuição importante se dá pela utilização de conceitos de entropia para melhoria da confiabilidade do fluxo executado em uma rede de distribuição para determinação da rede de amostragem em condições favoráveis, buscando o aprimoramento com algoritmos para direcionamento de fluxo dos trechos da rede simulada (SILVA, 2003).

Para Silva (2003) é importante que os dados necessários para calibração sejam medidos em campo, incluindo pressões e vazões da rede real estudada. Assim se obtêm melhores resultados comparado a grande maioria dos trabalhos acadêmicos que se baseiam em dados genéricos. Ao garantir os dados reais o trabalho segue a metodologia e consegue contribuir com bons resultados.

Em estudos mais recentes, Díaz et al. (2017) apresentam a calibração que aborda os cenários onde as variáveis hidráulicas podem ser calculadas com base na disponibilidade e estimativa dos parâmetros do modelo estudado. Para isso, os cenários podem variar com base no parâmetro usado, como por exemplo do estudo, a rugosidade, responsável pelos cálculos obtidos em momentos distintos e calibrados entre si.

Ao longo dos últimos anos a calibração de redes de abastecimento de água se faz cada vez mais atual e necessária, métodos validados são aprimorados e os *softwares* otimizados, como é o caso de pesquisas que se baseiam no uso do Epanet, amplamente usado mas que é conjugado com outros relevantes como o Matlab (BOCZAR, et al., 2017).

Com o advento de novas tecnologias, Minaee et al. (2019) elaboraram novas frentes onde a calibração sequencial desenvolvida pode ser usada para qualquer modelo, inicialmente voltada para análise de características da qualidade da água do rio e seus respectivos parâmetros analisáveis.

Procedimentos e metodologias de simulações mais atuais possibilitam calibrações em redes reais, onde anteriormente era possível apenas modelagens fictícias. Em redes com número de medições inferiores ao cenário ideal de medição, as calibrações podem, com base na demanda e consumo, otimizar as informações de rugosidade ao longo dos trechos, podendo melhorar incertezas das inúmeras variáveis que se apresentam por se tratar de sistema real (ZANFEI et al., 2020).

A complexidade das modelagens e o avanço tecnológico proporcionam o aumento de funcionalidades que as ferramentas disponíveis apresentam. A potencialidade dos *softwares* após serem aplicadas em redes teóricas, ganham estrutura e forma para aplicações reais e abre frentes de estudos atualizadas (BARBEDO, 2022).

Atualmente os estudos se aprimoraram, com pesquisas recentes sobre algoritmos de otimização, redes reais em análises de calibração, elaboração de metodologias e procedimentos de calibração, mas apesar dos avanços, demonstraram a grandiosidade de possibilidades que permeiam o tema, com muitos desafios e problemáticas (BARBEDO, 2022).

4.6 Redes neurais artificiais aplicadas a sistemas de distribuição de água

Atualmente o uso de redes neurais impactou as áreas de classificação e compreensão de dados, permitindo a realização de ações inimagináveis, tornando-se um fator decisivo na tomada de decisões. Sua funcionalidade se assemelha ao funcionamento do cérebro, onde os

componentes eletrônicos simulam a ação dos neurônios em suas unidades de processamento (SILVINO, 2018).

Durante décadas a área da visão computacional vem sendo estudada para melhorar e aprimorar os aspectos da análise de dados. A escalabilidade das redes neurais e o poder de representação são diferenciais que inovaram a tecnologia de décadas passadas tendo em vista os novos estudos e tecnologias (ABE, 2014).

O componente de uma rede neural artificial necessita de camadas de entrada onde são introduzidas as primeiras informações, partindo do princípio que nessas primeiras camadas os dados recebidos de maneira similar à funcionalidade dos neurônios, onde a maior quantidade de camadas é proporcional à complexidade do problema (ABE, 2014).

Um dos métodos atuais de calibração utiliza redes neurais artificiais e visa a produção de respostas para modelos hidráulicos baseados em Epanet para poder transformar em padrões, visando as redes neurais artificiais. Outras soluções iniciam-se a partir de métodos mistos, onde dados gerados em redes neurais artificiais são fontes de entrada para buscar novos resultados, obtendo um modelo híbrido com valores otimizados (FREITAS et al., 2017).

Os dados de camada de entrada não podem sofrer interferências, a única determinante que sofre alterações durante o aprendizado da rede são os pesos, assim a rede pode aprimorar as informações sem sofrer grandes deformidades e gerar dados aproximados dentro das funções. Uma rede neural artificial recebe dados de entrada que compara dados genéricos e dados reais, surgindo a possibilidade de aproximação de dados reais e ajuste dos pesos para melhoria dos dados finais (SILVINO, 2018).

4.7 Calibração de redes de distribuição de água usando Redes Neurais

Segundo Lima et al. (2018) modelos computacionais estão sendo desenvolvidos com objetivo de observação do funcionamento de sistemas de abastecimento de água, onde a calibração pode contribuir com seus parâmetros futuros.

Os parâmetros podem apresentar valores incorretos e imprecisões que prejudicam o modelo estabelecido, comprometendo sua funcionalidade e efetividade. Para isso, o uso de redes neurais para estimativa de pressão contribui para otimizações em sistemas de distribuição de água, através da utilização de dados de campo coletados por sensores alocados ao longo do sistema (LIMA et al. 2018).

Para Lima et al. (2018) utilizando abordagens que monitoram, calibram e otimizam o sistema constantemente, permite que esse processo seja eficiente e reduza problemas

enfrentados quando não ocorrem calibrações. Conclusões finais apontam a eficiência das Redes Neurais como ponto inicial de estudo, mostrando a alta funcionalidade e aplicação da ferramenta geradora de dados identificadores de eventos incomuns em sistemas (LIMA et al. 2018).

Nas proposições atuais de calibrações a utilização de vazões de entrada e os dados de pressão monitorados em alguns nós, iniciam o processo com dados de entrada para as Redes Neurais Artificiais, gerando nos dados finais valores de pressão para nós que não foram monitorados (LIMA et al. 2018).

Para Freitas et al. (2018) dentro dos processos de incertezas diante as modelagens acerca da demanda e rugosidade da rede, deve-se atentar para a correção por meio de calibração que se faz um processo eficiente na atualidade.

Pontos de pressão real são referências iniciais para ajustes de parâmetros futuros de regiões simuladas sem o controle real dessas informações em campo. Assim pode-se atingir o melhor valor real dos nós de monitoramento após a coleta de dados de comparação. Em alguns casos o resultado obtido pode conter problemas devido a representatividade incompleta devido condições diferentes ou inconsistentes para a adequação de um sistema em sua totalidade.

Para Freitas et al. (2018) o processo de calibrações passa pelo gerenciamento das incertezas que os dados gerados podem causar. Gerenciar essa variabilidade de informações induz ao uso de métodos híbridos para redução de incertezas da rede de abastecimento em sua totalidade a partir da rugosidade e outros parâmetros.

Freitas et al. (2018) apresenta um método dividido em três frentes a partir da utilização de algoritmo para criação de grupos visando calibração em conjuntos separados. O algoritmo tem a capacidade de obter as características da tubulação e as informações hidráulicas dos mesmos elementos. Assim, essas informações proporcionam melhores dados de entrada para a segunda etapa vinculada a uma Rede Neural Artificial para estimativas de pressão.

Dados de entrada coletados por sensores proporciona o processo de estimativa de pressão nos nós restantes, gerando base de dados para o estágio final de otimização da rugosidade a partir dos processos anteriores, minimizando a diferença entre a pressão simulada e estimada. As rugosidades dos tubos são otimizadas e redefinidos em cada interação, pois cada interação define novos números de Reynolds para cada ponto analisado, proporcionando melhores resultados finais (FREITAS et al., 2018).

Para Ferdowski et al. (2021) a calibração através das tecnologias disponíveis de inteligência artificial pode contribuir com problemas de sistemas de recursos, desde questões ambientais até questões complexas de distribuição e perdas.

Para execução de calibrações o uso de algoritmos de otimização pode contribuir na obtenção dos objetivos para fornecimento de soluções simultâneas. Esses algoritmos visam a melhoria da precisão em simulações, como o que vem sendo usado em redes neurais artificiais, visando desempenhos satisfatórios na resolução de problemas (FERDOWSI, et al. 2021)

Para Pacchin et al. (2019) a comparação de modelos de previsão que atendem diversas frentes em áreas de previsão de cenários visando a calibração. Em seus estudos, compara-se um modelo baseado em rede neural, onde a comparação é feita aplicando em casos reais.

A comparação apresenta resultados baseados em diferentes técnicas e fornecem precisões de previsão comparáveis além de modelos de previsão de demanda de água com parâmetros e configurações facilmente adaptáveis e ao mesmo tempo robustas e consistentes (PACCHIN et al., 2019).

Freitas et al. (2017) ressalta a importância da operação eficiente dos sistemas de abastecimento de água e destaca a calibração como fator importante para operações seguras que dão condições ideais para bombas e válvulas entre outros dispositivos.

Para Freitas, R et. al. (2017). Deve-se garantir que as incertezas de um modelo simulado seja as mínimas possíveis e mais aproximadas de um cenário real. Mas vale ressaltar que os altos graus de incertezas que envolvem o processo dependem de melhoria contínua na captação de informações para conduzir os resultados ao melhor cenário.

Para Gonçalves, et al. (2021) o estudo de pressões deve ocorrer de maneira controlada, com equipamentos que garantem o correto gerenciamento do sistema, assim a ferramenta Epanet permite diferentes cenários para simulações visando a diminuição de perdas após a aquisição de dados simulados no final das calibrações.

Portanto, a inteligência artificial mostra-se complementar aos elementos fundamentais de um sistema, onde os dispositivos hidromecânicos como bombas, válvulas juntamente com ações ativas no sistema como a alteração do nível do reservatório, garantem a ação imediata de parâmetros que interferem no funcionamento da rede (GONÇALVES et al., 2021).

Algumas condições de sistemas permitem melhoria de resultados após a adoção de cenários previsíveis, atendendo objetivos propostos em estudos para aplicação em sistemas ativos. Dificuldades inerentes do processo tornam os ajustes mais desafiadores, como situações

geográficas, porém isso enaltece a importância de modelagens e calibrações que atingem bons resultados apesar das adversidades reais apresentadas (GONÇALVES et al., 2021).

Gonçalves et al. (2021) recomenda que estudos que objetivam métodos de otimização em redes reais, independentemente de seu porte e suas características, podem obter bons resultados a partir dos métodos e tecnologias existentes.

Para Gonçalves et al. (2021) sua metodologia baseia em simulações de áreas geográficas de bastante variabilidade em suas cotas, estipulando cenários de análise incomuns entre si. Em se tratando de redes reais os dispositivos reais presentes no sistema são os primeiros a demandarem atenção, pois são os pontos principais de perdas em um cenário ideal de funcionamento. Concluindo assim que apesar das simulações computacionais estabelecerem padrões extracampo, são fundamentais para comparativos do sistema em operação.

Portanto, com a necessidade de melhoria das tecnologias de calibrações de redes de distribuição de água, tendo em vista a evolução das pesquisas e os modelos simulados, o desenvolvimento de novos estudos com Redes Neurais apresenta a continuidade de metodologias validadas e com detalhes particulares que contribuem no contexto geral do tema.

Para cenários específicos deve-se utilizar metodologias validadas, porém, com ajustes especiais para cada situação. Em casos de redes reais estes ajustes são bastante peculiares e determinam a confiabilidade dos modelos.

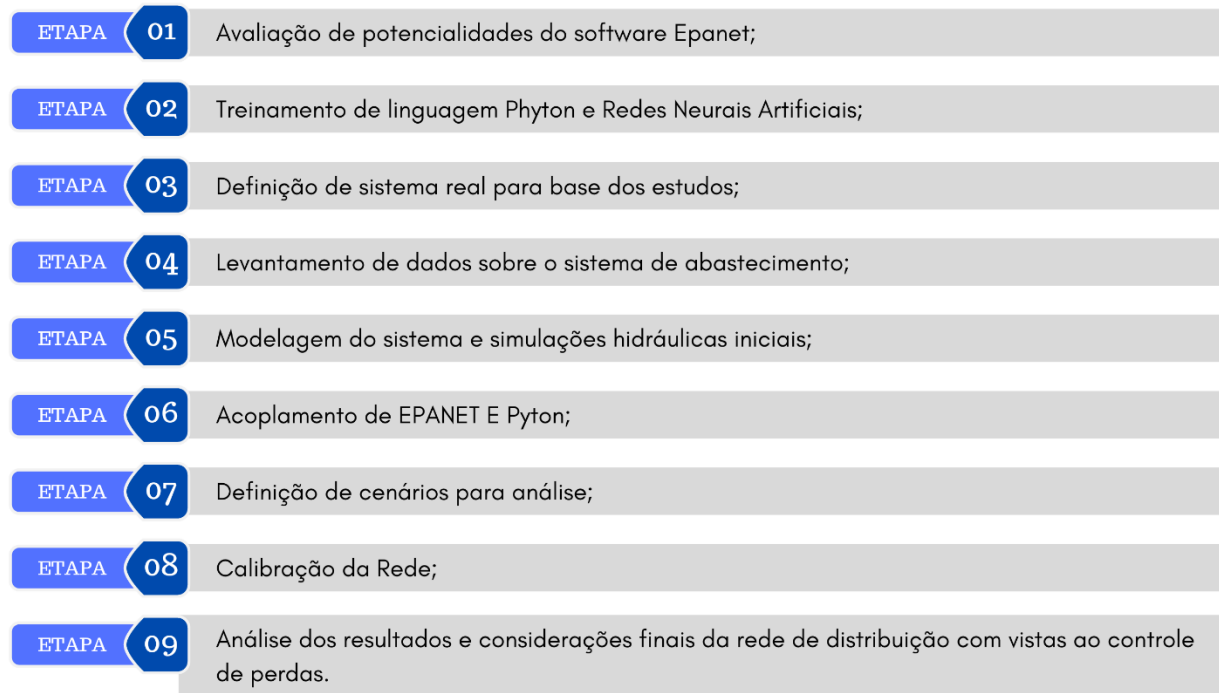
Em um cenário de poucas informações, as calibrações geradas por Redes Neurais Artificiais possibilitam a inserção de dados reais coletados, garantindo os ajustes de parâmetros estimados, aumentando a confiabilidade e gerando uma rede calibrada mais próxima dos parâmetros reais.

Assim, o uso de Redes Neurais Artificiais possibilita melhores calibrações em cenários específicos em que a rede real estudada tem baixo nível de informações consistentes para parâmetros iniciais. Comparando os trabalhos existentes, vê-se que a contribuição das Redes Neurais Artificiais nesses casos, gera ajustes mais adequados para esses modelos reais.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Dentre as atividades propostas para realização desta etapa, foram elencados seis itens principais destacados na Figura 13, demonstrando a ordem das ações e os materiais e métodos utilizados para busca de resultados para análise e preposição de melhorias.

Figura 13 - Etapas dos materiais e métodos



Fonte: Próprio Autor

5.1 Avaliação de potencialidades do *software* Epanet

Para a elaboração da presente metodologia, torna-se necessário o aprofundamento dos estudos sobre os *softwares* vinculados à simulação hidráulica e suas funcionalidades. Para tal função, o *software* Epanet corresponde de maneira eficiente para as demandas do estudo, partindo da necessidade de introduzir os dados da rede estudada e assim executar modelagens e simulações para obtenção de parâmetros hidráulicos.

De modo particular, a escolha do *software* Epanet surge da aceitação e utilização no meio acadêmico, tendo em vista os estudos anexos aos sistemas de abastecimento de água e a aplicabilidade da ferramenta pelas concessionárias e gestores dos recursos hídricos em seus sistemas reais.

Sendo assim, os elementos que compõem o *software*, atendem de maneira ampla e têm papel importante no avanço tecnológico para a evolução dos sistemas, principalmente pela

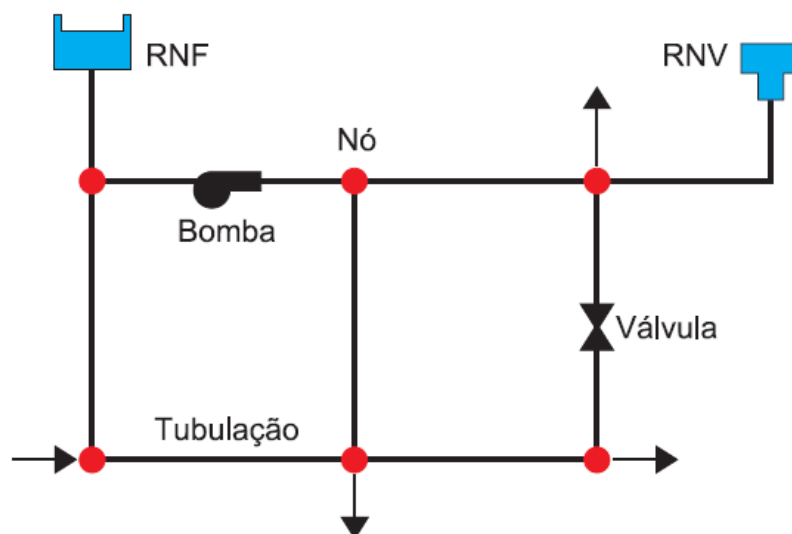
disponibilidade gratuita e interface compacta e otimizada, tornando as elaborações e simulações acessíveis e democráticas.

Em situações onde o estudo é direcionado para uma rede fictícia, a utilização do *software* pode ser direcionada para obtenção de resultados vinculados à direção do estudo proposto, quando se utiliza um sistema real, o estudo se norteia por situações diferentes das linhas de estudo das literaturas existentes, portanto, além de obter parâmetros reais, as falhas e os problemas podem ser analisados e mitigados a partir de práticas desenvolvidas após as análises das simulações.

Dentro das inúmeras funcionalidades do *software* Epanet, os parâmetros de perdas de carga, pressão nos nós, níveis de reservatórios e vazões, podem ser o ponto de partida para obtenção de resultados iniciais para conhecer mais detalhadamente o desempenho da rede de distribuição. Assim, para que as potencialidades do *software* sejam exploradas, o sistema a ser estudado necessita de informações de entrada, para ao serem introduzidas ao programa, executem suas condicionantes e apresentem seus resultados para futuras estratégias de gestão.

Segundo o Rossman (2009), para que as modelagens sejam confiáveis, a presença de alguns elementos e ferramentas são fundamentais para o bom desempenho das análises. Algumas dessas características são atribuídas a quantidade ilimitada de componentes e dimensões dos elementos da rede, proporcionando estudos variados nos mais diversos tipos de sistemas. Na Figura 14 pode-se observar a representação dos nós e os componentes do sistema que ao serem unidos entre si, desempenham suas funções dentro do sistema e contribuem na execução das simulações para aumentar a confiabilidade e nível de precisão dos dados finais.

Figura 14 - Interface do *software* Epanet



Fonte: Rossman (2009)

Para a elaboração e resultados assertivos em torno da rede estudada, não basta apenas a análise profunda dos elementos da rede, é necessário conhecer a topografia do local estudado, tendo em vista que grande parte dos componentes da rede têm como fator determinante as cotas dos nós que influenciam diretamente nos resultados de pressões, vazões e níveis.

Em situações reais tornam-se necessárias algumas adoções de parâmetros não conhecidos que poderão ser determinantes para o estudo da rede. Em sistemas genéricos esses parâmetros são gerados em função do estudo proposto, diferentemente nos sistemas reais estes critérios podem ser desafiadores em vista de sistemas complexos e com diversas informações indisponíveis e inexistentes.

Dentre todas as funções do *software*, foram utilizadas neste estudo os procedimentos de elaboração de traçados de rede, localização da posição dos nós, estimativa de consumo, diâmetros e rugosidades das tubulações, e determinação de diferentes dados dos reservatórios para posterior análise das tabelas e gráficos com as principais propriedades da rede desenhada e simulada.

5.2 Treinamento de linguagem Python e Redes Neurais Artificiais

Para análise do *software* Python e suas rotinas para utilização, é necessário que além da revisão de literatura e o estudo dos autores anteriores relacionados à esta pesquisa, é importante a elaboração de uma linha de trabalho com objetivo de elencar as etapas a seguir e direcionando a pesquisa ao objetivo traçado inicialmente.

Dentro das importantes tarefas do processamento de dados do *Software* encontra-se o desenvolvimento de rotinas computacionais para leitura e operação de dados, ligação e escrita de comandos, obtenção de informação e geração de dados para gráficos e análises do sistema.

Dentro da interface do *software* ficam demonstradas suas ferramentas e artifícios próprios para utilização após o acoplamento das informações geradas anteriormente. Destaca-se a disponibilidade de funções do Epanet para vínculos internos do programa, diferenciando apenas em contextos de funções e parâmetros de caráter de retorno.

Na Figura 15 pode-se observar o módulo base do *software* que tem um ambiente de desenvolvimento na sua interface gráfica e o console que permite a entrada de comandos. De modo geral é um *software* de fácil acesso, garantindo a democratização e acesso universal da ferramenta para uso em suas mais variadas necessidades.

Figura 15 - Programação em Python

```

interface.py X
C:\Users\Administrator.SHAREPOINTSKY\Desktop\Work > interface.py ...
1 class Chocolate:
2     def __init__(self, items):
3         self.__items = items
4     def __len__(self):
5         return len(self.__items)
6     def __contains__(self, items):
7         return items in self.__items
8 fav_chocolate = Chocolate(["kitkat", "diarymilk", "munch", "sstar"])
9 print(len(fav_chocolate))
10 print("kitkat" in fav_chocolate)
11 print("munch" not in fav_chocolate)
12 print("diarymilk" not in fav_chocolate)
13 print("sstar" in fav_chocolate)

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL 1: powershell +
PS C:\Users\Administrator.SHAREPOINTSKY\Documents> python C:\Users\Administrator.SHAREPOINTSKY\Desktop\work\interface.py
4
True
False
True
True
PS C:\Users\Administrator.SHAREPOINTSKY\Documents>

```

Fonte: Próprio autor (2022)

Para execuções básicas o nível de dificuldade é baixo e envolvem apenas operações matemáticas simples, porém, podem desempenhar novas funções a partir de funções iniciais que podem aumentar o nível de complexidade. De qualquer forma todas as funções seguem a mesma linha de trabalho com a inserção do nome da função desejada, acompanhado dos argumentos necessários que devem estar entre parênteses (ECK, 2016).

5.3 Definição de sistema real para base dos estudos

O estudo foi realizado em um Município Sul do Estado de Minas Gerais. O município possui uma área de 409,2 km², está inserido na Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, localizado a 1200 metros do nível do mar (MARCONDES, 2019).

A escolha deste sistema se dá pela necessidade de evolução nos estudos sobre o abastecimento de água no Município vinculado à contribuição dos estudos acadêmicos visando ao avanço das metodologias de simulação de redes em Epanet vinculadas ao Python.

Na Figura 16 observa-se a área urbana do município, onde está localizado o sistema de distribuição de acordo com a localização das ruas em conjunto com o relevo local. Os reservatórios principais estão locados ao lado da Estação de Tratamento de Água e com base no levantamento topográfico disponibilizado pela Prefeitura do município está a aproximadamente 1.268 m (MARCONDES, 2019).

Figura 16 – Imagem da área estudada



Fonte: Google Eath Pro 7.1.8 (2023)

5.4 Levantamento de dados sobre o sistema de abastecimento

Apesar da extensão territorial do município e a grande quantidade de bairros localizados na zona rural, o sistema de abastecimento a ser estudado está localizado na área urbana. Segundo as séries históricas do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento, no ano de 2020 foram atendidas 1639 ligações que abrangem cerca de 3 mil habitantes (BRASIL, 2021).

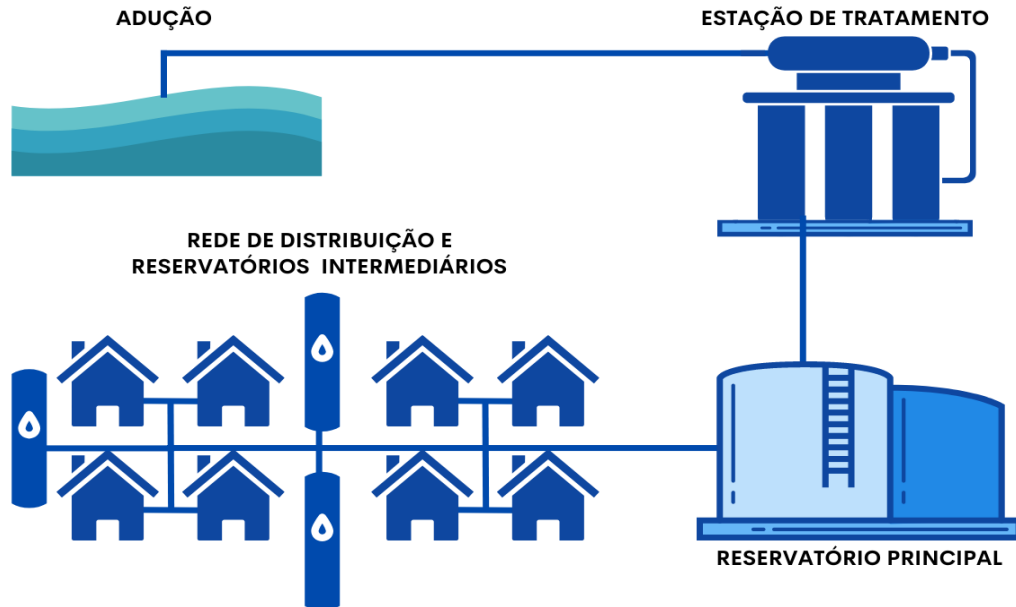
No início do processo do abastecimento de água, o sistema conta com dois pontos de captação ambos inseridos na Bacia do Rio Sapucaí e localizado nas coordenadas Latitude: 22°29'25.02" Sul e Longitude 45°15'51.60" Oeste, aproximadamente à 3,3 km da estação de tratamento e Latitude: 22°31'11.62" Sul e Longitude: 45°16'51.03" Oeste (MARCONDES, 2019).

Para levantamento do volume de água consumida e população atendida, para cálculos posteriores, foram utilizadas informações sobre Saneamento (SNIS) dos últimos dados disponibilizados, sendo o volume de água tratada no ano de 2020 em torno de 560.000 m³.

Na Figura 17 está exemplificado de forma macro, o arranjo do Sistema de Abastecimento de Água do município selecionado. O processo inicia-se com a captação

vinculada à adução até a Estação de Tratamento onde posteriormente a água é submetida ao processo convencional para adequação de seus parâmetros físico-químicos.

Figura 17 - Arranjo do sistema real de abastecimento de água



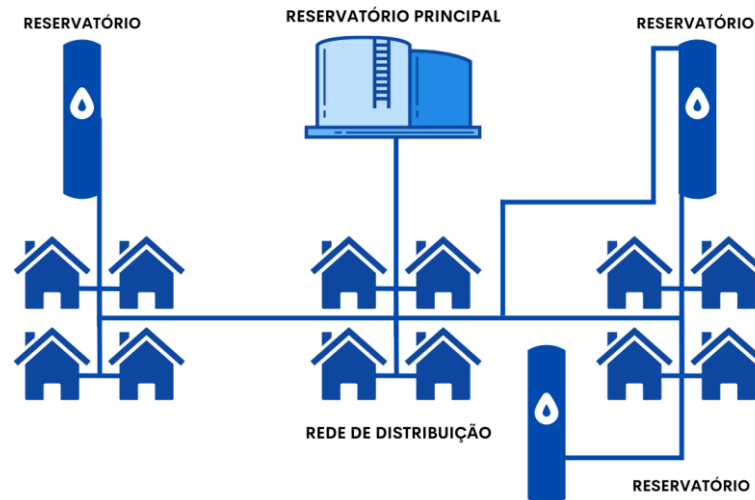
Fonte: Próprio autor (2022)

Durante o processo de tratamento, água captada é submetida ao tratamento convencional, contendo todos os processos e requisitos exigidos pelo Ministério da Saúde, cumprindo os parâmetros físico-químicos de cor aparente, pH e turbidez e os parâmetros biológicos de coliformes totais e *Escherichia coli* (MARCONDES, 2019).

Depois de tratada, a água é encaminhada para os reservatórios responsáveis pelo abastecimento do sistema. Os reservatórios estão situados ao lado da estação de tratamento, sendo um deles com capacidade de 120 m³ que recebe a água após o tratamento e encaminha para os outros dois reservatórios de capacidade de 300 m³, onde a partir destes a água é encaminhada para a rede de distribuição.

Na Figura 18 está representada de maneira mais detalhada o processo que compreende a distribuição do Sistema de Abastecimento de água. Além dos reservatórios principais localizados próximo da Estação de Tratamento, o Sistema conta com mais 3 reservatórios.

Figura 18 - Arranjo do sistema de distribuição de água



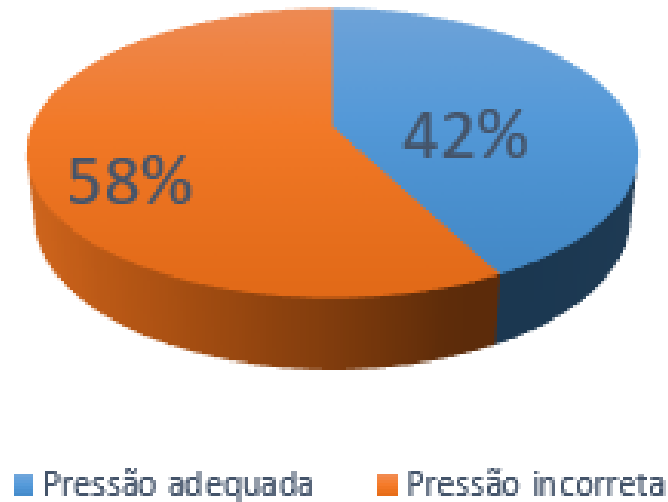
Fonte: MARCONDES (2019)

Dois desses reservatórios têm capacidade de 47 m³ sendo o terceiro de 30 m³. Considerando que o desnível entre o reservatório principal e alguns pontos do sistema propiciam pressões inadequadas que podem ser corrigidas com os reservatórios intermediários ao longo da rede de abastecimento, além disso, uma bomba eleva a água de uma região mais baixa para um dos reservatórios que complementam a rede de distribuição (MARCONDES, 2019).

Os dados complementares da rede foram determinados com base nas informações disponíveis no trabalho de conclusão de curso e informações atualizadas em portais públicos, como SNIS. Dados como diâmetro das tubulações e levantamentos topográficos determinam fatores importantes a serem inseridos nos softwares escolhidos para simulações. A vazão de entrada no sistema de abastecimento, com base na média dos últimos nove meses foi de 19 litros por segundo, sendo o único dado referente a quantidade de água tratada e distribuída, devido a inexistência de hidrômetros nas ligações prediais e nos reservatórios do sistema.

No processo de distribuição de água o sistema apresenta diversos problemas onde pode-se avaliar os principais causadores da ineficiência do abastecimento. Apesar da necessidade de melhorias ao longo de todo o sistema, a rede de distribuição apresenta problemas com pressões dinâmicas abaixo de 10 m.c.a. exigido pela norma NBR 12.218 de 2017, sendo determinante no funcionamento inadequado do sistema como demonstrado na Figura 19 (MARCONDES, 2019).

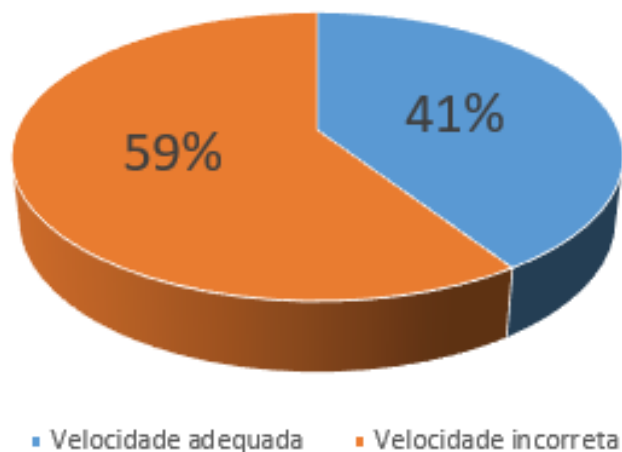
Figura 19 - Pressões nos nós



Fonte: MARCONDES (2019)

Além de irregularidades em mais da metade da rede, como demonstrado anteriormente, outro problema identificado por Marcondes (2019) foram as velocidades incorretas que afetam diretamente na disponibilidade de água à população, abaixo de 0,6 m/s. Na Figura 20 está representada a porcentagem da rede com velocidades abaixo ou superiores do determinado por norma. A explicação provável desta anormalidade está diretamente relacionada à perda de carga excessiva e aos diâmetros inadequados que prejudicam o abastecimento.

Figura 20 - Velocidade da água nos nós



Fonte: MARCONDES (2019)

5.5 Modelagem do sistema e simulações hidráulicas iniciais

Com objetivo de propor melhoria no sistema, visando especialmente ao controle de perdas a partir dos resultados obtidos, é indispensável que as simulações computacionais sejam

compatíveis com o sistema real e aproxime os dados gerados ao funcionamento real da rede de distribuição.

Para definição inicial as informações coletadas foram analisadas e apuradas para serem inseridas na pesquisa. Dados sobre os reservatórios, funcionamento de bombas, tempo de funcionamento da rede e idade do sistema, foram subsídios para o sistema ser simulado.

Em se tratando de uma rede antiga e com informações escassas, o sistema necessitou de ajustes em diâmetros de trechos em que os dados iniciais seriam inviáveis. Apesar da necessidade em respeitar os dados reais, valores muito defasados necessitam de adequações coerentes, tendo em vista o baixo controle sobre o sistema e os problemas que o permeiam.

5.5.1 Arranjo inicial da rede real para estudo

Durante esta etapa foram importados os dados da rede para o Epanet, onde os nós foram incluídos com as respectivas cotas do levantamento topográfico da área da rede de abastecimento de água. Juntamente com o levantamento dos nós, foram incluídos os trechos e os comprimentos entre eles. Assim foram locados os reservatórios para tornar possível as primeiras execuções das simulações.

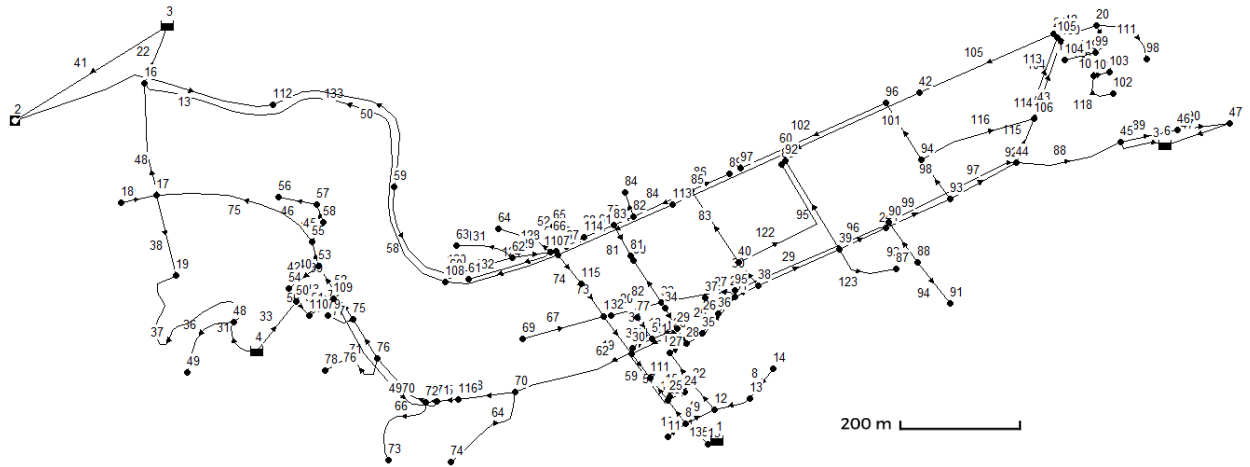
O arranjo final têm valores bastante aproximado do real em relação aos comprimentos de rede, cotas dos nós e o posicionamento dos elementos essenciais, como início do sistema, posicionamento do reservatório e as regiões mais elevadas e mais baixas.

Os dados de vazão e consumo foram mais sensíveis devido à inexistência de dados disponíveis, necessitando a aproximação e cálculos com base em dados existentes.

A localização e o funcionamento dos reservatórios foram importantes para estimativa de pressão inicial, vazão e consumo. Diante do cenário de rede real o mais adequado seria informações diretas do sistema responsável pelo controle da rede, porém na real situação, este sistema apresenta baixo nível de dados a serem coletados, tornando um sistema real em cenário desafiador, porém gerando um estudo capaz de adequar a grande parte dos sistemas do país.

A Figura 21 mostra a rede após a conclusão da sua elaboração. Por se tratar de uma rede real, é importante ressaltar que a precisão dos dados pode variar em determinadas regiões do sistema. Em se tratando de redes reais, muitos dados podem conter incertezas de medidas e localizações, sendo necessária a interpolação ou adoção de dados para simulação. Os dados completos sobre a rede encontram-se no Anexo I.

Figura 21 - Rede de distribuição - Epanet



Fonte: Próprio Autor (2022)

Desta forma, a rede de abastecimento de água está com os parâmetros mínimos necessários para as primeiras simulações tendo em vista as cotas dos nós, diâmetros nos trechos e reservatórios.

5.6 Acoplamento de Epanet e Python

De acordo com Barbedo (2022) o acoplamento dos *softwares* possibilita a interação das simulações base geradas no Epanet para comunicar com o *software* desejável nas novas execuções para obtenção de novos valores para o parâmetro utilizado.

Para Quezada (2020) a automatização e a análise estatística de redes proporcionam bons resultados para cenários de redes hidráulicas que necessitam de controle das variações de reservatórios e funcionamento de redes.

Nas etapas de acoplamento ocorrem inicialmente a criação do arquivo que carregará a rede, onde após sua leitura, são feitas as verificações de parâmetros, como comprimentos e diâmetros e realização dos comandos (QUEZADA, 2020).

A metodologia objetivou-se na tendência de evolução dos métodos utilizados por Barbedo (2022) onde ocorreu o acoplamento, porém com rede virtual da Ferramenta Epanet e R com o intuito de calibração de redes de distribuição de água para abastecimento.

Inicialmente, após a definição da rede virtual ocorre a integração entre *softwares* onde as simulações puderam ser realizadas. A sua elaboração obteve êxito e o acoplamento a partir das rotinas computacionais geraram resultados significativos, incluindo pressões e seus erros.

Para Barbedo (2022) as etapas de acoplamento iniciam-se com o carregamento dos dados exportados pelo Epanet, arquivos estes gerados e exportados após definição da rede teórica, mas que também pode-se utilizar em rede real.

Etapas seguintes definem quantos testes (cenários) serão realizados. Para Barbedo (2022) foram utilizados 10.000 testes para calibração. Para redes reais esse número pode ser aumentado para garantia de melhores resultados. Assim esses cenários criam milhares de rugosidades aleatórias para cada trecho. No presente trabalho foram definidos 20.000 cenários para calibração.

Além do cenário de rugosidade são definidos os mesmos testes para pressão nos nós, onde ocorrem ajustes durante cada cenário e gera resultados novos com erros a serem mensurados e mitigados para alcançar o resultado mais consistente.

Em redes fictícias a proposta se conclui positivamente em calibrações em redes de distribuição de água e as evoluções das pesquisas podem sofrer ajustes que conduzem os resultados com erros mínimos aceitáveis (BARBEDO, 2022).

Portanto a metodologia foi validada, pois as combinações de *softwares* com enfoque nas calibrações de sistemas estudados têm potencial enorme de aplicações em redes de distribuição de água e em calibração de modelos.

Para o presente trabalho este acoplamento visa o número de iterações e o uso de rede de abastecimento de água real, tendo em vista a relevância da junção de *softwares* e a difusão de suas funcionalidades no meio acadêmico.

5.7 Definição de cenários para análise

Na área de estudo real, alguns parâmetros estão determinados perante informações reais, portanto não há necessidade de alterações, sendo viável a alteração em itens da rede onde a estimativa se faz necessária, tendo em vista as informações não existentes, como rugosidade e demanda.

As primeiras definições iniciam-se com condições dinâmicas, onde as coletas de dados foram realizadas no período da manhã, mais especificamente entre 9h e 12h. O horário escolhido deve-se ao momento de consumo intermediário entre período de baixo consumo e períodos de grande consumo, gerando um momento de consumo médio dentro o sistema.

Os pontos foram escolhidos de maneira alternada diante toda a disposição da rede, sendo necessária amostras de diversos pontos distintos. Dos pontos analisados todos estão conectados

ao sistema de distribuição sem nenhum dispositivo intermediário que comprometa as informações.

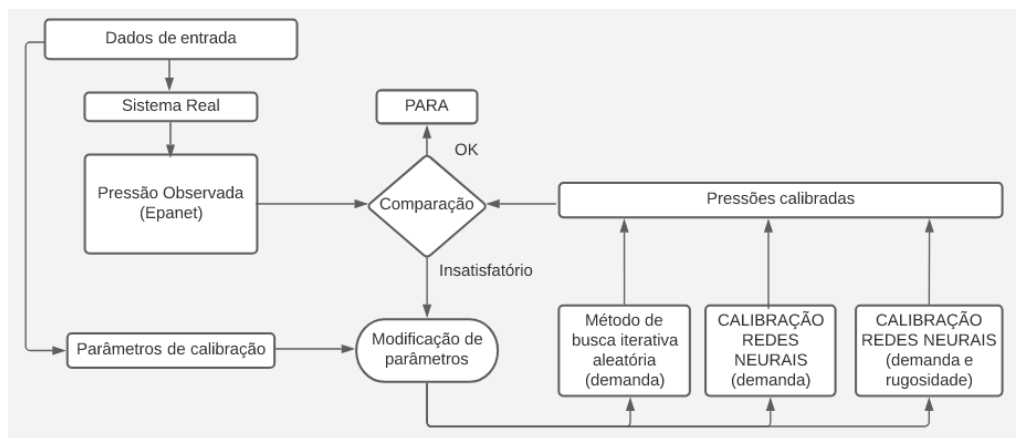
Em análises posteriores a vazão de consumo é adicionada para aproximar da situação real, e aos poucos sendo incrementado outros elementos para gerar novos dados e comparar com as simulações preliminares e outras pesquisas acadêmicas em redes fictícias.

Em últimas condições pode-se ainda ser necessária a alteração de alguns fatores reais existentes para geração de cenários aproximados para simulações devido inconformidades em dados obtidos, como alguns diâmetros incorretos.

5.8 Calibração da Rede

Serão gerados resultados das calibrações visando a aproximação dos dados reais aos gerados pelo Epanet e estabelecer dados de vazão nos trechos e pressão nos nós, vinculados às demandas e rugosidades. Estes dados poderão ser analisados para definição de relações entre seus parâmetros e as perdas do sistema. No fluxograma da figura 22 pode-se compreender o processo de análise dos dados, simulação e calibração dos resultados.

Figura 22 - Fluxograma do processo de calibração



Fonte: Próprio Autor (2022)

O processo inicia-se com a aquisição dos dados da rede, que ocasionalmente têm limitações nas informações, com escassez de dados e incertezas de um sistema real, onde a sua validação é verificada para início dos trabalhos. Posteriormente os dados são inseridos no Epanet para a primeira análise dos gráficos de pressões.

Paralelo às simulações, são coletadas amostras de pressão em sistema real, para que estes pontos coletados sejam dados de comparação e calibração.

Os dados obtidos por simulação são comparados com os dados coletados em campo e a diferença entre os dados consiste em ajustes por calibração, que devem ocorrer por sequência

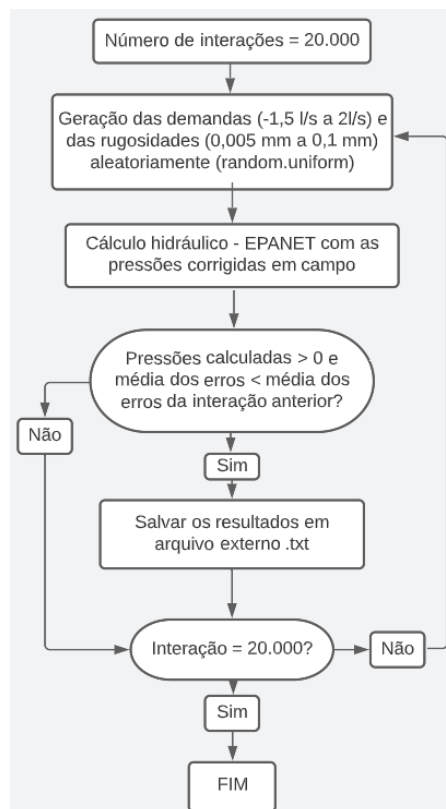
de métodos, partindo da calibração pelo método de busca iterativa aleatória, onde os resultados voltam a ser comparados e posteriormente calibrados em Redes Neurais com utilização dos dados de demanda e rugosidade.

Portanto, a partir dos dados iniciais e a elaboração do sistema real, pode-se observar os dados gerados no *software* Epanet, onde os parâmetros de calibração indicam as modificações a serem realizadas. Assim em primeiro plano, realiza-se a calibração do método de busca iterativa aleatória, posteriormente após novas comparações, em caso de resultados insatisfatórios realiza-se as calibrações com Redes Neurais, com objetivo de melhorar a aproximação do valor final.

5.8.1 Calibração pelo método de busca iterativa aleatória

Na figura 23 apresenta-se o fluxograma do processo de iterações para calibração, onde foram geradas iterações para demandas de -1,5 l/s a 2 l/s e rugosidades de 0,005 mm a 0,1 mm a partir do comando *random.uniform*. O resultado cujas pressões forem superiores a 0 e a média do erro do resultado do Epanet corrigido com os dados de campo com o calculado para os novos valores for menor que a média anterior, ele irá salvar em arquivo externo.

Figura 23 – Fluxograma da calibração pelo método de busca iterativa aleatória



Fonte: Próprio Autor (2022)

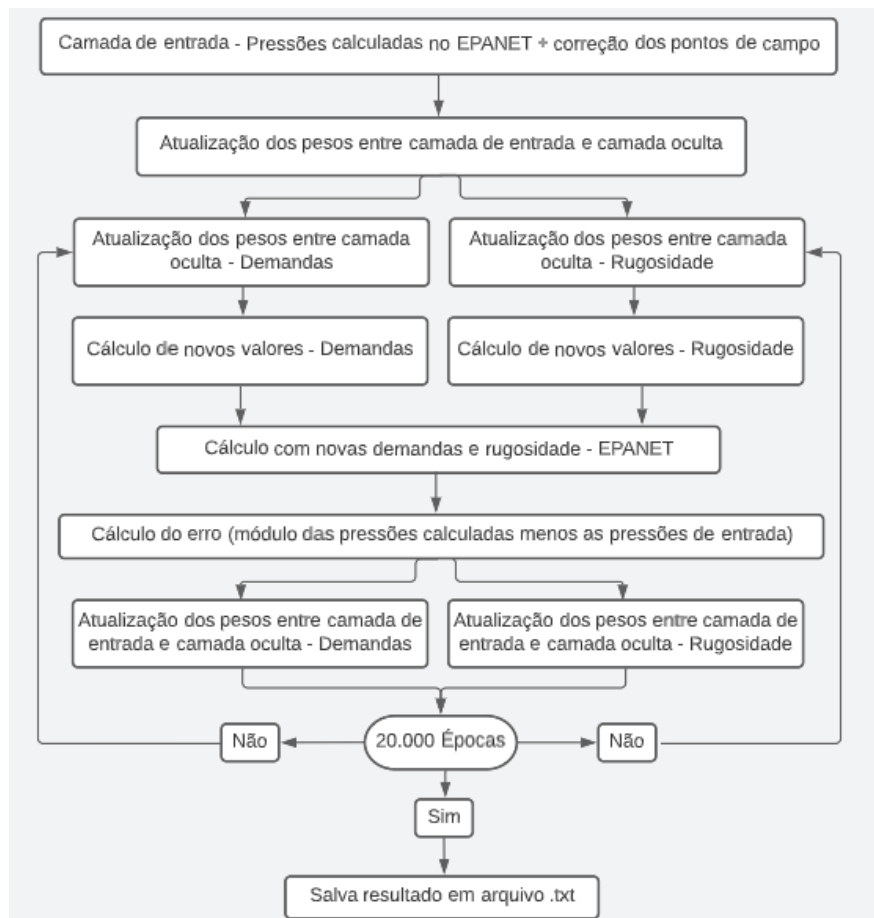
No processo estabelecido pelas simulações pelo método de busca iterativa aleatória pode-se observar que os melhores resultados do método de busca iterativa aleatória podem ser menos satisfatórios do que os obtidos em redes neurais. Apenas com a análise metodológica espera-se resultados distantes devido o critério de calibração.

5.8.2 Calibração Redes Neurais com Demanda e Demanda e Rugosidade

As calibrações com redes neurais podem otimizar os estudos com base na capacidade de aprendizado ao longo dos cenários e possibilidades de simulações. Sabe-se que os erros são inerentes de qualquer sistema, porém as aproximações de erros proporcionam maior confiabilidade no processo para confiabilidade dos estudos.

Para os dados de entrada foram utilizadas as pressões geradas pelo Epanet e acrescentados os pontos coletados em campo visando a calibração a partir do modelo proposto. Na figura 24 o fluxograma mostra que após a camada de entrada são atualizados os pesos entre as camadas para demandas e rugosidades presentes.

Figura 24 - Fluxograma da calibração com Redes Neurais



Fonte: Próprio Autor (2022)

Os pesos entre camadas significam base de cálculo de erros a partir das pressões calculadas menos as pressões de entrada. Portanto, a atualização dos pesos gera camadas até 20 mil épocas para maior número de iterações e gerar resultados.

Após a atualização de pesos em seus respectivos fatores de demanda e rugosidade separadamente, são gerados novos valores que correspondem a novas possibilidades de calcular nova demanda e rugosidade vinculado ao próprio Epanet.

Ocasionalmente esses dados gerados vão apresentar erros antes das análises finais, onde o próprio erro que é o módulo das pressões calculadas menos as pressões de entrada, formam os resultados que serão trabalhados após a atualização dos pesos e as camadas de demanda e rugosidade, preparando os dados para nova análise.

No presente estudo essas simulações seguem esse ciclo até a conclusão em 20 mil épocas, considerando valor suficiente para determinação de resultados consistentes. Não obstante, outros limites de simulações podem ser definidos, mas as estimativas de valores superiores acima de 20 mil épocas determinam variações pequenas.

Vale ressaltar que o modelo proposto, apresentado na presente metodologia é passível de erros, considerando que modelos perfeitos são inexistentes. Portanto, trabalha-se com base em limitações expostas e buscando ajustes regulares que propõe resultados mais adequados.

A explicação para os ajustes realizados visando diminuição de erros inicia-se no aprendizado da rede neural, assim ao longo das iterações o aprendizado faz atingir resultados satisfatórios dentro das simulações possíveis dentro do tempo computacional disponível no período de trabalho.

Com a devida organização estatística dos dados em conformidade com os dados reais da rede estudada poderão ser gerados dados gráficos comparativos entre os cenários propostos para a identificação real das proposições necessárias.

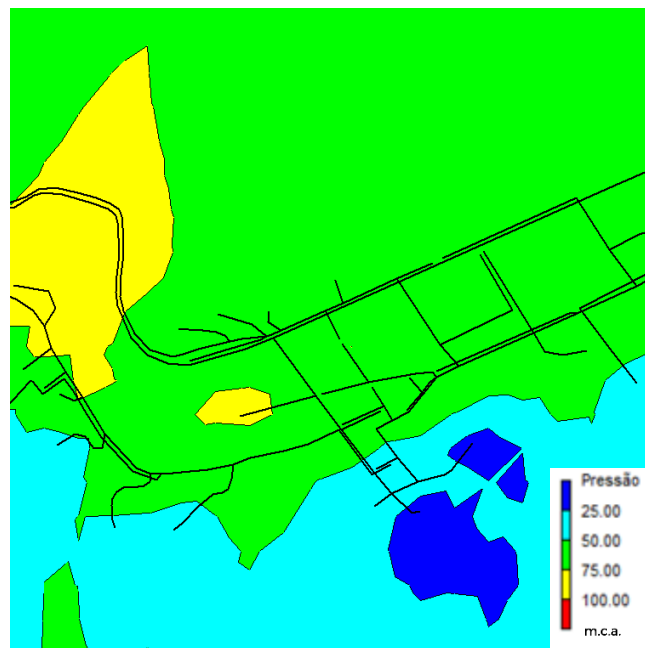
6. RESULTADOS

Os resultados a serem apresentados estão divididos em etapas de acordo com a obtenção das informações, iniciando-se com resultados iniciais gerados após os primeiros ajustes e execuções. Posteriormente são acrescentados dados e calibrações que geram novos resultados com maior consistência para análise e comparações visando as considerações finais.

6.1 Resultados iniciais

As primeiras análises foram realizadas buscando a certificação das importações e o lançamento corretos das informações externas do Epanet. Na Figura 25 pode-se observar o gráfico de Isolinhas de Pressão onde foram levadas em consideração as cotas e os diâmetros, sem a inclusão das vazões de consumo.

Figura 25 – Mapa de pressão – simulação sem demanda



Fonte: Próprio Autor (2022)

Nas regiões mais baixas a pressão estática é superior à 75 m.c.a, justificado pela grande diferença de declividade. Já em algumas regiões um pouco mais elevadas, na maior parte do sistema, a pressão está entre 50 m.c.a a 75 m.c.a. Em regiões mais elevadas do sistema, próximas ao reservatório, a pressão é inferior a 50 m.c.a. e em algumas regiões pode-se chegar a pressão inferior a 25 m.c.a.

Pode-se analisar de maneira mais detalhada com base na distribuição de pressão, que aproximadamente 22% da rede está com pressão inferior à 50 m.c.a. valor este que deveria ser

atendido em toda a extensão da rede, com base na NBR 12218 (2017), que define a pressão estática máxima em 50 m.c.a (500kPa).

Dentro da interface do *software* Epanet foi disponibilizado os relatórios da simulação. Na Figura 26, extraída do Epanet, está uma amostra dos nós da rede onde a pressão indicada contém grandes variações entre os nós, indicando que a rede apresenta correções necessárias a serem feitas para compensar e adequar as diferenças de declividades onde a rede está submetida.

Figura 26 - Pressão estática nos nós após simulações iniciais

Identificador do Nó	Cota m	Pressão m
Nó 10	1206.39	73.56
Nó 11	1248	31.96
Nó 12	1244.96	34.91
Nó 13	1250	29.87
Nó 14	1262	17.87
Nó 15	1270	10.00
Nó 16	1188	36.56
Nó 17	1190.151	52.26
Nó 18	1193.151	49.26
Nó 19	1214.96	31.66
Nó 20	1213.92	64.33

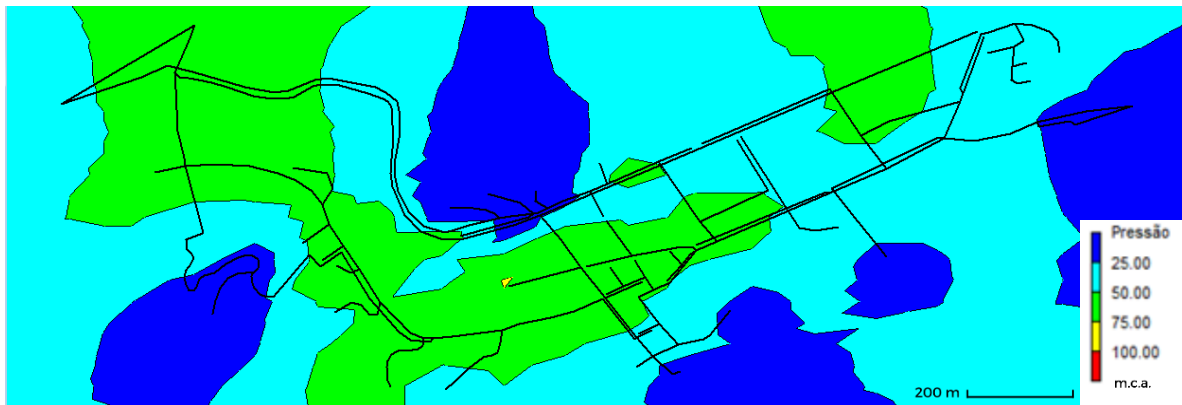
Fonte: Próprio Autor (2022)

6.2 Simulação Dinâmica

Para a realização da Simulação Dinâmica foi determinado o valor inicial de consumo por nó, com base na referência da média das vazões dos últimos meses de 19 litros por segundo. Vale ressaltar que nesta primeira simulação, a vazão não foi relacionada com os dados estimados pelo Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento, sendo adotado apenas os dados reais disponibilizados pelo órgão Municipal responsável.

Considerando a vazão de 19 l/s distribuída no total de 108 nós da rede, obteve-se o consumo por nó de 0,176 l/s. Foram gerados novos dados após a execução da simulação, na Figura 27 é possível observar a alteração da distribuição das pressões onde 65% da rede passam a alcançar 50 m.c.a de pressão nos trechos.

Figura 27 – Mapa de pressão após simulação dinâmica



Fonte: Próprio Autor (2022)

Para a realização das calibrações foram necessárias análises de dados gerados no campo de estudo. Assim foram coletados alguns dados em pontos de consumo escolhidos aleatoriamente a partir do critério de seleção de pontos localizados alternadamente ao longo da rede, visando a medição distribuída ao longo dos trechos.

Na tabela 1 a seguir estão listados os 7 pontos de pressões coletadas em campo juntamente com os dados do Epanet.

Tabela 1 - Comparativo de pressões de campo e Epanet

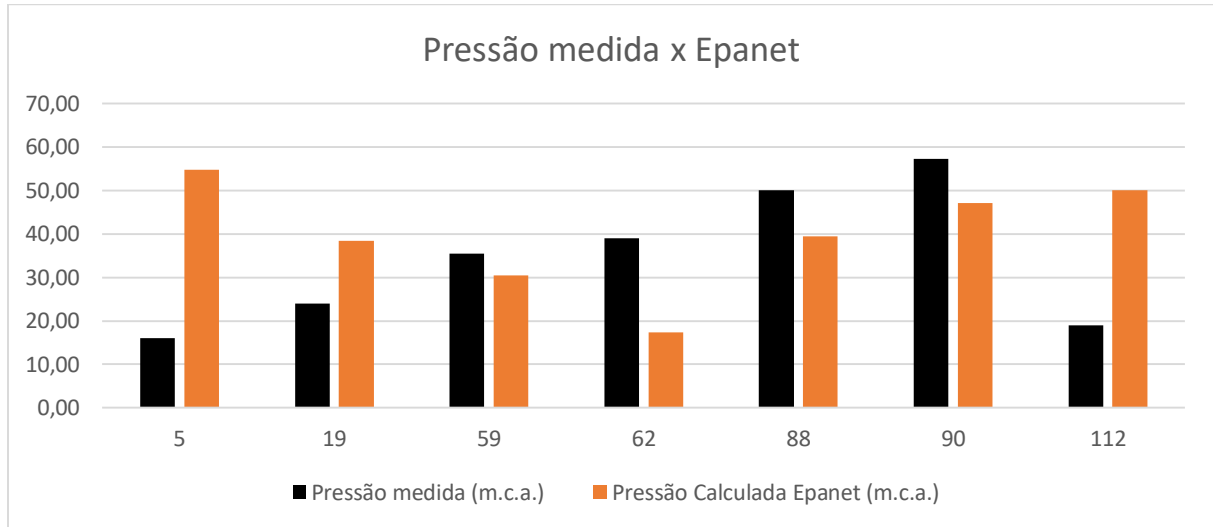
Nó	Pressão medida (campo) (m.c.a)	Epanet (m.c.a)	Erro Cal. Epanet
5	16,00	54,70	241,88%
19	24,00	38,47	60,29%
59	35,50	30,53	14,00%
62	39,00	17,38	55,44%
88	50,00	39,51	20,98%
90	57,20	47,16	17,55%
112	19,00	50,07	163,53%

Fonte: Próprio Autor (2022)

Sabe-se que as medições são passíveis de incertezas e erros, portanto, os dados foram coletados em pequeno espaço de tempo para utilizar um padrão de horário sem variações entre os locais escolhidos. O horário de coleta também pode influenciar, sendo assim, o período da manhã foi escolhido por ser intermediário entre horário de baixo consumo do período noturno e de alto consumo a partir das 11 horas da manhã.

Na Figura 28, está demonstrado a diferença encontrada da rede real do Epanet e os pontos escolhidos para análise de campo. Apesar da correlação entre alguns dos pontos, existem variações significativas entre eles, como no caso do nó 5 e 112.

Figura 28 - Pressões medidas e calculadas



Fonte: Próprio Autor (2022)

6.3 Calibração pelo método de busca interativa aleatória

Após a coleta de dados foram calibrado os mesmos a partir do método de busca iterativa aleatória onde os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Comparativo de pressões com método de busca iterativa aleatória

Nó	Pressão medida (campo)(m.c.a)	Pressão Calibrada. Método de busca iterativa aleatória (m.c.a)	Erro Cal. Demanda
5	16,00	57,11	256,94%
19	24,00	40,36	68,17%
59	35,50	26,78	24,56%
62	39,00	21,84	44,00%
88	50,00	39,89	20,22%
90	57,20	46,96	17,90%
112	19,00	50,02	163,26%

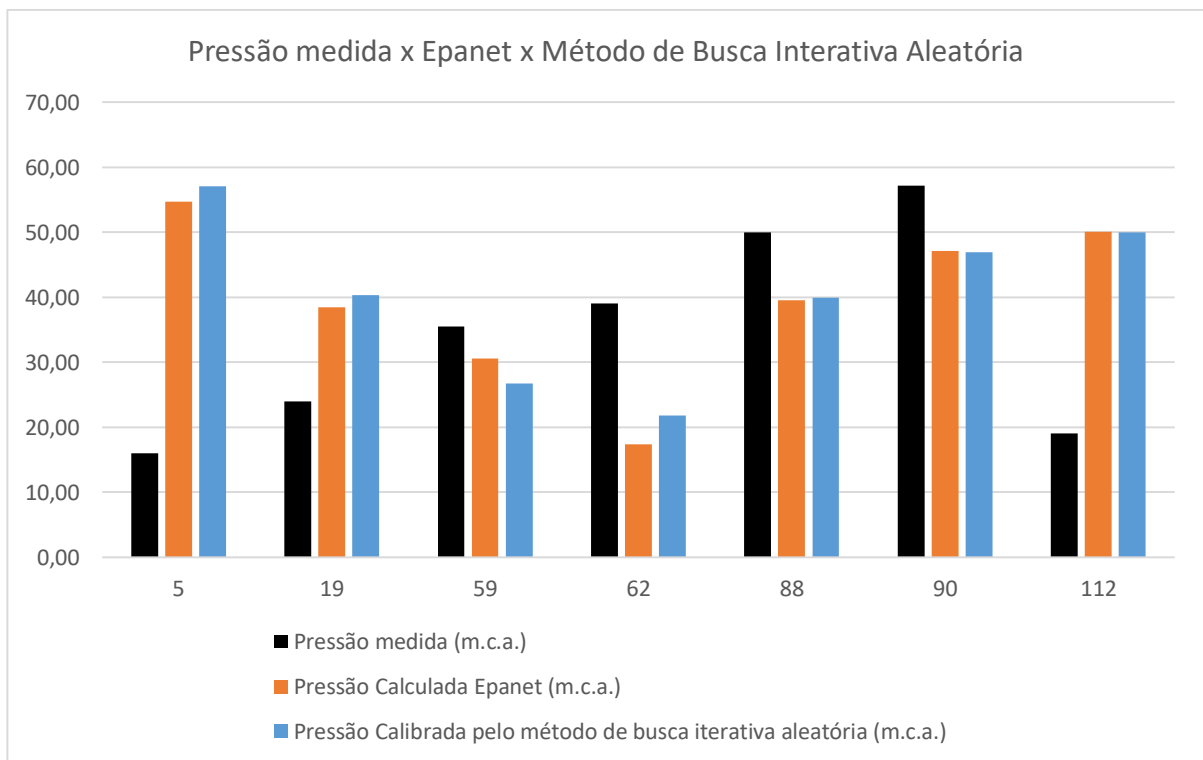
Fonte: Próprio Autor (2022)

Os resultados apontam valores que devem ser trabalhados em outras metodologias de calibrações para utilização em futuras simulações devido a necessidade de aproximação de cenários com menores erros.

Pode-se observar que os melhores resultados do método de busca iterativa aleatória são insatisfatórios se considerar o grande índice de erros. Para sua execução a simulação levou cerca de 1 hora para 10.000 iterações, e dado o seu caráter aleatório, é razoável supor que 20.000 iterações não produziram resultados melhores que o atual.

Considerando as primeiras calibrações, o método de busca iterativa aleatória possibilitou uma calibração genérica que não contribuiu significativamente, necessitando de melhores aproximações. Na Figura 29 estão demonstrados os intervalos entre a pressão existente na rede, o simulado inicialmente pelo Epanet e a primeira calibração, com ajustes da rugosidade.

Figura 29 - Comparativo de pressões após o método de busca iterativa aleatória



Fonte: Próprio Autor (2022)

As variações existentes podem ser explicadas pela limitação do estudo entorno de 7 pontos, onde poderiam ser otimizados com maior número de nós estudados, porém, o objetivo de calibração também pode ser submetido à cenários mais limitados para que seus resultados possam contribuir dentro da capacidade de análise.

Pode-se observar que os melhores resultados do método de busca iterativa aleatória são piores em um contexto geral do que os obtidos pelas redes neurais, mas ainda assim os resultados são muito distantes para tal ponto dos preconizados pelo critério de calibração. Deve-

se lembrar que a simulação levou cerca de 3,5 horas para 20.000 iterações, e é razoável supor que mais iterações poderiam resultar em resultados ligeiramente melhores, contudo, com um tempo computacional alto demais para pouco benefício.

6.4 Calibração Redes Neurais com Demanda

Para as calibrações com demanda foram utilizados critérios de calibração de redes, baseados em pressão, podem ser vistos com mais detalhes em Silva (2003) na sua tese de doutorado. Essencialmente:

- 0,5 m.c.a. para 85% dos pontos monitorados;
- 0,75 m.c.a. para 95% dos pontos monitorados;
- 2 m.c.a. para todos os pontos monitorados.

Assim, as análises a seguir se basearão em tais critérios.

- Para 20.000 épocas, ambas as redes neurais levaram cerca de 2 horas para calibrar;
- Apenas a neural de demanda calibrou mais rápido e melhor até 10.000 épocas.

Na tabela 3 apresenta-se o comparativo das redes neurais com demanda.

Tabela 3 Comparativo com Redes Neurais (demanda)

Nó	Pressão medida (m.c.a.)	Pressão Calibrada Demanda (m.c.a.)	Erro Cal. Demanda
5	16,00	16,38	2,3199%
19	24,00	24,09	0,3736%
59	35,50	35,45	0,1410%
62	39,00	38,84	0,4119%
88	50,00	49,93	0,1402%
90	57,20	57,19	0,0175%
112	19,00	19,08	0,4193%

Fonte: Próprio Autor (2022)

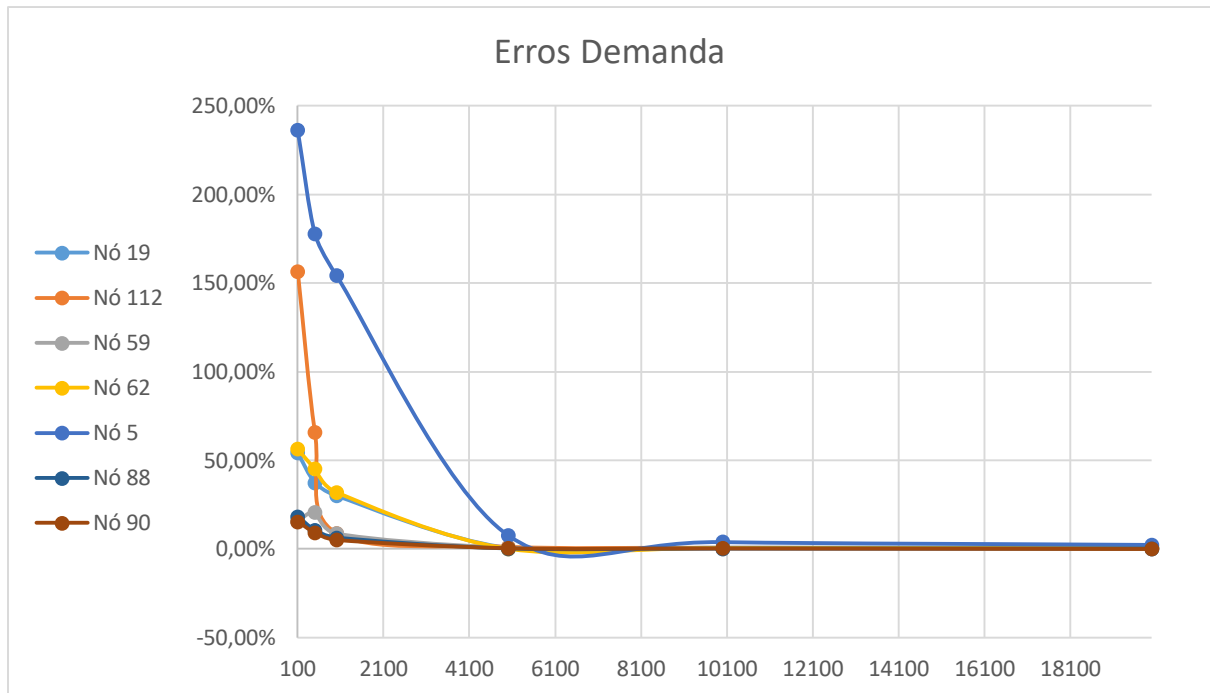
As pressões utilizadas para calibrar a demanda foram as obtidas pelo Epanet, substituindo-se no algoritmo os valores dos nós pelos valores obtidos na medição de campo. O objetivo é fazer a rede neural aprender através das pressões quais demandas o Epanet deve usar para gerar as novas pressões. Em suma: as redes neurais geraram novas demandas, que foram utilizadas para recalculas as pressões;

O grande desafio e a limitação deste estudo é a falta de dados referentes a vazão. Com dados de vazão seria possível inserir mais dados nas neurais. Inclusive, para as pressões ficarem

dentro do aceitável na calibração, algumas demandas tiveram valores exageradamente altas ou baixas.

Na Figura 30 está demonstrado a redução dos erros entre os nós comparados em função do número de iterações, onde fica evidente a redução das inconformidades e aproximação entre os pontos após 10.000 iterações.

Figura 30 – Erros com demanda

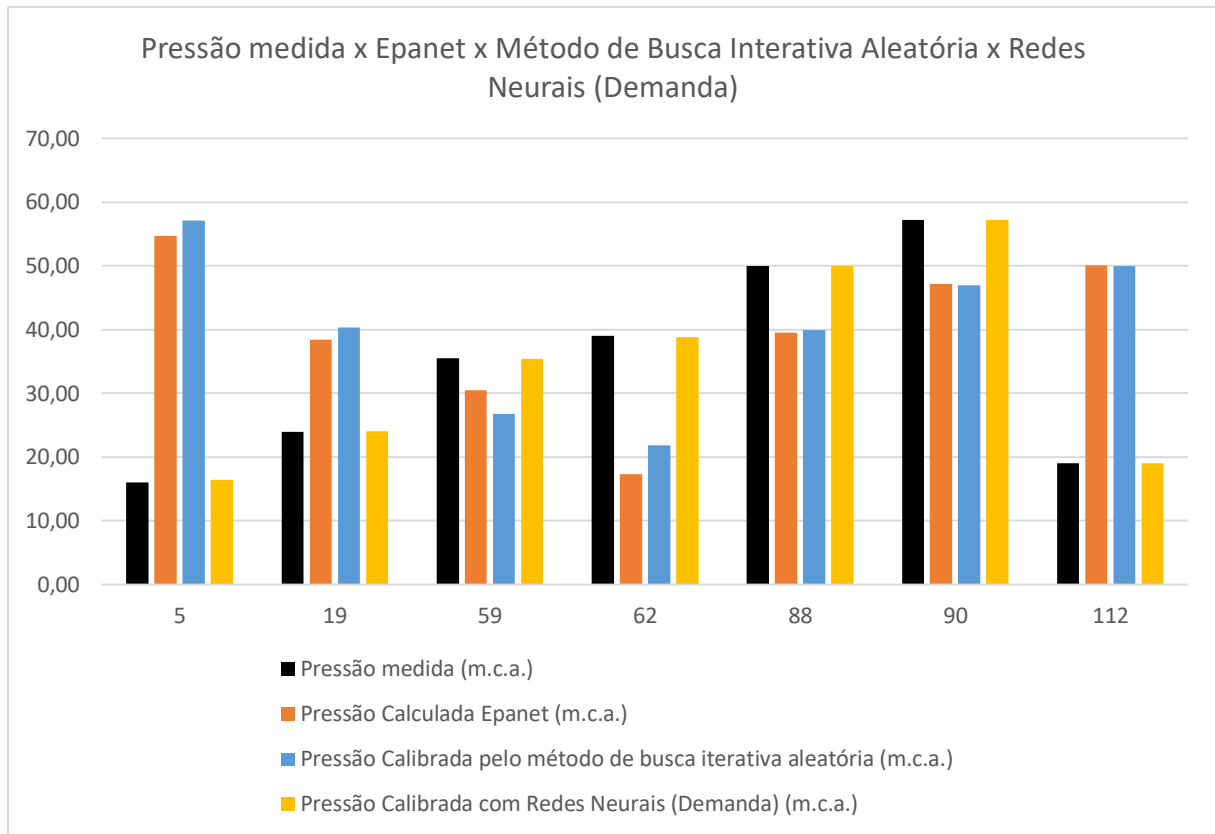


Fonte: Próprio Autor (2022)

Considerando o critério de até 2 m.c.a. para TODOS os pontos monitorados, seria possível, porém não recomendável, calibrar em $\frac{1}{4}$ do tempo, com resultados satisfatórios. Contudo, é recomendável usar 10.000 épocas para a neural de demanda, para se obter uma calibração mais fidedigna.

Na Figura 31 observa-se melhores aproximações com base nas calibrações com Redes Neurais. Ao analisar as pressões calibradas com o parâmetro de demanda, vê-se dados mais consistentes do que pelo método de busca iterativa aleatória e aproxima-se dos dados reais.

Figura 31 - Comparativo de pressões com Redes Neurais (Demanda)



Fonte: Próprio Autor (2022)

6.5 Calibração Redes Neurais com Demanda e Rugosidade

Para finalizar as simulações, a rede foi submetida para novas calibrações, neste caso utilizado Redes Neurais com o acréscimo da rugosidade juntamente aos dados de demanda da rede. Tendo em vista os dados gerados, na tabela 3 estão os índices de erro gerados nessas simulações. Obtendo diferenças mínimas que colocam as Redes Neurais com melhores resultados.

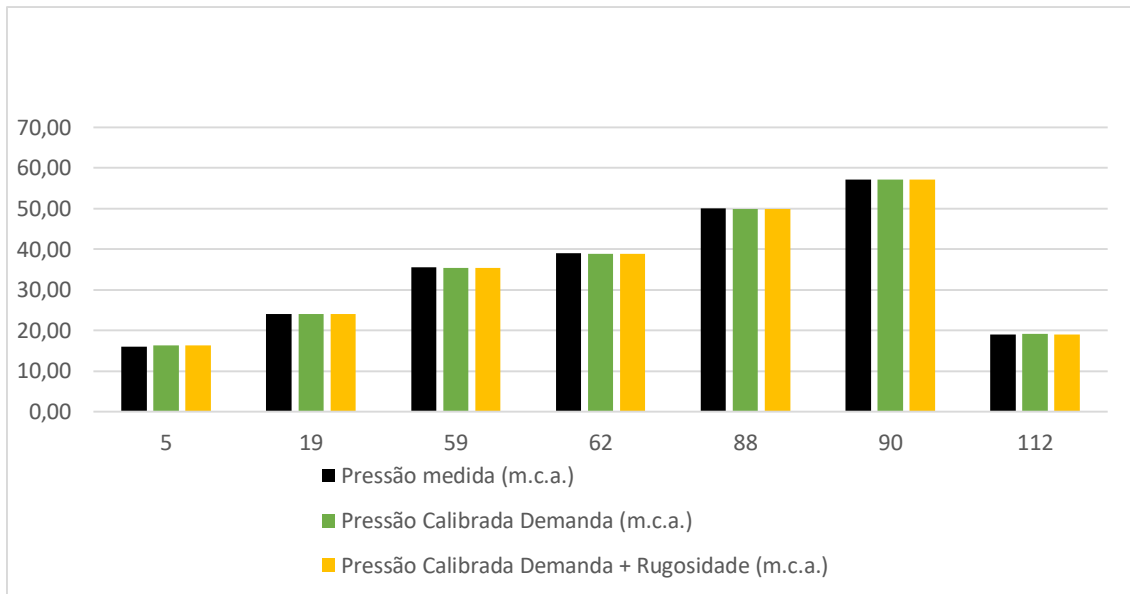
Tabela 4 - Redes Neurais Artificiais (Demanda e Rugosidade)

Nó	Pressão medida (m.c.a.)	Pressão Calibrada	
		Demanda + Rugosidade (m.c.a.)	Erro Cal. Dem+Rug
5	16,00	16,36	2,2005%
19	24,00	24,09	0,3736%
59	35,50	35,45	0,1410%
62	39,00	38,85	0,3861%
88	50,00	49,93	0,1402%
90	57,20	57,19	0,0175%
112	19,00	19,07	0,3671%

Fonte: Próprio Autor (2022)

Para simulações de rede neural de demanda e rugosidade obteve-se resultados ligeiramente superiores ao da demanda simples em 20.000 épocas. Cumpre lembrar que em menos época, a demanda mais rugosidade foi inferior a demanda simples, o que é razoável uma vez que há mais variáveis para a rede aprender, ou seja, maior complexidade e tempo. Na figura 32 apresenta-se a paridade entre o comparativo de redes neurais e a pressão medida.

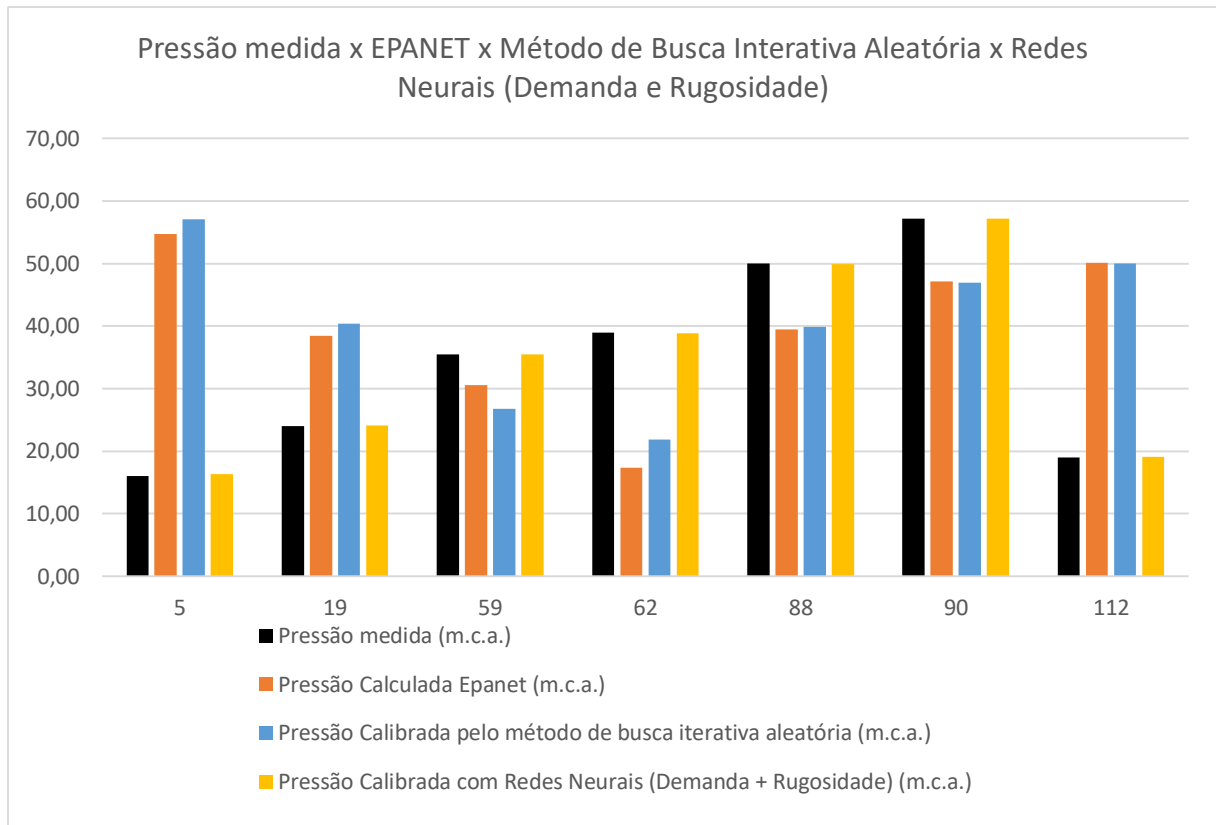
Figura 32 - Comparativo de Redes Neurais



Fonte: Próprio Autor (2022)

Com base em todas as simulações, vale ressaltar o comparativo entre os principais resultados em relação ao de maior performance. Na Figura 33 observa-se que a calibração com Redes Neurais com demanda e rugosidade apresenta maior aproximação comparado ao método de busca iterativa aleatória. Evidencia-se que Redes Neurais são mais eficientes para cenários como o proposto neste trabalho.

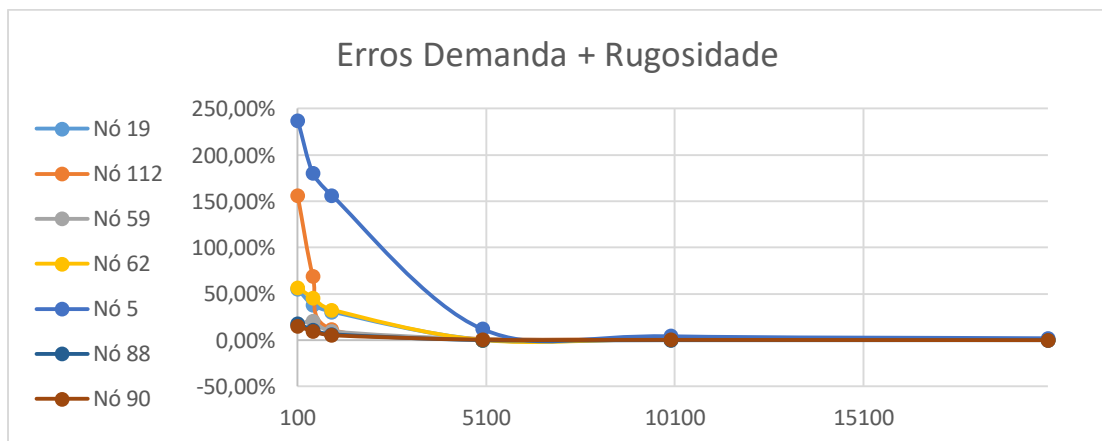
Figura 33 - Comparativo entre pressões com demanda



Fonte: Próprio Autor (2022)

Na Figura 34, assim como no método de calibração realizado apenas com demanda, está demonstrado a redução dos erros entre os nós comparados com o número de iterações, onde novamente fica demonstrado a redução dos erros com a aproximação entre os pontos após 10.000 iterações.

Figura 34 - Erros Demanda e Rugosidade

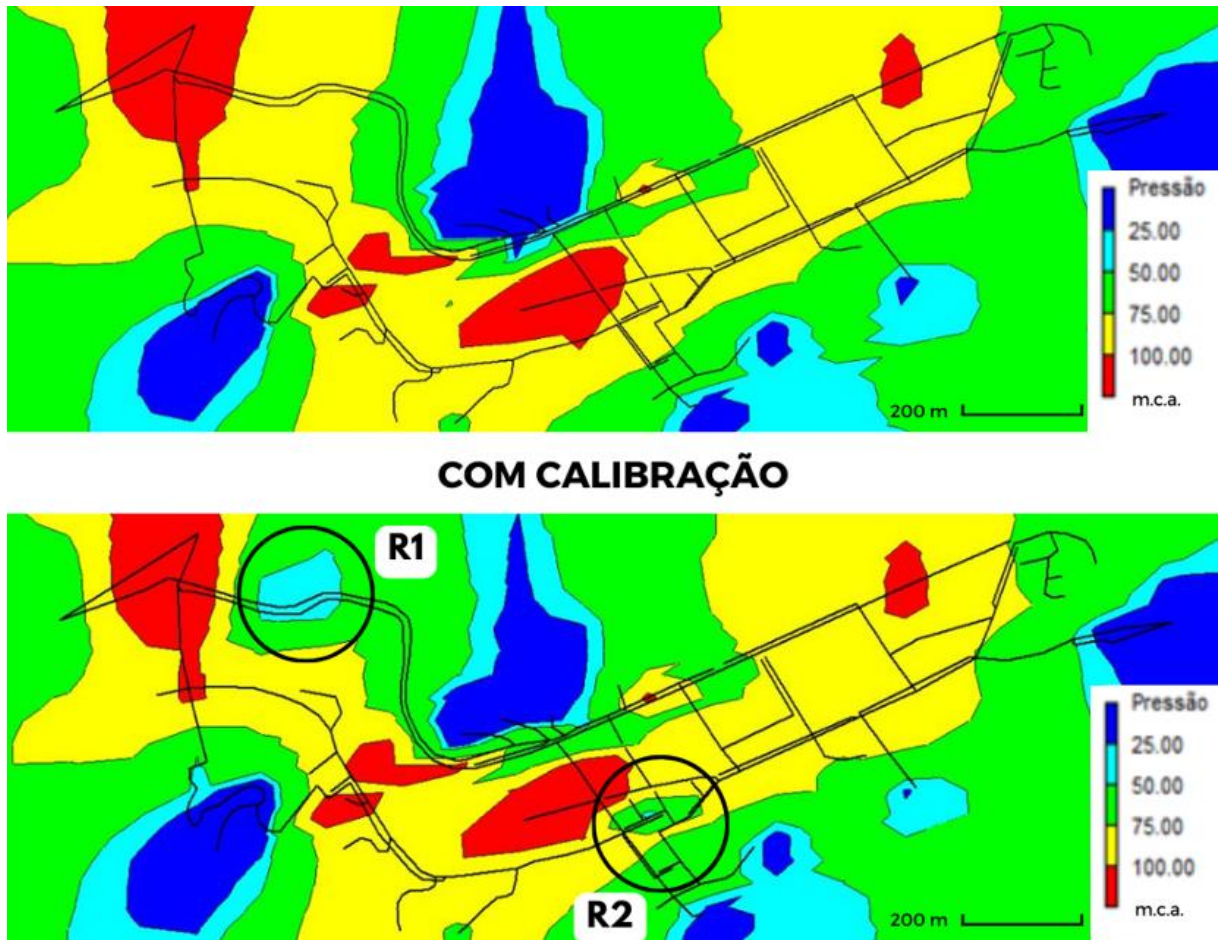


Fonte: Próprio Autor (2022)

A partir dos dados obtidos com calibração para demanda e rugosidade os resultados apontam os melhores resultados para este cenário, portanto os dados gerados foram inseridos novamente no Epanet com objetivo de obter novas pressões.

Na figura 35 pode-se observar as alterações sofridas na representação gráfica de Isolinhas após a substituição das informações na rede de estudo.

Figura 35 - Comparação das pressões com e sem calibração



Fonte: Próprio Autor (2022)

Observa-se no gráfico de isolinhas que a calibração atua de acordo com o número de pontos coletados em campo, assim com número pequeno de pontos reais coletados o gráfico de isolinhas aparentemente não tem grandes alterações, demonstrando a qualidade da modelagem matemática realizada, o que muitas vezes não é tarefa fácil. Entretanto nas Regiões 1 e 2 (R1 e R2) constata-se os benefícios da calibração.

Observa-se que a Região 1 contém pressão de 50 a 75 m.c.a. e após a calibração as pressões ajustadas vão para 15 a 25 m.c.a. Já na Região 2 também se observa este ajuste saindo

da classificação de 50 a 75 m.c.a. para menos de 50 m.c.a. Estas diferenças mostram a importância da calibração em termos de mudança imediata na região calibrada.

Destaca-se que a figura calibrada ilustra a situação mais aproximada da realidade do sistema e apresenta resultado validado, com foco em controle de perdas de água. A partir deste trabalho, futuros estudos de operação e calibração poderão propor ações em termos de operação de válvulas, bombas e níveis de reservatórios para obter melhorias e eliminar as regiões de alta pressão, assim como demonstradas no mapa de isolinhas, conduzindo a pressões para a margem estipulada na norma utilizada para pressões em sistemas de abastecimento de água.

Porém o diferencial está exatamente nos locais medidos pois formam as regiões específicas que demonstraram diferença na representação gráfica.

Assim a rede de modo geral não sofre grandes alterações, mas as regiões onde as medições foram realizadas, contribui para melhoria dos valores na região próximas a esses pontos. Evidenciando que o maior número de pontos coletados, maior será a região que sofrerá ajustes nas calibrações.

Para efeito de comparação, na figura 36 gerada no Epanet, pode-se observar que nas primeiras análises os nós 59 e 62 que posteriormente foram analisados nas medições de campo, apresentavam pressão de 30,53 m.c.a. e 17,38 m.c.a., ou seja, valores brutos, gerados após as primeiras simulações, sem calibrações e nenhuma medição de campo, até a obtenção destes resultados.

Figura 36 - Amostra de pressões sem calibração

Identificador do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m
Nó 55	0.17	1250.88	54.88
Nó 56	0.17	1250.69	55.69
Nó 57	0.17	1250.72	56.72
Nó 58	0.17	1250.80	55.80
Nó 59	0.17	1223.53	30.53
Nó 60	0.17	1224.27	19.88
Nó 61	0.17	1225.97	21.71
Nó 62	0.17	1225.09	17.38
Nó 63	0.17	1225.02	4.49
Nó 64	0.17	1226.03	10.84
Nó 65	0.17	1226.51	9.79

Fonte: Próprio Autor (2022)

Na figura 37 fica evidente que a calibração resulta em alterações em todos os nós, incluindo os parâmetros de consumo, carga hidráulica e pressão. Entretanto os pontos 59 e 62

são os pontos de maior alteração por serem os pontos de medição real. Isso confirma que a estruturação da simulação ocorre de acordo que os pontos coletados são inseridos. Quanto maior o número de pontos, melhor será a geração final de dados calibrados.

Figura 37 - Amostra de pressões com calibração

Identificador do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m
Nó 55	0.07	1251.55	55.55
Nó 56	0.17	1251.35	56.35
Nó 57	0.18	1251.39	57.39
Nó 58	0.18	1251.46	56.46
Nó 59	-4.57	1229.37	36.37
Nó 60	5.21	1225.38	20.99
Nó 61	0.28	1227.40	23.14
Nó 62	-13.54	1247.84	40.13
Nó 63	4.29	1226.42	5.89
Nó 64	0.44	1227.44	12.26
Nó 65	0.02	1227.94	11.22

Fonte: Próprio Autor (2022)

Portanto, em cenários como o apresentado, onde o número de pontos medido em campo é muito pequeno, os ajustes nos demais nós serão menores, já nos nós medidos esses ajustes direcionam para bons resultados, com alterações em todos os pontos em todos os parâmetros.

7. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de testar metodologia de calibração de uma rede de distribuição de água, baseada em redes neurais artificiais. A aplicação foi feita para rede real do Sul de Minas Gerais. As ferramentas utilizadas foram o ambiente Python e o Software Epanet. Considera-se um trabalho diferenciado pois a literatura mostra que existem poucos trabalhos relacionando a redes neurais e calibração de redes de água na literatura. A aplicação para rede real e região montanhosa, elucidou o diferencial do trabalho.

Na sequência são apresentados neste capítulo as principais considerações sobre os resultados obtidos.

Inicialmente foram apresentados resultados de simulações hidráulicas obtidas a partir de cenário considerado, a partir modelagem matemática feita de posse dados obtidos, tais como diâmetros, comprimentos e rugosidades das tubulações, além de níveis de reservatórios, cotas topográficas, válvulas, bombas e topologia da rede.

A partir destas informações e modelagem matemática e ajustes foram feitas simulações base e obtidos resultados iniciais. Tais resultados computacionais foram comparados com medidas realizadas em campo em termos de pressões nos nós eleitos. Conforme esperado os valores simulados e medidos apresentaram diferenças, mas estes resultados iniciais foram considerados bons por ser uma simulação inicial.

As simulações contribuíram para identificar zonas problemáticas (alta ou baixa pressão) como locais com rompimento de tubulações, atendimento deficiente (falta de água por baixas pressões em determinadas condições), dentre outros problemas. Pode-se até mesmo ser um ponto de partida para análises de expansão da rede, melhorias e até mesmo o refinamento posterior do modelo, com novas campanhas de medição, obtenção de dados de vazão, levantamento de dados acerca de diâmetros, consumos, dentre outros que permitam uma simulação mais apurada.

Posteriormente foi realizada a calibração do modelo, ajustando-se a rugosidade das tubulações e considerando o método inverso de comparação de valores de pressão observados e simulados. Utilizou-se o método de busca iterativa aleatória. As diferenças entre pressões medidas e simuladas foram um pouco menores que a simulação base original. Avalia-se coerente pois uma rede de distribuição de água real do porte estudado, sobretudo em região montanhosa demonstra dificuldades para ajustes de calibração, fundamentado na experiência de estudos anteriores do grupo NUMMARH.

Na sequência foi realizada a calibração baseada em metodologia de redes neurais artificiais, ajustando-se as demandas nos nós, com base nos valores de pressões medidas e simuladas. Conforme detalhado nos resultados os valores simulados ficaram muito mais próximos dos valores medidos de pressão de maneira expressiva.

Este fato é justificado pela potencialidade da ferramenta, pode-se dizer que a rede neural tentou aprender com o desenvolvimento do processo, ainda que com dados limitados. E aparentemente, o fez bem. O uso de outras técnicas como a Simulação do método de busca iterativa aleatória até poderiam apresentar resultados próximos ou até melhores que os obtidos pelas Redes Neurais, contudo, é razoável supor que para tal seria necessária uma quantidade de iterações muito maior, levando a um tempo computacional extremamente alto, talvez até impraticável.

Não existe modelo perfeito com uma rede neural perfeita, caso existisse, não seriam redes neurais para previsão ou algoritmos de otimização. Dito isso, sabendo de todas as limitações aqui expostas, foi feita uma boa calibração com as Redes Neurais, em tempo razoável e sem necessidade de ajuste de faixa de valores como em outros métodos de otimização.

Assim, pode-se concluir que a maior vantagem das redes neurais consiste na sua capacidade de aprendizado, o que resulta em menos tempo gasto com ajustes de parâmetros do modelo, como definição das faixas para rugosidade e/ou demanda, bem como as simulações necessárias para verificar se as faixas adotadas ficaram adequadas. Em uma condição de calibração na qual as informações são escassas, tal vantagem não pode ser desprezada.

Portanto em condições extremas de escassez de dados de entrada, este trabalho apresenta estudos de entrada que contribuem para novas modelagens visando melhores calibrações com redes neurais, considerando que para modelar precisa calibrar, e a calibração foi feita, portanto, sabe-se que existe uma base para início de previsão de cenários sem calibração.

Concluindo-se a metodologia de uso de redes neurais artificiais mostrou-se eficiente na calibração de modelos de redes de distribuição de água reais com disponibilidade de poucos dados de campo. Pois normalmente as combinações de soluções são muito complexas e exigem ferramentas robusta para esta finalidade.

Recomenda-se para futuros trabalhos sobre o tema:

- Realizar trabalho de campo com maior número de pontos analisados com informações de pressão e ou vazão em campo, visando maior validação dos resultados;
- Testar uma variedade maior de tipos de configurações de redes neurais;
- Avaliar novos parâmetros para ajustes, além de demanda e rugosidades.

REFERÊNCIAS

- ABE, N. **Proposição de Calibração de Redes de Sistemas de Abastecimento de Água Através de Método Híbrido**. Tese (Doutorado) Engenharia Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2014.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual**. Brasília: ANA, 2018.
- ARANDIA, E.; ECK, B. J. An R package for EPANET simulations. **Environmental Modelling and Software**, v. 107, 2018.
- ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente**. Tese (Doutorado) Engenharia Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público: Procedimento**. Rio de Janeiro, 2017.
- BARBEDO, M. D.G. **Estudos de calibração de redes de distribuição de água utilizando o acoplamento do software R e Epanet**. Universidade Federal de Itajubá, 2022.
- BOCZAR, T., et al. **Calibration of parameters of water supply network model using genetic algorithm**. In: E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2017.
- BRASIL. Fundação Nacional da Saúde. **Manual de Saneamento**. Brasília: Funasa, 2015.
- BRASIL. Fundação Nacional da Saúde. **Redução de perdas em sistemas de abastecimento de água**. Ministério da Saúde. 2 ed. Brasília: 2014.
- BRASIL. **Informações e indicadores agregados**. Brasília: SNIS, 2019.
- BRASIL. **Lei nº 12.862/2013, de 17 de setembro de 2013**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Poder executivo, Brasília, DF, 19 set. 2013. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/112862.htm>. Acesso em: 15 jun. 2021.
- BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto**. Brasília: SNIS, 2021.
- COPASA – COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS. **Programa de redução de perdas de água no sistema de distribuição**. Belo Horizonte, 2003.
- DÍAZ, S., et al. **Calibration via multi-period state estimation in water distribution systems**. Water Resources Management, v. 31, n. 15, p. 4801-4819, 2017.
- DIUANA, F. A; OGAWA, S. C. C. P. **Análise comparativa dos modelos hidráulicos EPANET, WaterCAD e sistema UFC para sistemas de abastecimento de água – Rede de distribuição**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) Rio de Janeiro (RJ) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

ECK, B. J. **An R package for reading EPANET files**. Environmental Modelling & Software, v. 84, 2016.

FERDOWSI, A., *et al.* **Multi-objective Optimization Approaches for Design, Planning, and Management of Water Resource Systems**. Essential Tools for Water Resources Analysis, Planning, and Management. Springer Water. Springer, Singapore. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4295-8_11> Acesso em: 15 set. 2022.

FERREIRA FILHO, R. A. **Mudanças climáticas e o acesso à água e esgotamento sanitário: desafios e oportunidades para os Estados do Ceará e São Paulo, Brasil**. 2020. Mestrado Profissionalizante – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/D.6.2020.tde-19012021-142533>>. Acesso em: 10 fev. 2022.

FREITAS, R.; *et al.* **Document details - WDNs calibration using k-means algorithm for pipes clustering and a hybrid model for optimization**. Laboratory of Computational Hydraulics, University of Campinas, Campinas - SP, Brazil. 2017. Conference on Computing and Control for the Water Industry. The Diamond, University of Sheffield. Sheffield, United Kingdom. 2017. Disponível em: <<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85091573925&origin=inward&txGid=71aa2ed74770a86d7d1e39027bbb5271>>. Acesso em: 24 set. 2022.

FREITAS, R.; *et al.* **Dynamic clustering and a hybrid optimization for roughness calibration in water distribution model**. International Joint Conference in Water Distribution Systems Analysis and Computing and Control in the Water Industry. Queen's University Kingston, Canada. 2018. Disponível em: <<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85093879240&origin=inward&txGid=12e247bcc0999e28dd5470c257435f79>>. Acesso em: 15 set. 2022.

GAMEIRO, P. C. R. **Calibração Hidráulica de Modelos de Sistemas de Distribuição de Água. Aplicação ao Sistema de Distribuição de Água do Reservatório de Brielas**. Dissertação (Mestrado) Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Pública em Lisboa, Portugal, 2014.

GONÇALVES, J. P., *et al.* **Operational strategies aiming at the water and energy sustainability of simulation and sizing of water supply networks**. Research Society and Development. v.10. n.13. 2021. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/21315>>. Acesso em: 8 dec. 2022.

GOULART, T.D.C. **Estudos de Aprimoramento de Algoritmo de Calibração e Aplicação em Rede de Distribuição de Água de Cambuí (MG)**. Dissertação (Mestrado) Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1424/dissertacao_0036252.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 ago. 2022.

GUANGTAO, Fu., *et al.* **The role of deep learning in urban water management: A critical review**. Water Research, volume 223, 2022, 118973. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118973>>. Acesso em: 15 set. 2022.

LAMBERT, A; MYERS, S; TROW, S. **Managing Water Leakage: economic and technical issues**. London: Financial Times Energy, 1998. 162 p.

LIMA, G. M.; *et al.* **Metamodel for nodal pressure estimation at near real-time in water distribution systems using artificial neural networks.** Vol. 20, Issue 2. p. 486-496. 2018. School of Civil Engineering, Architecture and Urban Design, Department of Water Resources, University of Campinas-Unicamp-BR, Campinas, Brazil. Disponível em: <<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85045313412&doi=10.2166%2fhydro.2017.036&origin=inward&txGid=63af121bfc75deaf0654387965d2a65c>>. Acesso em: 15 set. 2022.

MARCONDES, M. C. **Avaliação do Sistema de Abastecimento de água no Município de Delfim Moreira - MG.** Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil. Centro Universitário de Itajubá – FEPI. Itajubá, 2019, 53p.

MARENGO, J. A. **Água e mudanças climáticas. Estudos Avançados.** 2008, v. 22, n. 63. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200006>>. Acesso em: 22 out. 2021.

MEIRELLES, G., *et al.* **Calibration Model for Water Distribution Network Using Pressures Estimated by Artificial Neural Network.** Water Resour Manage 31, pp. 4339-4351. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-017-1750-2>>. Acesso em: 24 set. 2022.

MINAEE, R. P., *et al.* **Calibration of water quality model for distribution networks using genetic algorithm, particle swarm optimization, and hybrid methods.** MethodsX, v. 6, p. 540-548, 2019.

MOTTA, R.G. **Importância da setorização adequada para combate às perdas reais de água de abastecimento público.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2010.

MOURA, G. N. P. **A Relação Entre Água e Energia: Gestão Energética nos Sistemas de Abastecimento de Água das Companhias de Saneamento Básico do Brasil.** Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%20C3%A7%C3%B5es/mestrado/Gustavo_Nikolaus_Pinto_de_Moura.pdf>. Acesso em: 22 out. 2021.

PACCHIN, E., *et al.* **Uma comparação de Modelos de Previsão de Demanda de Água a Curto Prazo. Gerenciamento de recursos hídricos** 33, pp. 1481-1497. (2019). Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-019-02213-y>>. Acesso em: 15 set. 2022.

PALO, P. R. **Avaliação da eficácia de modelos de simulação hidráulica na obtenção de informações para diagnóstico de perdas de água.** 2010. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-27092010-104217/publico/Dissertacao_PRP.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2022.

PERTEL, M. **Experimentos Hidráulicos Conjugados ao Uso de Indicadores de Desempenho Aplicados à Quantificação de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água no Brasil.** Tese Doutorado. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2014. p. 148-164. Disponível em: <https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=154211>. Acesso em: 12 ago. 2022.

PILLOT, J. *et al.* **Up to what point is loss reduction environmentally friendly?: The LCA of loss reduction scenarios in drinking water networks.** Water Research. V.104, p:231-241, nov. 2014.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**, 4^a ed., São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo 519 p., 2006.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2.0 Manual do Usuário.** PROCEL SANEAR. Traduzido e adaptado por Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba, Brasil, 2009. Disponível em: <http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/documentos/programa-epanet/manual_do_epanet_brasil.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2022.

SANTOS, A.C.N. **Estudo de Calibração de uma rede de Distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos.** Dissertação (Mestrado) Meio Ambiente e Recursos Hídricos– Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

SANTOS, D. D; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Avaliação da metodologia para controle de perdas de água em rede de distribuição no Recife-PE.** Revista DAE, v. 197, p. 56-70, 2014. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_197_n_1571.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2022.

SANTOS, J. **Estudo de Modelo de Calibração para ajuste de parâmetros de rugosidade, demanda e vazamento visando eficiência hídrica e energética em redes de abastecimento de água. Estudo de caso em São Lourenço – MG.** Dissertação (Mestrado) Engenharia de Energia. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

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

SILVA, C. O. da. **Modelagem de Rede de Distribuição de Água com Ênfase no controle de Perdas.** 113 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5527?locale=pt_BR>. Acesso em: 11 fev. 2022.

SILVA, F. G. B. **Estudos de calibração de redes de Distribuição de água através de Algoritmos Genéticos** – Tese de Doutorado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, 2003.

SILVA, F. G. B.; VALADAO, M. N.; BARROS, R. M. **Simulação hidráulica de redes de abastecimento de água com o uso do EPANET 2.0 Aplicação em setores de Itajubá-MG** In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro Oeste, 2007, Cuiabá. Anais do 24 brasileiro de engenharia sanitária e ambiental. 2007. Disponível em: <https://www.academia.edu/30035030/Simula%C3%A7%C3%A3o_Hidr%C3%A1ulica_De_Redes_De_Abastecimento_De_%C3%81gua_Com_O_Uso_Do_Epanet_2.0__Aplica%C3%A7%C3%A3o_Em_Setores_De_Itajub%C3%A1_-_M.G>. Acesso em: 15 mai. 2022.

SILVA, J. P. O.; MONTE-MOR, R. C. A. **Avaliação dos Impactos Econômicos do Novo Sistema de Captação de Água para Abastecimento Público da Sede do Município de Governador Valadares-MG.** Revista Brasileira de Geografia Física. v.15, n.03, 2022.

Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/252563>>. Acesso em: 11 fev. 2022.

SILVINO, I. R. **Eficiência energética em sistemas pressurizados de distribuição de água com o uso de redes neurais artificiais**. Tese de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba. Centro de Tecnologia – João Pessoa, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/12957/1/Arquivototal.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2022.

SNIS – SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÃO AMBIENTAL. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto. Visão Geral, ano de referência 2020**. Ministério do Desenvolvimento Regional Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Brasília, 2021.

SOARES, A. K. **Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório**. Tese (Doutorado) Engenharia Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.

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

TARDELLI FILHO, J. **Controle e redução de perdas**. In: TSUTIYA, M. T. (Ed.). Abastecimento de água. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. p. 643. 2006. Disponível em: <<https://pdfcoffee.com/abastecimento-de-agua-tsutiya-4-pdf-free.html>>. Acesso em: 11 fev. 2022.

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

XUAN, Hu., *et al.* **Novel leakage detection and water loss management of urban water supply network using multiscale neural networks**. Journal of Cleaner Production, volume 278, 2021, 123611. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123611>>. Acesso em: 15 set. 2022.

ZANCA, R. B.; *et al.* **Modeling and hydraulic performance evaluation of a dripper device coupled to a branched water distribution network**. Revista Ambiente & Água, Taubaté, v. 14, n. 3, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/SkDVdqDFstVzmrrVskwjSwK/?lang=en>>. Acesso em: 11 fev. 2022.

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

ANEXOS

ANEXO A – INFORMAÇÕES DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Nó inicial	Nó Final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Material	Dispositivo no trecho?
15	8	80	150	PVC	Não
8	11	40	50	PVC	Não
8	12	47	100	PVC	Não
12	13	65	50	PVC	Não
13	14	68	50	PVC	Não
22	12	60	100	PVC	Não
23	8	46	150	PVC	Não
23	24	39	50	PVC	Não
25	22	38	50	PVC	Não
26	9	98	50	PVC	Não
27	22	92	100	PVC	Não
27	28	52	100	PVC	Não
28	29	23	50	PVC	Não
10	9	78	150	PVC	Não
32	33	121	50	PVC	Não
34	29	61	50	PVC	Não
31	36	57	50	PVC	Não
37	36	37	50	PVC	Não
36	35	73	50	PVC	Não
31	28	178	100	PVC	Não
31	33	170	50	PVC	Não
31	38	80	100	PVC	Não
38	39	125	100	PVC	Não
38	40	63	50	PVC	Não
4	48	138	50	PVC	Não
18	17	115	50	PVC	Não
48	49	186	50	PVC	Não
48	19	482	50	PVC	Não
17	19	112	50	PVC	Não
52	53	37	50	PVC	Não
55	53	83	50	PVC	Não
54	53	78	50	PVC	Não
52	51	55	50	PVC	Não
55	58	38	50	PVC	Não
57	58	70	50	PVC	Não
56	57	124	50	PVC	Não
17	16	262	50	PVC	Não

Nó inicial	Nó Final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Material	Dispositivo no trecho?
65	66	15	50	PVC	Não
67	66	66,47	50	PVC	Não
67	68	20	50	PVC	Não
59	60	426	50	PVC	Não
23	70	410	50	PVC	Não
70	74	255	50	PVC	Não
71	72	20	50	PVC	Não
72	73	100	50	PVC	Não
69	10	228	50	PVC	Não
72	76	304	50	PVC	Não
75	76	92	50	PVC	Não
75	52	78	50	PVC	Não
17	55	409	50	PVC	Não
76	78	150	75	PVC	Não
75	79	59	50	PVC	Não
83	82	33,8	50	PVC	Não
84	82	34	50	PVC	Não
83	81	60	50	PVC	Não
80	33	80	50	PVC	Não
40	85	118,5	50	PVC	Não
85	82	162	50	PVC	Não
89	85	60	50	PVC	Não
44	45	189	50	PVC	Não
46	45	166	50	PVC	Não
46	47	221	50	PVC	Não
44	90	180	50	PVC	Não
90	88	104	50	PVC	Não
88	91	130	50	PVC	Não
92	39	165	50	PVC	Não
39	41	115	100	PVC	Não
93	44	131	100	PVC	Não
93	94	70	50	PVC	Não
93	41	56	100	PVC	Não
94	96	83	50	PVC	Não
97	96	242	50	PVC	Não
43	100	240	100	PVC	Não
42	21	400	100	PVC	Não
99	101	50	50	PVC	Não
103	101	34	50	PVC	Não

Nó inicial	Nó Final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Material	Dispositivo no trecho?
104	99	86	50	PVC	Não
98	20	136	50	PVC	Não
20	105	110	50	PVC	Não
105	43	251	50	PVC	Não
43	106	22	100	PVC	Não
106	44	65	100	PVC	Não
106	94	200	50	PVC	Não
101	102	123	50	PVC	Não
20	99	77	50	PVC	Não
40	86	226,5	50	PVC	Não
39	87	147	50	PVC	Não
107	61	317	50	PVC	Não
107	68	10	50	PVC	Não
107	64	116	50	PVC	Não
107	62	145	50	PVC	Não
62	60	265	50	PVC	Não
62	63	223	50	PVC	Não
7	108	415	50	PVC	Não
108	16	1278	50	PVC	Não
1	15	5	150	PVC	Não
41	95	320	50	PVC	Não
6	45	121	50	PVC	Não
16	3	300	50	PVC	Não
4	50	300	50	PVC	Não
3	2	300	100	PVC	Não
6	47	125	100	PVC	Não
71	109	550	100	PVC	Não
109	110	60	50	PVC	Não
110	50	40	50	PVC	Não
29	5	50	50	PVC	Não
30	5	53	50	PVC	Não
5	77	100	50	PVC	Não
23	111	70	150	PVC	Não
9	111	70	150	PVC	Não
2	112	660	50	PVC	Não
112	59	600	50	PVC	Não
113	42	408	150	PVC	Não
7	113	300	150	PVC	Não
83	114	100	50	PVC	Não

Nó inicial	Nó Final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Material	Dispositivo no trecho?
114	67	53	50	PVC	Não
10	115	67	150	PVC	Não
7	115	50	150	PVC	Não
70	116	150	50	PVC	Não
71	116	42	50	PVC	Não

ANEXO B – DADOS DE DEMANDA PARA CALIBRAÇÃO

Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)	Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)
2	1186	0,17	43	1207,6	0,17
5	1215	0,17	44	1212,24	0,17
7	1207,8	0,17	45	1212	0,17
8	1242	0,17	46	1219,35	0,17
9	1215	0,17	47	1212	0,17
10	1206,39	0,17	48	1257,37	0,17
11	1248	0,17	49	1253,23	0,17
12	1244,96	0,17	50	1195	0,17
13	1250	0,17	51	1200,44	0,17
14	1262	0,17	52	1195,05	0,17
15	1270	0,17	53	1194,23	0,17
16	1170	0,17	54	1202	0,17
17	1190,51	0,17	55	1196	0,17
18	1193,15	0,17	56	1195	0,17
19	1214,96	0,17	57	1194	0,17
20	1213,92	0,17	58	1195	0,17
21	1217,72	0,17	59	1193	0,17
22	1234,43	0,17	60	1204,39	0,17
23	1236,05	0,17	61	1204,26	0,17
24	1234,43	0,17	62	1207,71	0,17
25	1236	0,17	63	1220,53	0,17
26	1217048	0,17	64	1215,19	0,17
27	1220	0,17	65	1216,72	0,17
28	1219	0,17	66	1210	0,17
29	1217	0,17	67	1208	0,17
30	1215	0,17	68	1208,37	0,17
31	1209,54	0,17	69	1203	0,17
32	1206,39	0,17	70	1215,8	0,17
33	1208,42	0,17	71	1206,42	0,17
34	1210	0,17	72	1208	0,07
35	1220,49	0,17	73	1208,8	0,04
36	1214,98	0,17	74	1225,2	0,05
37	1209,95	0,17	75	1198,09	0,17
38	1209,55	0,17	76	1203,99	0,07
39	1208,97	0,17	77	1200	0,17
40	1203,64	0,17	78	1208,48	0,02
41	1209,89	0,17	79	1202,6	0,17
42	1212,35	0,17	80	1204,07	0,17

Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)
81	1204,07	0,17
82	1207,62	0,17
83	1207	0,17
84	1220	0,17
85	1208,56	0,17
86	1211	0,17
87	1222,18	0,17
88	1217,43	0,17
89	1209	0,17
90	1209,89	0,17
91	1238,46	0,17
92	1211	0,17
93	1210,58	0,17
94	1206,34	0,17
95	1209,54	0,17
96	1212,31	0,17
97	1210	0,17
98	1215,6	0,17
99	1210,74	0,17

Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)
100	1215,72	0,17
101	1210	0,17
102	1209,52	0,17
103	1211,21	0,17
104	1210	0,17
105	1215,72	0,17
106	1208,2	0,17
107	1208,37	0,17
108	1204,39	0,17
109	1175	0,17
110	1183	0,17
111	1222	0,17
112	1173	0,17
113	1209	0,51
114	1208	0,51
115	1204	0,51
116	1206,46	0,8

ANEXO B – DADOS DE DEMANDA APÓS A CALIBRAÇÃO (REDES NEURAIIS)

Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)	Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)
2	1186	-1,81	43	1207,6	1,67
5	1215	-10,65	44	1212,24	0,2
7	1207,8	-15,8	45	1212	0,18
8	1242	-33,16	46	1219,35	0,09
9	1215	-18,6	47	1212	-0,71
10	1206,39	-3,1	48	1257,37	0,04
11	1248	-5,95	49	1253,23	0,18
12	1244,96	-0,92	50	1195	0,17
13	1250	-0,15	51	1200,44	0,18
14	1262	-0,9	52	1195,05	0,18
15	1270	0,1	53	1194,23	0,17
16	1170	-5,87	54	1202	0,07
17	1190,51	-0,25	55	1196	0,17
18	1193,15	7,77	56	1195	0,18
19	1214,96	0,18	57	1194	0,18
20	1213,92	-0,46	58	1195	-4,57
21	1217,72	-1,27	59	1193	5,21
22	1234,43	-28,27	60	1204,39	0,28
23	1236,05	-4,69	61	1204,26	-13,54
24	1234,43	-0,43	62	1207,71	4,29
25	1236	-3,01	63	1220,53	0,44
26	1217048	-0,04	64	1215,19	0,02
27	1220	-0,84	65	1216,72	0,05
28	1219	-10,11	66	1210	0,57
29	1217	-12,38	67	1208	2,15
30	1215	0,23	68	1208,37	-1,05
31	1209,54	0,17	69	1203	-0,2
32	1206,39	0,18	70	1215,8	0,17
33	1208,42	-0,78	71	1206,42	0,06
34	1210	0,18	72	1208	0,03
35	1220,49	0,19	73	1208,8	-0,08
36	1214,98	0,19	74	1225,2	0,18
37	1209,95	0,19	75	1198,09	0,05
38	1209,55	0,18	76	1203,99	0,04
39	1208,97	0,2	77	1200	0,17
40	1203,64	0,25	78	1208,48	0,17
41	1209,89	-3,07	79	1202,6	0,17
42	1212,35	0,68	80	1204,07	0,19

Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)
81	1204,07	0,2
82	1207,62	0,18
83	1207	0,19
84	1220	0,17
85	1208,56	0,16
86	1211	-4,49
87	1222,18	0,17
88	1217,43	-2,52
89	1209	3,89
90	1209,89	0,16
91	1238,46	0,45
92	1211	0,2
93	1210,58	0,15
94	1206,34	0,15
95	1209,54	0,17
96	1212,31	0,17
97	1210	0,18
98	1215,6	0,47

Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)
99	1210,74	0,17
100	1215,72	0,17
101	1210	0,17
102	1209,52	0,17
103	1211,21	0,17
104	1210	0,85
105	1215,72	4,04
106	1208,2	0,14
107	1208,37	0,19
108	1204,39	0,18
109	1175	34,02
110	1183	-8,88
111	1222	175,14
112	1173	6,25
113	1209	-5,37
114	1208	0,5
115	1204	-12,68
116	1206,46	0,81