

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E A TRANSFORMAÇÃO
DIGITAL: IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS E LACUNAS COM
APOIO EM ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA**

LIGIA LULAI FERREIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dra. Cali Laguna Achon

São Carlos

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Lígia Lulai Ferreira, realizada em 02/08/2022.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Cali Laguna Achon (UFSCar)

Prof. Dr. Erich Kellner (UFSCar)

Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior (UNICAMP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**



Agradecimentos

À professora e orientadora, Cali, com quem tive a alegria de cursar uma disciplina da graduação mais de uma década atrás, e, agora, ter sua orientação no desenvolvimento do mestrado. Agradeço a paciência, compreensão e amizade ao longo destes mais de 2 anos. Aos colegas do PPGEU, pela amizade e apoio, mesmo que à distância, neste contexto de pandemia.

Àqueles queridos companheiros com quem iniciei a jornada no saneamento e modelagem hidráulica, em especial: Érica Kamimura, Mariana Bastos, Caroline Kimie, Camila Lisboa, Maria Cecília Gontijo, Tayná Lucatti, Ana Carolina Porto e demais amigos com quem sigo compartilhando a trajetória. É muito gratificante poder trocar experiências e impressões com vocês.

À minha irmã do coração, Mayara, pelos puxões de orelha, pela parceria, pela presença, pela amizade e pelo exemplo de força e perseverança.

Aos meus pais e família, pelas oportunidades de convivência, pelo apoio nos diferentes momentos da minha vida. Ao meu irmão por ser um grande incentivador da leitura, tendo me ensinado esse hábito desde a tenra idade, hábito esse que foi tão útil ao desenvolvimento deste trabalho. Ao meu tio e padrinho, Ricardo, pelo incentivo. Aos meus sogros e cunhados, por serem também minha família.

Em especial, ao meu agora esposo, Victor, que é meu porto seguro, meu melhor amigo, e cujo suporte permitiu que eu abdicasse de diversas tarefas cotidianas para que pudesse focar esforço e energia no desenvolvimento deste e de meu trabalho profissional. Nada do que eu possa escrever poderia refletir a gratidão por podermos compartilhar a vida.

A Deus e ao amado mestre e amigo, Jesus, cujos exemplos seguem inspirando e amparando nos momentos mais desafiadores.

Ao parar para escrever estes agradecimentos, reconheço o valor dos vínculos criados, da cooperação, e vejo como se expande para muito além de nós tudo aquilo que nos construiu e que direciona, a cada dia, nossos caminhos. Obrigada a tantos que estão envolvidos nesse caminho que escolhi trilhar.

“Anda-se lado a lado muito tempo, cada um fechado em seu silêncio, ou trocando palavras que não encerram nada. Mas eis a hora do perigo. Então vem a ajuda mútua. Descobre-se que se pertence à mesma comunidade. Cada um se enriquece com a descoberta de outras consciências. Então os homens se olham com um grande sorriso. E parecem prisioneiros libertados que se maravilham com a imensidão do mar.” Saint-Exupery (1943) – Terra dos Homens

RESUMO

Devido ao caráter dinâmico dos sistemas de distribuição de água, recomenda-se que seu gerenciamento operacional seja apoiado em modelagem hidráulica, a qual é preconizada pela ABNT NBR 12.218/2017 como instrumento de planejamento e operação. Modelos hidráulicos são ferramentas capazes de representar em simulações o comportamento do sistema, conforme sua configuração física, lógica e topológica, possibilitando analisar suas condições atuais e fazer previsões. Para se atingir o fim de gerenciamento operacional apoiado em modelagem, e não só a aplicação pontual de modelos para análises específicas, a qualidade do cadastro de ativos, recursos de monitoramento em tempo real, análise de dados, modelos de previsão e de detecção de anomalias se mostram cada vez mais relevantes. Dados a NBR 12.218, o decreto nº 9.9.83, de 2019, que coloca como meta a implementação do Building Information Modeling (BIM) para obras e serviços de engenharia, e o decreto nº 10.306, que prevê, a partir de 2028, o seu uso para fins de operação e manutenção dos empreendimentos, almejou-se investigar as relações entre essas ferramentas no contexto da transformação digital do saneamento com foco em redes de distribuição de água. Para tanto, foi conduzida uma revisão bibliométrica de literatura embasada em três eixos de pesquisa e agregando 114 artigos: 1) Modelagem hidráulica e gerenciamento operacional; 2) Modelos de informação e redes de distribuição; 3) *Smart water* e conceitos correlatos. Dentre os principais resultados, observou-se que, entre 2015 e 2016, o foco das pesquisas começa a migrar de assuntos mais voltados a modelagem hidráulica e métodos de calibração para abordagens mais dinâmicas, com monitoramento em tempo real, segurança cibernética e *smart water*, evidenciando-se grande interesse em medição inteligente e uso de tecnologias de Internet das Coisas. Notou-se prevalência de estudos voltados a soluções técnicas abordando sistemas *benchmark*, considerando sistemas já calibrados e com parâmetros hidráulicos bem conhecidos, e um distanciamento da pesquisa em relação às necessidades práticas de prestadores de serviços, como casos de negócio evidenciando as vantagens e oportunidades de retorno de investimentos em tecnologias digitais.

Palavras-chave: Modelagem hidráulica, *smart water*, information model, BIM

ABSTRACT

Due to the dynamic nature of water distribution systems, their operational management ideally should be supported by hydraulic modeling, which is recommended by ABNT NBR 12.218/2017 as a planning and operation instrument. Hydraulic models are tools capable of representing in simulations the behavior of the system, according to its physical, logical and topological configuration, making it possible to analyze its current conditions and make predictions. In order to achieve the purpose of operational management supported by modeling, instead of only using it as punctual applications for specific analysis, the quality of the asset register, real-time monitoring capabilities, data analysis, forecasting and anomaly detection models are increasingly relevant. Given NBR 12.218; Decree No. 9.9.83, of 2019, which sets as a goal the implementation of Building Information Modeling (BIM) for engineering works and services; and Decree No. 10.306 which determines BIM be applied to building's operations and management as far year 2028, the objective of this research was to investigate the relationships between these tools in the context of the water sector's digital transformation focusing on water distribution networks. Therefore, a literature bibliometric review was conducted based on three research axes, comprising 114 articles: 1) Hydraulic modeling and operational management; 2) Information models and distribution networks; 3) Smart water and related concepts. Among the main results, it was observed that until 2015, the research focus mostly lied on subjects related to hydraulic modeling and calibration methods. From 2016, topics related to more dynamic approaches, such as real-time monitoring, cyber security and smart water started gaining traction, with great interest in smart metering and the use of IoT technologies. There was a prevalence of studies focusing on technical solutions addressing benchmark systems, considering systems already calibrated and with well-known hydraulic parameters, and a gap was found in research relating to the practical needs of service providers, such as business cases evidencing the advantages and opportunities of return on investments in digital technologies.

Key-words: Hydraulic modeling, smart water, information model, BIM

Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxograma da Metodologia adotada na pesquisa	31
Figura 2 - Número e Porcentagem de artigos por eixo, busca inicial	42
Figura 3 – Número e Porcentagem de artigos por eixo, Repositório F.....	42
Figura 4 – Produções acadêmicas nos eixos de pesquisa, ano a ano	43
Figura 5 – Documentos e citações Eixo 1 - modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição.....	45
Figura 6 – Documentos e citações Eixo 2 – Modelos de informação e redes de distribuição	46
Figura 7 - Documentos e citações Eixo 3 – <i>Smart water</i> e conceitos correlatos	47
Figura 8 – Rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 1	47
Figura 9 – Visão temporal da rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 1	48
Figura 10 - Rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 2	48
Figura 11 – Visão temporal da rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 2.....	48
Figura 12 - Rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 3	49
Figura 13 - Visão temporal da rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 3	50
Figura 14 – Rede de co-citações de autores com no mínimo 2 citações, para os resultados do Eixo 1	54
Figura 15 - Rede de co-citações de autores com no mínimo 2 citações, para os resultados do Eixo 2	54

Figura 16 - Rede de co-citações de autores com no mínimo 2 citações, para os resultados do Eixo 3	55
Figura 17 – Co-ocorrência de palavras-chave nos artigos do Eixo 1 - conjuntos	58
Figura 18 – Co-ocorrência de palavras-chave nos artigos do Eixo 2 - conjuntos	59
Figura 19 – Co-ocorrência de palavras-chave nos artigos do Eixo 3 - conjuntos	60
Figura 20 – Quantidade de artigos por tema	61
Figura 21 – Co-ocorrência de palavras-chave de todo o repositório F, até 2015	63
Figura 22 - Co-ocorrência de palavras-chave de todo o repositório F, a partir de 2016	64

Lista de Quadros

Quadro 1 – Eixos de pesquisa e palavras-chave	32
Quadro 2 - Concatenação de busca e quantidade de produções acadêmicas	33
Quadro 3 – Palavras-chave que embasaram as buscas.....	34
Quadro 4 – Artigos encontrados na Web of Science para um autor específico	34
Quadro 5 - Repositório A – artigos selecionados por alinhamento de título	36
Quadro 6 – Total de citações na amostra inicial, 80% das citações e mínimo de citações por artigo pertencente aos 80%	37
Quadro 7 - Repositório B – artigos selecionados por reconhecimento científico	37
Quadro 8 - Documentos do repositório A menos citados, a serem reavaliados.....	37
Quadro 9 - Repositório R – artigos recentes	38
Quadro 10 - Repositório R – artigos com autores em comum com os do Repositório B	38
Quadro 11 - Repositório C = B + R	38
Quadro 12 – Repositório Final (F)	39
Quadro 13 – Resumo das fases de seleção de artigos segundo metodologia proposta	41
Quadro 14 – Quantitativo de produções acadêmicas ano a ano	43
Quadro 15 – Produções acadêmicas por país – Eixo 1	44
Quadro 16 - Produções acadêmicas por país – Eixo 2	45
Quadro 17 - Produções acadêmicas por país – Eixo 3	46
Quadro 18 – Análise de co-autoria – Citações recebidas – Eixo 1	50
Quadro 19 – Análise de co-autoria – Citações recebidas – Eixo 2	51



Quadro 20 – Análise de co-autoria – Citações recebidas – Eixo 3	51
Quadro 21 – Análise de co-citações - Autores citados pelos artigos do Eixo 1	52
Quadro 22 - Análise de co-citações – Autores citados pelos artigos do Eixo 2	52
Quadro 23 - Análise de co-citações – Autores citados pelos artigos do Eixo 3	53
Quadro 24 – Periódicos dos artigos mais citados nas referências do Eixo 1	55
Quadro 25 – Artigos mais citados no Eixo 1	55
Quadro 26 – Periódicos dos artigos mais citados nas referências do Eixo 2	56
Quadro 27 – Artigos mais citados no Eixo 2	56
Quadro 28 – Periódicos dos artigos mais citados nas referências do Eixo 3	57
Quadro 29 – Artigos mais citados no Eixo 3	57
Quadro 30 – Compilação de temáticas centrais dos artigos de todos os eixos de busca	62

Sumário

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE QUADROS	X
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Modelagem hidráulica.....	16
3.2 Gestão operacional apoiada por modelagem hidráulica.....	18
3.3 Conceituação de BIM.....	20
3.4 Transformação digital	28
4. METODOLOGIA	30
4.1 Passo 1 – Seleção do portfólio bibliográfico.....	31
4.2 Passo 2 – Análise bibliométrica do portfólio	39
5. RESULTADOS	41
5.1 Bibliometria descritiva	42
5.2 Temáticas centrais	60
5.3 Discussão sobre os temas	87
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
7. RECOMENDAÇÕES	96
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

1. Introdução

Em todas as etapas do Sistema de Abastecimento de Água (SAA) há diferentes demandas em termos de operação e manutenção. Particularmente, no caso das aduções e redes de distribuição, trata-se de um sistema dinâmico que responde diretamente às demandas e lógica de operação de reservatórios, estações elevatórias, válvulas e equipamentos eletromecânicos. Há, portanto, além da necessidade comum de manutenção, a necessidade do controle operacional.

Após a atualização da ABNT NBR 12.218, em 2017, tornou-se recomendação, no âmbito do projeto e operação das redes de distribuição de água, o uso da modelagem hidráulica. A modelagem hidráulica é uma ferramenta capaz de agregar informações topológicas georreferenciadas e atributos físicos e lógicos aos elementos componentes do sistema, visando refletir, em simulações, o funcionamento real do sistema bem como prever comportamentos decorrentes de alterações de demandas e perdas, operação de equipamentos, expansão de redes e outros. Possibilita a análise de múltiplas alternativas e, portanto, atua também como um instrumento de planejamento e tomada de decisão.

Em 17 de maio de 2018 foi instituído no Brasil o Decreto nº 9.377, que versava sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do BIM, também chamada de Estratégia BIM BR; esse decreto foi revisado e substituído pelo de nº 9.983, de 22 de agosto de 2019, que “dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling”. Já em 2020, no dia 2 de abril, um novo decreto foi lançado sob o nº 10.306, dessa vez instituindo a utilização do BIM na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal.

No decreto 10.306 estão previstas fases de implementação do BIM, partindo-se do uso para elaboração de projetos e definição de quantitativos, avançando para a execução, orçamentação, controle de obras e geração de *as built* e, em um momento final, prevendo a aplicação do BIM para operação e manutenção do empreendimento.

Embora no decreto não esteja clara a intenção ou obrigatoriedade de aplicação do BIM ao contexto de infraestruturas horizontais de saneamento, como redes de distribuição de água,

nota-se crescente interesse acerca do assunto, que se desdobra e se mescla com termos como “transformação digital”, “água 4.0”, “*smart water*” e “gêmeos digitais”. Surge, assim, a oportunidade de investigação acerca da relação entre modelagem hidráulica, modelos de informação, como BIM, e o avanço das pesquisas voltadas a essas temáticas.

2. Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é identificar a relação entre modelagem hidráulica, BIM e transformação digital no contexto do gerenciamento de redes de distribuição de água potável, analisando os avanços nessas temáticas através de revisão bibliométrica de literatura.

Os objetivos específicos relacionam-se aos eixos de pesquisa adotados na revisão, consistindo em:

- Investigar as finalidades para as quais a modelagem hidráulica de redes de distribuição de água tem sido utilizada, e a quais ferramentas tem sido vinculada;
- Investigar a hipótese de que o uso de BIM ainda não está consolidado no contexto de gerenciamento operacional de redes de distribuição de água;
- Investigar a que remetem os termos “*smart water*” e correlatos, e identificar sua relação com o gerenciamento operacional de redes de distribuição de água.

3. Fundamentação teórica

3.1 Modelagem hidráulica

As redes de distribuição de água são responsáveis por garantir que esse recurso chegue em quantidade e qualidade adequadas ao usuário final, seja em circunstâncias normais de consumo e disponibilidade hídrica, seja em eventos extremos, como controle de incêndios (BERARDI; GIUSTOLISI, 2021; GILBERT *et al.*, 2021). Modelos hidráulico foram inicialmente desenvolvidos para fins de planejamento de novos sistemas, para averiguação de capacidade hidráulica que garantisse pressões adequadas sob quaisquer circunstâncias (BERARDI; GIUSTOLISI, 2021).

“Modelagem” se refere à criação de uma estrutura matemática ou computacional capaz de representar as características físicas e operacionais de um sistema, com a finalidade de identificar e propor soluções a problemas existentes, possibilitando a melhor tomada de decisões a partir do estudo de alternativas e da comunicação àqueles que necessitam daquela informação (LOUCKS, 1992).

Através de leis de conservação de massa, de energia e de reações cinéticas, modelos de simulação hidráulica e de qualidade da água são as ferramentas mais efetivas para avaliação do comportamento dos sistemas de distribuição de água (BOULOS *et al.*, 2014; ROSSMAN, 2000). Todavia, para que um modelo cumpra seu papel e possa servir como ferramenta de gerenciamento e planejamento, é necessário que este seja calibrado, de modo que represente de forma realista o funcionamento do sistema de abastecimento (WALSKI, 1986). Um modelo calibrado é aquele cujas características físicas, hidráulicas e de carregamento estejam ajustados de modo que os resultados da modelagem convirjam com as observações de campo, normalmente pressões e vazões (SHAMIR; HOWARD, 1977).

Ormsbee (1989) afirma que a acurácia dos dados de entrada é essencial para que um modelo matemático de análise e planejamento de redes de abastecimento de água atinja seu objetivo de representar as condições reais do sistema. Parte dos dados, segundo o autor, é mais facilmente obtível e confiável, enquanto outras, como demandas, rugosidade de tubulações e funcionamento de válvulas são menos evidentes. Com vistas a poder utilizá-lo como ferramenta de suporte à operação, planejamento e eficiência, é necessário calibrar o modelo, ou torná-lo representativo do sistema real sob diversas condições operacionais. Para tanto, algoritmos de

calibração podem ser aplicados, porém, esses têm finalidade de refinamento, portanto, para melhor usufruí-los, o modelo já deve ser suficientemente fiel, sem erros grosseiros que afetem a resposta do modelo, como falta de trechos de rede ou falhas de conectividade.

Assim, observa-se a relevância de se ter cadastros técnicos completos e atualizados, como observado por Coelho (2004) que, em sua pesquisa de *benchmarking* em companhias estaduais de saneamento, concluiu existir uma relação direta entre a eficiência de sistemas cadastrais e as perdas. O tema de redução de perdas, inclusive, é das temáticas mais recorrentes no contexto da distribuição de água, para a qual diferentes métodos de mensuração, detecção e controle têm sido desenvolvidos e testados; todavia, até que o vazamento seja efetivamente encontrado e sanado, as perdas continuam ocorrendo. Dessa forma, o uso de métodos de detecção de vazamentos em conjunto com modelos hidráulicos e medições de campo agiliza o processo, pois permite rastrear discrepâncias entre simulação e realidade, as quais representam indícios de comportamento anormal do sistema (MESEGUER *et al.*, 2014).

Note-se, todavia, que o desenvolvimento de modelos hidráulicos pode inclusive facilitar a identificação de inconsistências cadastrais, conforme observado em Siqueira (2019) em estudo de caso de modelagem hidráulica de uma região do município de Pederneiras/SP, cujo intuito era avaliar os resultados da aplicação de métodos de particionamento de redes. O estudo contemplou o levantamento da topologia do sistema, construção de modelo hidráulico preliminar, definição de pontos de monitoramento de pressão, calibração e, por fim, a proposição de particionamento e comparação entre as soluções encontradas. Destaca-se que, na fase de calibração, foram observadas inconsistências em um dos pontos de pressão modelados em relação à medição em campo, o que levou à conclusão de que a delimitação de setores supostamente conhecida não correspondia à realidade. A partir dos resultados da modelagem hidráulica foi, então, possível identificar a inconsistência cadastral, concluindo-se que o referido ponto era abastecido por outro reservatório, e que, em outro local, existia trecho de rede que não constava da base cadastral do município e que também impactava os resultados de pressão. Tal conclusão demonstra um dos benefícios que a modelagem hidráulica traz quando se considerando as limitações de dados cadastrais e se almejando a busca por uma calibração razoável e não totalmente atrelada ao *as built*, conforme referenciado por Giustolisi e Berardi (2021).

3.2 Gestão operacional apoiada por modelagem hidráulica

A ABNT NBR 12.218, revisada em 2017, indica a relevância do uso da modelagem hidráulica como ferramenta de planejamento e tomada de decisão. Há que se compreender tal indicação com o objetivo de uso continuado, não apenas para cumprimento de uma recomendação normativa, pois, se assim o for, o modelo estará sujeito à obsolescência, haja vista a característica dinâmica dos sistemas de distribuição de água.

No contexto do SAA, Carrijo *et al.* (2004) afirmam que o planejamento operacional requer claras definições do objetivo a ser atendido, a disponibilidade de modelos matemáticos, equipamentos para processar esses modelos e conhecimento do sistema. Conforme Palo (2010), é importante avaliar o comportamento das redes quando submetidas a diferentes condições operacionais, uma vez que as demandas e vazamentos tendem a variar conforme a pressão no sistema; assim, para poder fazer previsões, é necessário um modelo que represente corretamente as leis físicas que regem o escoamento nas tubulações.

O controle de perdas em sistemas de distribuição é alvo frequente de prestadores de serviços de abastecimento público, tendo-se ampliado o uso de modelos hidráulicos para tais fins, tal como observado em Covelli *et al.* (2016), Saldarriaga *et al.* (2016), Sebbagh; Safri; Zobot (2018), Abu-Mahfouz *et al.* (2019), Berardi; Giustolisi (2021). Segundo Berardi e Giustolisi (2021) e Jamieson *et al.* (2007), considerando-se a perspectiva de gestão de recursos, as perdas não representam apenas desperdício de água propriamente, mas também de energia elétrica, produtos químicos e força de trabalho envolvida nos diversos processos pelos quais a água passa antes de ser disponibilizada para consumo, sendo, portanto, representativas do nível de eficiência operacional de um sistema.

Babel *et al.* (2019) apontam que mesmo em localidades com infraestruturas mais desenvolvidas e boas práticas operacionais, a tendência de busca por reduções de perdas se observa, porém, em países em desenvolvimento, onde infraestruturas e práticas obsoletas tendem a ocorrer com maior frequência, o problema é agravado.

Embora trabalhos anteriores com modelos hidráulicos compostos de perdas dependentes de pressão e deterioração de tubos tenham se demonstrado eficazes no planejamento do controle de vazamentos, Berardi; Giustolisi (2021) pontuam a dificuldade de calibração refinada de sistemas de abastecimento de água quando o prestador de serviço está ainda em fase de

planejamento para monitoramento de vazão e pressão, o que torna insuficientes a quantidade e qualidade dos dados disponíveis. Nessas situações, geralmente os dados disponíveis referem-se à topologia da rede (conexões entre tubulações), propriedades dos ativos (diâmetros, materiais, idade da tubulação), dados de consumo baseados na micromedição mensal e registros anuais de macromedição, com eventuais pontos de monitoramento de pressão em locais críticos, como em válvulas redutoras.

Com base nessas considerações, Berardi; Giustolisi (2021), a partir de análise de sistemas reais, desenvolveram uma metodologia para distribuição das perdas ao longo das tubulações, considerando-se dados de medição limitados, e procuraram responder até que ponto as medições de pressão na rede podem auxiliar na distribuição das vazões de perdas, ou, sob outra perspectiva, qual a influência das perdas nas pressões do sistema. Cabe ressaltar que a proposta não deve ser confundida com a calibração do sistema *as built*, mas uma que aproveita as capacidades da modelagem hidráulica para propor medidas operacionais de controle de perdas usando os dados disponíveis, mesmo que limitados.

A proposta de Berardi; Giustolisi (2021) foi avaliar diferentes cenários de distribuição de perdas de acordo com níveis de deterioração de tubulações segundo recomendações de literatura, buscando-se investigar a relação entre a propensão para vazamentos e as características gerais do elemento. Dessa maneira, pode-se analisar o impacto de diferentes quantidades e qualidades de dados disponíveis sobre o sistema em estudo. Concluiu-se que, independentemente do regime de pressões no sistema, o monitoramento de pressão não seria suficiente para distribuir espacialmente as perdas, e o aumento na quantidade de pontos de monitoramento não favoreceria a calibração dos parâmetros considerados na metodologia. Por outro lado, medições de vazão nas fronteiras dos DMC cumpririam essa função. Embora o monitoramento de pressão seja essencial para a validação da rugosidade das tubulações primárias dos DMC, o que inclusive impacta na vazão de perdas, medição de pressão não é o suficiente para a calibração das redes secundárias, uma vez que a distribuição de perdas está associada a movimentos de massa ao longo do sistema, o que não pode ser totalmente rastreado apenas por medição de pressão, demandando medições de vazão também (BERARDI; GIUSTOLISI, 2021).

Creaco *et al.* (2016) desenvolveram a modelagem hidráulica de um distrito do sistema de distribuição de água de Milão, também com o fim de reduzir perdas a partir da redução de

pressões na rede. Os autores evidenciaram a importância da definição de DMC, e de se conhecerem as características desses distritos, como forma de se promover melhor controle operacional e gestão de perdas, a partir do uso de medidores de vazão nas tubulações de entrada e saída desses setores e da comparação entre os históricos de macromedição e micromedição para cálculo dos volumes de água perdidos. A metodologia aplicada, que consistiu na análise da relação entre demanda e vazamentos em função das pressões na rede, otimização de operações de bombas e reservatórios, e análise financeira, demonstrou que o uso da modelagem hidráulica aliada a análises de custos (especialmente do consumo de energia elétrica por bombas) pode gerar benefícios decorrentes do gerenciamento de pressões no sistema e consequente redução em vazão de perdas e mesmo em rupturas de tubulações.

Quando se considera o uso de modelagem hidráulica acompanhada de análise de dados em tempo real, dois benefícios principais são observados: possibilidade de emissão de alertas sobre futuras condições do sistema, potencialmente identificando riscos de falhas; e melhor entendimento sobre as condições operacionais, possibilitando otimizar operações a partir de diferentes estratégias de controle (HUTTON *et al.*, 2014).

O atual desenvolvimento de sensores aumentou a disponibilidade de dados monitorados em tempo real que, se sujeitos à análise de operadores experientes, possibilitam lidar com anomalias no sistema e melhorar sua performance operacional. Este potencial é ampliado quando, além da experiência do operador, esse processo de tomada de decisão é amparado em modelagem hidráulica on line (HUTTON *et al.*, 2014).

3.3 Conceituação de BIM

A CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção), em parceria com o SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), desenvolveu uma coletânea visando à orientação de construtoras e incorporadoras na implantação do *Building Information Modeling* (BIM). Em seu volume 1 são apresentadas variadas definições acerca do tema, sendo uma delas, segundo o *National Institute of Building Standards* – NIBS:

Uma representação digital das características físicas e funcionais de uma instalação e um recurso de compartilhamento de conhecimento que viabiliza a obtenção de informações sobre uma instalação, formando uma base confiável para que decisões sejam tomadas durante todo seu ciclo de vida, definido desde sua concepção até a demolição.

BIM pode então ser entendido como uma plataforma colaborativa onde os dados de um empreendimento ficam contidos, permitindo a interação, armazenamento, troca, consolidação e acesso fácil às informações. Permite que os processos usuais de planejamento, projeto, execução e pós-obra passem a ser realizados com base em modelos, e não mais em documentos apenas. Um modelo BIM trata-se de “representação digital multifuncional das características físicas e funcionais de uma edificação ou instalação”. Comumente o BIM é definido como um modelo 3D, e essa representação frequentemente aparece, porém, outras definições também não especificam a exigência de se ter uma representação 3D; segundo Hjelseth (2010), seria mais apropriado considerá-lo como uma modelagem de informações com a possibilidade de visualização tridimensional.

Modelos digitais que representam apenas a modelagem e visualização gráfica de uma edificação, sem informações além da geometria, não são considerados BIM. As soluções BIM operam como gestoras de bancos de dados, de modo a automatizar alterações e revisões em qualquer parte do modelo, uma vez que os objetos passam a ser paramétricos, ou seja, armazenam diversos tipos de informações, como tipo de material, dimensões, fornecedores, entre outros (SIMÕES, 2013).

Conforme descrito, o uso do BIM visa possibilitar a modelagem de todo o ciclo de vida de uma edificação ou instalação, desde o denominado pré-obra, abrangendo as etapas de concepção, estudos de viabilidade e análises de riscos, até projetos, orçamentos e contratação da etapa de construção.

Além disso, o BIM pode abranger as chamadas dimensões 3D, que trata das dimensões convencionais do espaço; 4D, dizendo respeito à gestão do tempo e planejamento; 5D, previsão de custos; e 6D, gestão de instalações (FERREIRA, 2015). A dimensão 6D trata da operação e manutenção das instalações, dessa forma, podem ser criados modelos BIM com a finalidade de servirem como base de dados e referências para gestão de uso, operação e manutenção de um objeto já construído (FERREIRA, 2015). O catálogo de dados que pode ser agregado aos elementos do modelo, como especificações, manuais de operação e manutenção e garantias é útil ao longo do funcionamento do empreendimento, uma vez que centraliza informações (FERREIRA, 2015).

CBIC (2016) explica que BIM pode ser utilizado como referência de informações para gestão, operação e manutenção da edificação ou instalação, podendo, também, ser desenvolvido

para fins de operação e manutenção, após a construção, como *as built*. Essa abordagem, entretanto, conforme observado pelo levantamento publicado pela *Penn State University*, em 2009, tem sido das menos recorrentes, uma vez que para que se chegue a uma modelagem de pós-construção, todo um esforço de produção do modelo deve ser executado. Corroborando o levantamento publicado por Checcucci (2018), o levantamento da *Penn State University* também aponta utilização mais ampla nas fases de projeto e obra.

Para que o BIM cumpra sua função de armazenar e transmitir informações sobre o objeto ou instalação modelado, é essencial que possa haver comunicação entre diferentes softwares que venham a ser utilizados. Um dos meios de se fazer essa comunicação é pelo uso do IFC (*Industry Foundation Class*), desenvolvido pelo *Building Smart International*. A definição dada no *website* do Building Smart International é a seguinte: “Uma descrição digital padronizada da indústria da construção. É um padrão aberto internacional (ISO 16.739-1/2018) e promove recursos neutros e utilizáveis pelo fornecedor a uma ampla gama de dispositivos de hardware, plataformas de software e interfaces para diversos casos de uso”.

A exportação em IFC permite que os objetos sejam classificados em entidades, que traduzem classes de informações definidas por atributos e restrições comuns. Como exemplo, no caso de tubulações em aduções e redes de distribuição, Zhao *et al* (2019) explicita que, em sua análise, foram utilizadas estruturas espaciais para armazenamento de informações e relações entre segmentos de tubulações, dispositivos reguladores de vazão, reservatórios e conectividade entre os elementos.

3.3.1 BIM e o setor de infraestrutura

Marzouk; Othman (2020) discutem as possibilidades de integração entre BIM e SIG na construção de modelos de cidades inteligentes, considerando como motivadores para tal procedimento a necessidade de melhor controlar o rápido processo de urbanização e o conseqüente aumento na demanda pelos mais variados recursos. Indicam que o BIM tem potencial para ser utilizado nesses processos de planejamento, mas que existe ainda dificuldade de aplicação ao contexto de infraestruturas horizontais, por isso tem sido integrado ao SIG. Os autores referenciam uma revisão sistemática sobre aplicação de BIM, feita em 2014, que identificou apenas 3 artigos contemplando integração entre BIM e SIG, dentre os 135 documentos analisados. Ainda assim, esses não focaram em gestão da cidade ou fizeram

relações com *smart cities*. Outro estudo conduzido em 2014 levou a conclusões semelhantes e, em 2016, uma nova revisão trouxe indícios de crescimento no interesse pelo campo.

Marzouk; Othman (2020) desenvolveram uma *framework* genérica para integrar BIM e SIG de modo a possibilitar o planejamento e previsão para infraestruturas críticas (água, esgoto e energia elétrica), considerando diferentes cenários de desenvolvimento e uso do solo na cidade, e podendo ser replicável a outros municípios. Utilizam-se BIM 4D e SIG, sendo o ambiente dividido entre ambiente BIM, ambiente SIG e ambiente externo, esse último tratando de plataformas diferentes das duas primeiras. A *framework* foi aplicada a um estudo de caso em um distrito na cidade de Novo Cairo, considerando os códigos nacionais sobre padrões de consumo de água, geração de esgoto e consumo de energia elétrica, e levando em consideração tipos de ocupação atual e máxima, e taxa de habitante por unidade. O período de análise foi para 24 anos, tendo sido simulados 4 cenários diferentes e obtidas as informações sobre previsão de demandas sobre os três recursos analisados.

Ma; Ren (2017) desenvolveram uma revisão sistemática sobre a integração entre BIM e SIG, buscando compreender a expansão do uso de BIM considerando-se o contexto de infraestrutura, suas aplicações e plataformas, bem como lacunas de pesquisa. Primeiramente, foi feita uma conceituação sobre *Smart Cities*, como uma forma de gerenciar ativos urbanos a partir da integração de diferentes tecnologias de comunicação (ICT) e Internet das Coisas, o que pode se dar com o uso de BIM para armazenamento e gerenciamento de informações “localizadas”, e de SIG para as informações que descrevem o ambiente e serviços urbanos, “horizontais”.

A revisão conduzida por Ma; Ren (2017) tratou da integração entre essas duas ferramentas, com foco em “objeto de aplicação”, “fase de aplicação”, “padrão de aplicação” e “plataforma”, tendo sido analisados 41 artigos. Em termos de “objeto de aplicação”, notou-se prevalência de edificações e uma presença secundária de infraestruturas. Em “fase de aplicação”, novamente se observou maior ênfase em edificações e nas fases de P&D (planejamento e design) e O&M (operação e manutenção); quanto a infraestrutura, a fase de construção foi a principal. Em “padrão de aplicação”, o mais comum foi a extração de dados de BIM para SIG e de ambos os sistemas para um terceiro sistema (podendo ser, também, extração de SIG para BIM). Finalmente, quanto a plataformas, ArcGIS foi o mais citado, seguido por Revit.

Ainda segundo os autores, pôde-se concluir que no campo de infraestrutura, o uso mais comum da integração das ferramentas foi associado a projetos de movimentação de terra para obras viárias, e também gestão de conflitos com o uso de grandes equipamentos em espaços limitados (como túneis). Notou-se a prevalência de trabalhos focando em edifícios, com a falta de pesquisas no campo da infraestrutura e distritos urbanos sendo que, nesses últimos, os estudos existentes majoritariamente trataram de gestão de energia, resposta a emergências e planejamento e controle de redes superficiais, como rodovias. Dentre os estudos selecionados, não houve qualquer referência a redes de saneamento, o que corrobora o caráter ainda incipiente do uso de BIM nesse contexto (MA; REN, 2017).

Edirisinghe et al. (2017) desenvolveram uma extensa revisão bibliométrica, contemplando 207 artigos, para avaliar em que estágio se encontra a aplicação do BIM para fins de gestão de instalações (Facility Management – FM). FM, segundo a International Facility Management Association (2015), pode ser entendida como “profissão que abrange múltiplas disciplinas para garantir a funcionalidade do ambiente construído, integrando pessoas, lugares, processos e tecnologia” e, embora conceitualmente o BIM vise englobar todo o ciclo de vida da edificação, seu uso para FM ainda não se consolidou, muito devido à falta de resultados palpáveis e registrados que evidenciem o retorno do investimento em BIM para esse objetivo (EDIRISINGHE et al., 2017).

A partir da classificação dos artigos em áreas, e de análise quantitativa, os autores conceitualizaram uma estrutura BIM habilitada para FM, com base na Teoria de Difusão de Inovação, desenvolvida em 1962 por E.M. Rogers, para a adoção da prática e definição de caminhos futuros (EDIRISINGHE et al., 2017). Essa teoria explica a dinâmica organizacional dos fatores que afetam a adoção de novas tecnologias, sendo que o processo de inovação passa por 5 estágios dentro de 2 grandes atividades: Iniciação e Implementação.

- Iniciação: abrange toda a coleta de informação e processos de conceituação e planejamento para a adoção de uma determinada inovação, até que o processo se efetive. Há 2 sub-estágios, que são a definição de agenda e definição de *matching*. No primeiro, a organização lida com problemas comuns que vão gerando a percepção da necessidade por inovação; no segundo, a organização passa a lidar com o “como resolver o problema a partir de uma inovação”.

- Implementação: neste momento, a organização lida com todas as ações, eventos e decisões envolvidas no processo de colocar em prática uma inovação. Há três sub-estágios, que são redefinição/reestruturação, esclarecimento e rotinização. No primeiro, a inovação é repensada para se encaixar na organização, e a estrutura organizacional sofre modificações. No segundo, a relação entre a organização e a inovação é definida com maior clareza. No terceiro, que é o estágio final da implementação, é quando a inovação passa a fazer parte das atividades, deixando de ser vista como tal.

Com base nessas considerações, Edirisinghe et al. (2017) levantaram e classificaram os artigos que demonstram o uso de BIM para FM, com objetivos de gerar uma revisão crítica sobre os estudos produzidos em BIM para FM e prover uma fonte unificada de informações sobre essas pesquisas, a partir de uma classificação sistemática. A título de exemplo, em termos de “realização de valor”, pode-se observar que existe dificuldade em justificar os investimentos em BIM para FM, dentre outros motivos, pela demora em se obter retorno, quando a adoção se dá já nos estágios iniciais de implementação BIM, o que retrata um desafio. Um outro aspecto abordado é que, para que se expanda o BIM para fins de FM, é necessário que os prestadores de serviço também o usem, pois essa é a forma de realmente consolidar o uso de tais soluções, integradas à rotina da empresa, e assim adquirir maturidade tecnológica. Poucas pesquisas foram realizadas nos três sub-estágios da fase de Implementação (conforme disposto pela Teoria de Difusão da Inovação), o que reflete o ainda incipiente emprego de BIM para FM. Por tal motivo, os autores consideram importante a divulgação de casos de sucesso, especialmente dos estágios finais de consolidação do uso, para que a difusão possa realmente ocorrer.

De maneira análoga ao observado no artigo de Ma, Z., Ren, Y. (2017), por mais que tenham sido analisados diversos estudos prévios, não há menção a pesquisas relacionadas a sistemas de abastecimento de água ou outros dentro de saneamento. Dada a conceituação de FM pela International Facility Management Association, entende-se que, no contexto do abastecimento público de água, o termo exato “facility management” estaria mais associado às estruturas localizadas, como estações elevatórias, estações de tratamento, centrais de operação, captações etc, do que às estruturas lineares, como adutoras, redes primárias e secundárias. Isso porque as primeiras se enquadram em “ambiente construído”, no sentido de terem como atributos a existência de diversos elementos que constituem uma edificação. Em se referindo a estruturas localizadas ou pontuais, embora fatores ambientais possam ser determinantes em tomadas de decisão (por exemplo, para escolha de tipo de fundação, insolação, ventilação,

distância até os recursos de interesse e outros), é possível gerir o sistema sem que se necessite obrigatoriamente considerar uma referência espacial (EDIRISINGHE et al., 2017).

Bradley *et al* (2016) desenvolveram uma revisão sistemática de literatura visando identificar como a aplicação do BIM para infraestrutura tem sido abordada no contexto da pesquisa acadêmica e na realidade da indústria, identificando seus potenciais de uso segundo a perspectiva dos construtores. Os autores subdividiram “Infraestrutura” em 5 principais domínios, sendo eles: infraestrutura de transportes, energia, redes de serviço público (gás, energia, água e esgoto), áreas de lazer e infraestrutura ambiental. Observam que 3 deles (redes de serviços públicos, transportes e infraestrutura ambiental) são compostos por malhas de redes conectando-se a estruturas localizadas, o que os diferencia, em termos de caracterização projetual e operacional, de edificações: em edificações localizadas, é mais relevante o detalhamento de materiais, peças etc, enquanto que nessas infraestruturas, o fator “localização espacial” torna-se fundamental, dando-se maior ênfase aos processos de gestão de ativos e à conexão de dados não gráficos ao modelo, com a consequente maior importância de uso de SIG e diferenciação em termos de estrutura de dados, conectividade e colaboração entre equipes quando comparado a estruturas localizadas. Nessa revisão, observou-se prevalência de publicações sobre BIM aplicado a edificações em todas as bases consultadas, com apenas 5,95% dos artigos tratando de infraestrutura, dentre os domínios citados anteriormente.

Também foi feita uma revisão dos padrões e procedimentos de indústria que guiam o uso de BIM na indústria AECOO (Arquitetura, Engenharia, Construção, *Owner operator*). Na revisão de literatura, observou-se prevalência de estudos aplicados à fase de projeto quando se tratando de edificações e, para infraestrutura, fases de Manutenção e Operação. Foram identificados, também, estudos focando na interoperabilidade entre BIM e SIG e conexão entre IFC e CityGML. Dentre os temas mais relevantes ao setor de infraestrutura, foram encontrados estudos que trataram de levantamento de tecnologias de coleta de dados visando à geração de *as built*, e um outro tema resultante das pesquisas sobre ICT (Tecnologias de Informação e Comunicação) refere-se a modelos ou metodologias para registro e aquisição de dados, podendo-se citar mapeamento de dados para integrar ou conectar fontes de dados, como extensão de IFC para SIG ou criação de métodos de consulta para extração de informações de modelos IFC. Pouca ou nenhuma ênfase foi dada à aplicação de BIM em *utilities* (redes de serviços públicos) e, dentre os *standards* analisados, observou-se que infraestruturas não são

tratadas em separado, sendo que alguns dos padrões são mais “abertos” e adaptáveis a esse contexto do que outros mais voltados aos edifícios (BRADLEY *et al*, 2016).

Zhao; Liu; Mbachu (2019) indicam a importância de se desenvolver um método que permita aprimorar os processos de planejamento para sistemas de distribuição de água, facilitando as tomadas de decisão. Pontua que comumente são necessárias diversas informações espaciais para a elaboração de um projeto de redes de abastecimento de água, devido à complexidade do meio urbano tanto em termos de relevo quanto de existência de outras infraestruturas que potencialmente geram interferências. Portanto, é possível fazer uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para a representação do projeto no contexto geográfico, e de BIM para o armazenamento e manipulação de informações projetuais. Frisa que BIM e SIG foram desenvolvidos com diferentes propósitos, sendo, assim, mais adequados para o armazenamento de determinados tipos de dados, o que dificulta a integração entre as duas bases. Na revisão bibliográfica de Zhao; Liu; Mbachu (2019) consta que variados estudos prévios utilizaram SIG para planejamento e otimização de sistemas de abastecimento, e poucos agregaram o BIM como ferramenta para detecção de interferências com estruturas existentes. Dessa forma, a metodologia proposta, consistindo na integração de BIM e SIG usando mapeamento semântico, desenvolvimento de modelo 3D para detecção de interferências e parametrização, tratou-se de uma inovação.

3.3.2 Contexto brasileiro: A Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling

Após a criação da Estratégia Nacional de Disseminação do BIM (Decreto nº 9.377/2018), atualizada em 2019, foram lançados decretos detalhando o processo de implementação e suas fases. O Decreto 9.983, de 2019, tem como objetivos, dentre outros, atuar na difusão do BIM e de seus benefícios, favorecer o ambiente para investimentos públicos e privados em BIM, estimular capacitação nessa tecnologia, e também desenvolver as Plataforma e Biblioteca Nacional BIM. Ainda, define o Comitê Gestor, responsável por planejar o direcionamento das ações, promover a divulgação de informações e acompanhar a evolução da Estratégia BIM BR. O Decreto 10.306, de 2020, com finalidade de promover o uso do BIM em obras públicas federais, define conceitos relacionados ao uso de tecnologia BIM no contexto do ciclo de vida das edificações, determinando também as fases de implementação, a ser

iniciada com o desenvolvimento de projetos de engenharia e continuada nas fases de execução de obra, gerenciamento e manutenção posteriores.

O Decreto nº 10.306 define as fases de implementação do BIM. Em 2021, previu-se, no artigo 4º, que o BIM deveria ser usado no desenvolvimento de projetos de arquitetura e engenharia, abrangendo, ao menos, elaboração de modelos de arquitetura e engenharia das disciplinas de estruturas, instalações hidráulicas e elétricas, instalações de ventilação, ar condicionado e aquecimento; na detecção de interferências e extração de quantitativos. Para a 2ª fase, a partir de 2024, prevê-se a utilização do BIM na execução direta ou indireta de projetos de arquitetura e engenharia, bem como na gestão das obras, todo o planejamento, orçamentação e controle da obra, e também a elaboração de *as built*. A partir de 2028 deverá se iniciar a 3ª fase, além de todos os usos previstos nas fases anteriores, prevê-se o uso para gerenciamento e manutenção da obra cujos projetos foram elaborados em BIM.

Checucci (2019) conclui que, embora tenha havido aumento significativo na quantidade de pesquisas de mestrado e doutorado sobre BIM no Brasil entre os anos de 2013 e 2018, a parcela mais significativa desses estudos tratou de fase de projetos e obras de edificação, tendo encontrado pouco foco no âmbito da gestão de instalações e aplicações ao saneamento.

Ainda que o Decreto não trate diretamente da aplicação do BIM para infraestruturas do setor de saneamento, nota-se que existe intenção de inserir efetivamente o BIM na realidade da construção civil brasileira, evidenciando-se suas vantagens para o projeto, execução e gestão de edificações. Portanto, cabe investigar as possibilidades de aplicação da metodologia BIM ao contexto das redes de distribuição de água.

3.4 Transformação digital

A necessidade de aprimorar a relação com os consumidores, minimizar os efeitos de mudança climática, lidar com a escassez hídrica, além das demandas por eficiência em suas diversas facetas, são problemáticas atuais que tem impulsionado a transformação do setor da água, abrindo caminho para que as tecnologias digitais possam responder pelos desafios existentes e futuros (SARNI *et al.*, 2019).

Segundo Azevedo (2017, p. 19), “a transformação digital é parte de um grande processo tecnológico e está associada à aplicação da tecnologia digital em todos os aspectos da sociedade humana”. O termo, todavia, se confunde com “digital” e “digitalização”, sendo utilizado de

forma genérica para descrever as mudanças tecnológicas que vem ocorrendo na sociedade (CHEW, 2013), e não há ainda um total consenso acerca da definição. Segundo Collin (2015), para melhor entendimento da transformação digital, há que se diferenciar “digital” e “digitalização”: o primeiro remete à conversão de informação analógica em digital; o segundo, à transformação de processos físicos em virtuais. Dessa maneira, segundo o autor, a transformação digital trata do processo de adaptação técnica por que passam os indivíduos, negócios, sociedades e nações em decorrência da digitalização.

O valor gerado pela adoção de soluções digitais não se restringe à concessionária em si, mas abrange também o meio ambiente e a comunidade. Dentre os benefícios à comunidade, podem-se citar custos mais acessíveis de prestação de serviço, com menos impacto nas finanças do usuário, menos riscos de inadimplência e de cortes nos serviços de usuários vulneráveis. Ainda, pode-se melhorar a experiência do usuário, no sentido, por exemplo, de engajá-los pela possibilidade de acompanhar seu consumo de água por via do uso de hidrômetros inteligentes. Desta forma, nota-se que a tecnologia digital tem potencial para tornar as concessionárias mais resilientes, inovadoras e eficientes, tornando-as, por conseguinte, até mais viáveis economicamente. O uso, dentre outros, de análise de dados, automação, recursos de IoT, monitoramento em tempo real e modelagem hidráulica permite que os prestadores de serviço possam caminhar no sentido da redução de perdas, conservação de recursos hídricos e incremento do ciclo de vida das infraestruturas (SARNI et al., 2019).

Dadas as considerações acerca de modelagem hidráulica, interesse na aplicação do BIM e de novos recursos digitais no contexto da indústria da água, justifica-se o desenvolvimento desta dissertação com o objetivo de identificar relações e avanços recentes nessas temáticas.

4. Metodologia

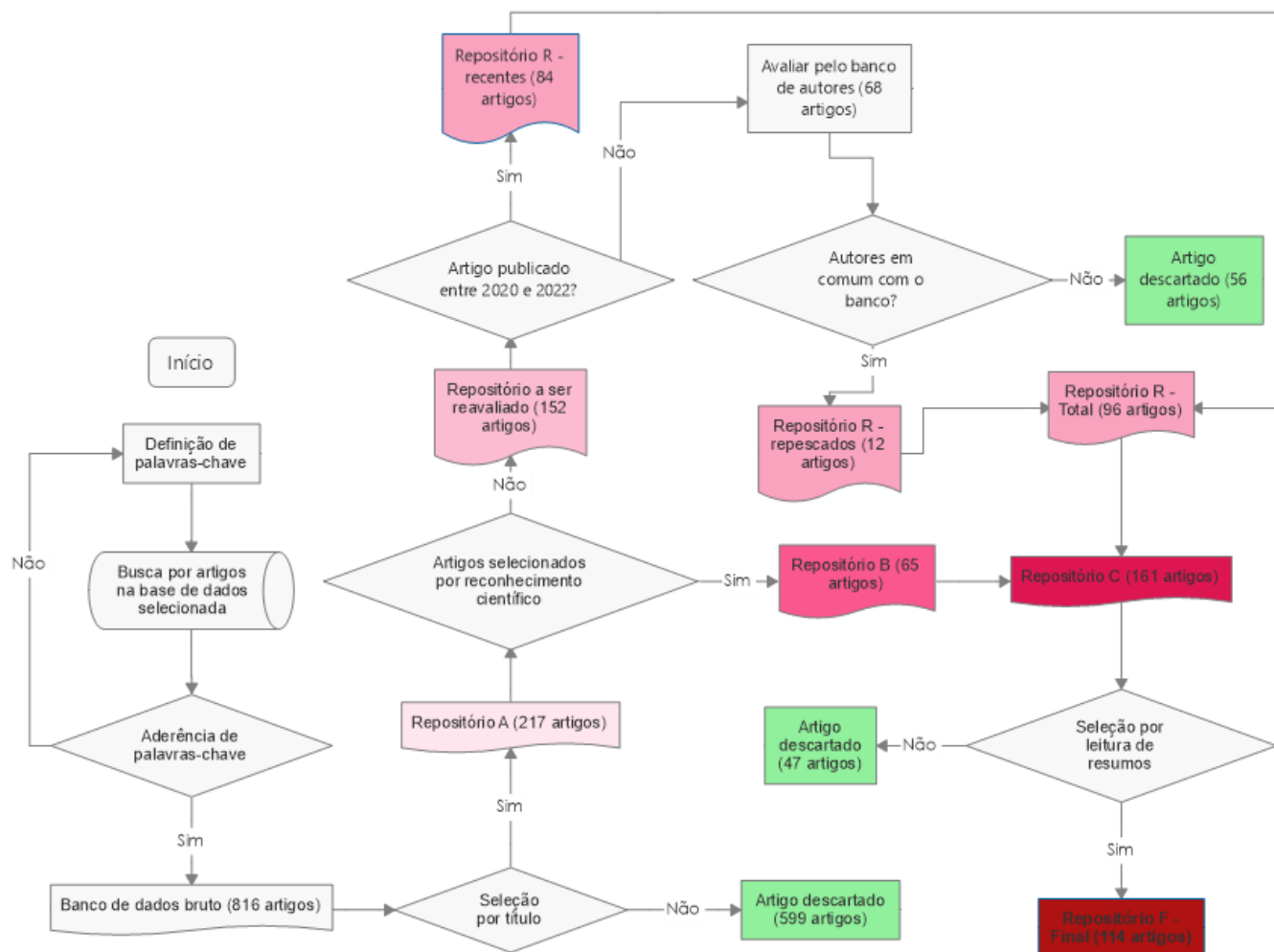
Bibliometria é um método quantitativo para análise de literatura científica dentro de determinado tópico, orientando a identificação de tendências e assuntos em evidência (ZHANG; LI; LI, 2021). Para tanto, é necessária a seleção de um referencial teórico, a qual foi conduzida nesta pesquisa por meio do emprego do chamado método ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*). Esse método propõe diretrizes baseadas em índices bibliométricos para a seleção de literatura relevante que irá compor a análise (ENSSLIN, 2010; LACERDA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2012; ENSSLIN *et al.*, 2015; CARVALHO *et al.*, 2020). Observa-se que, na base de dados da Web of Science, uma busca por “Proknow-c” retorna 102 resultados, dos quais 62 se tratam de artigos; 24, de artigos de revisão, e outros 16, de artigos de conferência, o que demonstra a consolidação do método no meio científico.

O método é composto por 4 passos principais (ENSSLIN *et al.*, 2015), sendo que, nesta dissertação, os passos 1 e 2 foram aplicados e, para análise do conteúdo dos artigos e discussões acerca de lacunas de pesquisa, foi feita uma organização manual e temporal de temáticas centrais, a partir de leitura e discussão dos temas mapeados.

- 1) Seleção do portfólio bibliográfico
- 2) Análise bibliométrica do portfólio
- 3) Análise sistemática
- 4) Formulação de novas perguntas de pesquisa com base no portfólio analisado.

O fluxograma ilustrado na Figura 1 resume a metodologia adotada, bem como o quantitativo de artigos selecionados em cada etapa de seleção do portfólio bibliográfico, resultado de cada repositório e culminando no Repositório F (final) com 114 artigos.

Figura 1 – Fluxograma da Metodologia adotada na pesquisa



Fonte: Autora (2022)

4.1 Passo 1 – Seleção do portfólio bibliográfico

O primeiro passo do método é subdividido em 2 etapas, as quais também são compostas por outras etapas, a saber:

- 1) Seleção do portfólio bibliográfico
 - i. Seleção de banco de dados de artigos brutos
 - a. Definição de palavras-chave
 - b. Definição da base de dados a ser utilizada
 - c. Busca por artigos na base selecionada com as palavras-chave definidas
 - d. Aplicação de teste de aderência de palavras-chave
 - ii. Filtragem de banco de dados de artigos
 - a. Eliminação de artigos repetidos
 - b. Alinhamento pela leitura de títulos
 - c. Alinhamento segundo reconhecimento científico
 - d. Alinhamento pela leitura de resumos

e. Alinhamento pela leitura de artigos

Para a etapa “i” da seleção de portfólio bibliográfico, o processo ocorre de forma iterativa, testando-se combinações de palavras-chave até que os resultados retornados pela busca coincidam com o tema de pesquisa. Ressalta-se que a base de dados utilizada foi a *Web of Science*, pois agrega os artigos mais influentes em diversas disciplinas, além de ser mais extensa, organizada e cientificamente robusta (MARSILIO; CAPPELLARO; CUCCURULLO, 2011; ZHAO, 2017)

Conforme exposto na seção Objetivos, foram considerados três eixos de pesquisa, com variação de palavras-chave, de tal modo que se pudesse identificar relações entre estes. Adiante apresentam-se as palavras-chave e concatenação de busca para cada um dos eixos (Quadro 1 e Quadro 2). Para as análises, foram considerados apenas artigos de periódicos, removendo-se artigos de conferência e capítulos de livros.

Quadro 1 – Eixos de pesquisa e palavras-chave

Eixo	Palavras-chave
1 – Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	Hydraulic model Water distribution Water industry/industries Water network Water utility/utilities Water facility/facilities Management Digital twin Real time
2 – Modelos de informação e redes de distribuição	Information model/modeling/modelling Digital twin BIM Water
3 – <i>Smart water</i> e conceitos correlatos	Smart water Digital water Water distribution Water industry/industries Water network Water utility/utilities Water facility/facilities Water 4.0 Water industry 4.0

Quadro 2 - Concatenação de busca e quantidade de produções acadêmicas

Eixo	Concatenação de busca	Data da busca	Quantidade de produções acadêmicas	Participação relativa
1 – Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	TS=("Hydraulic model*") AND TS=("water distrib*" OR "water industr*" OR "water network*" OR "water utilit*" OR "water facilit*") AND TS= ("manag*" OR "digital twin*" OR "real time")	30/04/2022	222	27,2%
2 – Modelos de informação e redes de distribuição	TS=("information model*" OR "digital twin*" OR "bim") AND ts= ("water")	01/05/2022	399	48,9%
3 – Smart water e conceitos correlatos	TS=("smart water" OR "digital water") AND ("water distrib*" OR "water industr*" OR "water network" OR "water utilit*" OR "water facilit*")) OR TS= ("water 4.0" OR "water industry 4.0")	28/04/2022	195	23,9%
Total	-	-	816	100%

Todas as buscas foram realizadas considerando a Coleção Principal da Web of Science. O termo “TS” procura pelas palavras-chave e combinações nos títulos, resumos e palavras-chave cadastradas, e o uso de asterisco permite que os resultados englobem termos similares com terminações diferentes, por exemplo:

- “water facilit*” permite o retorno de “water facility” e “water facilities”.

Observa-se que a cadeia de buscas para o Eixo 2 é menos restritiva que as demais, pois visou-se ampliar o leque de possibilidades de uso de BIM para redes de distribuição de água, uma vez que a fundamentação teórica inicial gerou uma hipótese de que esses dois contextos ainda não estão tão associados.

Cabe pontuar que o objetivo da pesquisa não foi abranger toda e qualquer temática que relacionasse modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição de água, almejando-se reduzir o escopo a uma visão mais geral e menos aplicada de modo a identificar o panorama de avanços na área. No Quadro 3 tem-se um recorte de palavras-chaves que foram

compiladas a partir do embasamento teórico e que subsidiaram a definição das combinações de busca efetivamente utilizadas na pesquisa.

Quadro 3 – Palavras-chave que embasaram as buscas

water industry 4.0	Water network supply management	Water facility management	Smart water
Water Big Data	Smart water network	Facility management	Microgrids
Water distribution systems	Water network/system	Water industry	Micronets
Water distribution network model	Water distribution network model	Digital revolution	Water business
Water-distribution systems	Linear structures	Digitalisation	Water sector
Hydraulic network models/modeling	Water network facilities	Digital water	Water utility

Assim, apesar de terem sido feitos diversos testes com diferentes palavras-chave, até que se chegasse ao conjunto selecionado para cada eixo, a pesquisa não está isenta de, eventualmente, ter deixado de reportar a contribuição de determinados autores. Tem-se, no Brasil, a contribuição da Profa. Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis que, inclusive, publicou com autores de importante expressão na área, porém, os temas e palavras-chave dos artigos presentes na Web of Science não correspondem aos critérios de busca aqui adotados, não tendo sido incluídos nos resultados. A seguir, os artigos encontrados a partir da busca pelo nome da autora (Reis, L.F.R.), na Web of Science (Quadro 4):

Quadro 4 – Artigos encontrados na Web of Science para um autor específico

Identificador	Título	Autores	Ano	Categoria	Palavras-chave
1	Sampling design for leak detection in water distribution networks	Gamboa-Medina, MM; Reis, LFR	2017	Artigo conferência	em Sampling design; leak detection; pressure sensors; sensor placement; water supply systems
2	Maximum Design Flow Estimates for Large Basins Using the Local Frequency Analysis (LFA) and the Most Probable Maximum Hydrograph (MPMH) Methods - a Critical Analysis	Cavalcanti, DLL; Reis, LFR	2017	Artigo periódico	em Design hydrographs; Statistical distributions; Curvilinear unit hydrograph; Sobradinho hydroelectric power plant; Paso de Los Libres fluviometric station
3	Evaluation of relative roughness of PVC pipes for dimensioning the water distribution networks	Kellner, E; Akutsu, J; Reis, LFR	2016	Artigo periódico	em water distribution network; regulatory requirements; relative roughness
4	Real-Time Multiobjective Optimization of	Odan, FK; Reis, LFR; Kapelan, Z	2015	Artigo periódico	em Pump scheduling; Optimization;

Identificador	Título	Autores	Ano	Categoria	Palavras-chave
	Operation of Water Supply Systems				Real-time operation; Reliability; Water supply
5	Hybrid Demand Forecasting Associating Artificial Neural Network with Fourier Series	Water Model Odan, FK; Reis, LFR	2012	Artigo periódico	em Forecasting; Artificial intelligence; Fourier series; Hybrid methods; Water demand; Water supply
6	Evaluation of healthcare waste management performance indicators	of waste by Ventura, KS; Reis, LFR; Takayanagui, AMM	2010	Artigo periódico	em performance indicators; healthcare waste; factor analysis; AHP method; waste management

O artigo de identificador 1, ainda que tivesse sido encontrado, teria sido removido do escopo de análise por não ter sido publicado em periódico, e sim em conferência. Dentre os demais, apenas os de números 3, 4 e 5 guardam alguma relação com a pesquisa aqui conduzida, principalmente os 4 e 5, uma vez que o 3 trata de um tópico específico sobre rugosidades em tubulações de PVC, que não está entre os principais temas pesquisados nesta dissertação.

Devido às palavras-chave e combinações entre estas, bem como termos usados em título e resumo, os referidos artigos e, eventualmente, outros autores, não foram encontrados nas buscas. Todavia, os temas gerais foram abordados nesta pesquisa; portanto, entende-se que não houve prejuízo quanto ao atendimento dos objetivos, respeitando a limitação de escopo de qualquer pesquisa científica.

Para a etapa “ii” (filtragem de banco de dados de artigos), foram extraídos da base de dados *Web of Science* os registros completos resultantes das buscas, em formato de planilha eletrônica. No passo “ii-a”, não foram obtidos documentos repetidos em nenhum dos eixos. O passo “ii-b” consistiu em um primeiro filtro, com a leitura de títulos, removendo-se da base de artigos aqueles que não se alinhavam ao tema da pesquisa, tendo sido descartados os artigos cujos títulos evidenciassem o seguinte:

- Eixo 1:
 - Modelagem ou avaliação da qualidade da água em redes de distribuição, sem avaliação de outros parâmetros;
 - Teste ou proposição de métodos matemáticos de calibração;
 - Modelagem ou avaliação de sistemas de irrigação;

- Modelagem ou avaliação de mananciais, grandes reservatórios ou sistemas de drenagem
- Eixo 2:
 - Tópicos relativos à química;
 - Tópicos relativos à agricultura e irrigação;
 - BIM voltado a edificações.
- Eixo 3:
 - Tópicos relativos à química;
 - Tópicos relativos à agricultura e irrigação;
 - Técnicas de particionamento de redes de distribuição de água.

Após a seleção por títulos, obtém-se o primeiro repositório, denominado Repositório A, que ficou composto da seguinte maneira (Quadro 5):

Quadro 5 - Repositório A – artigos selecionados por alinhamento de título

Repositório A – pós seleção por títulos alinhados		
Eixo	Quantidade de documentos	Participação relativa
1 – Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	83	38,3%
2 – Modelos de informação e redes de distribuição	43	19,8%
3 – <i>Smart water</i> e conceitos correlatos	91	41,9%
Total	217	100%

Após a seleção por títulos, o passo “c” do item “ii” requer a aplicação de um novo filtro aos documentos pré-selecionados, que é o alinhamento segundo o reconhecimento científico dos artigos. Para tanto, o método ProKnow-C propõe a classificação dos artigos segundo o número de citações, usando-se como referência o campo “Times Cited, WoS Score” presente nas planilhas extraídas da base de dados. Com apoio de planilha eletrônica, os artigos alinhados pelo título foram reordenados conforme o número de citações, do maior para o menor, e foi calculado em outra coluna o percentual de citações acumuladas. Adotando-se como referência o postulado de Pareto, em que uma minoria de população representaria a maioria do efeito, assume-se que a maioria do reconhecimento científico está contido na minoria de artigos mais citados. Assim, estando os artigos ordenados de maior para menor reconhecimento, selecionou-se até aquele cujo percentual acumulado de citações representava aproximadamente 80% do total de citações na amostra (CARVALHO *et al.*, 2020). O Quadro 6 demonstra o total de citações em cada amostra, o quantitativo de citações que representa os 80% e o mínimo de citações por artigo que passa a compor o Repositório B. No Quadro 7 tem-se a relação de documentos após a etapa “ii-c”.

Quadro 6 – Total de citações na amostra inicial, 80% das citações e mínimo de citações por artigo pertencente aos 80%

Eixo	Total de citações na amostra (Títulos alinhados)	80% das citações	Mínimo de citações por artigo
1 – Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	1114	902	14
2 – Modelos de informação e redes de distribuição	293	240	6
3 – <i>Smart water</i> e conceitos correlatos	1086	879	12

Quadro 7 - Repositório B – artigos selecionados por reconhecimento científico

Repositório B – seleção por reconhecimento científico		
Eixo	Quantidade de documentos	Participação relativa
1 – Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	24	36,9%
2 – Modelos de informação e redes de distribuição	12	18,5%
3 – <i>Smart water</i> e conceitos correlatos	29	44,6%
Total	65	100%

Os artigos menos citados do Repositório A (Quadro 5), cujos quantitativos são citados no Quadro 8, ainda passaram por outras análises para a decisão de mantê-los ou excluí-los do portfólio teórico em questão.

Quadro 8 - Documentos do repositório A menos citados, a serem reavaliados

Eixo	Quantidade de documentos a serem reavaliados
1 – Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	59
2 – Modelos de informação e redes de distribuição	31
3 – <i>Smart water</i> e conceitos correlatos	62
Total	152

Para a decisão acerca dos 152 artigos restantes, a análise é dividida em dois momentos (CARVALHO *et al.*, 2020; LACERDA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2012) e a extração de artigos deste grupo compõe o denominado Repositório R (“Repescagem”).

- Seleção de artigos publicados há menos de 2 anos, pois podem não ter tido tempo de receber uma quantidade significativa de citações;

- Seleção de artigos com mais de 2 anos e cujo(s) autor(es) faz(em) parte do grupo de pesquisadores responsáveis pelas publicações dos 65 artigos com reconhecimento científico.

Considerando-se os anos 2020, 2021 e 2022, um total de 84 dos 152 artigos foram selecionados (Quadro 9). Dentre os 68 artigos restantes, mais antigos, 12 foram selecionados devido a seus autores pertencerem ao grupo de pesquisadores reconhecidos do repositório B (Quadro 10). Desta maneira, o repositório R fica composto de 96 artigos.

Quadro 9 - Repositório R – artigos recentes

Eixo	Quantidade de documentos recentes selecionados (publicados em 2020, 2021 ou 2022)
1 – Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	22
2 – Modelos de informação e redes de distribuição	23
3 – <i>Smart water</i> e conceitos correlatos	39
Total	84

Quadro 10 - Repositório R – artigos com autores em comum com os do Repositório B

Eixo	Quantidade de documentos selecionados – pesquisadores reconhecidos
1 – Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	7
2 – Modelos de informação e redes de distribuição	0
3 – <i>Smart water</i> e conceitos correlatos	5
Total	12

Após a inclusão dos 96 artigos (12 + 84) do Repositório R ao Repositório B, compõe-se o Repositório C, que ainda passará pelo filtro de leitura de resumos (Quadro 11).

$$C = B + R = 65 + 96 = 161 \text{ artigos.}$$

Quadro 11 - Repositório C = B + R

Repositório C	
Eixo	Quantidade de documentos selecionados: B + R
1 – Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	24 + 22 + 7 = 53
2 – Modelos de informação e redes de distribuição	12 + 23 + 0 = 35
3 – <i>Smart water</i> e conceitos correlatos	29 + 39 + 5 = 73
Total	161

Para definição do repositório final (F), apresentado no Quadro 12, procedeu-se à leitura dos resumos dos artigos compilados no Repositório C, removendo-se aqueles que não correspondiam aos objetivos da pesquisa.

Quadro 12 – Repositório Final (F)

Repositório F		
Eixo	Quantidade de documentos selecionados para Repositório F (final), após leitura dos resumos	Participação relativa
1 – Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	35	30,7%
2 – Modelos de informação e redes de distribuição	23	20,2%
3 – <i>Smart water</i> e conceitos correlatos	56	49,1%
Total	114	100%

Portanto, o portfólio teórico utilizado para as análises desta pesquisa ficou composto de 114 artigos.

4.2 Passo 2 – Análise bibliométrica do portfólio

Para condução da bibliometria descritiva, utilizou-se planilha eletrônica para organização das produções ano a ano, e o software livre VOSviewer versão 1.6.18 para análises de co-autoria (países e autores), co-citação (autores, fontes e referências citadas) e co-ocorrência de palavras-chave, para cada um dos três eixos de busca.

As análises de co-autoria se restringem aos artigos que compõem a amostra com que o software é alimentado, assim, o total de citações do autor é igual ao número de citações que o artigo por ele produzido recebeu na Web of Science. Assim, co-autores recebem o mesmo número de citações caso na amostra de artigos analisada haja um único documento de autoria compartilhada entre eles, do contrário, o número de citações é a soma das citações de cada artigo de que o pesquisador foi co-autor ou autor. A co-autoria de países obedece à mesma lógica. Co-citações, por sua vez, são análises feitas a partir das referências citadas pelos artigos que compõem o portfólio teórico, evidenciando autores, artigos e periódicos mais citados.

A análise de co-ocorrência de palavras-chave identifica termos que se repetem em diferentes artigos, sendo que a conexão entre eles é mais forte a depender do número de publicações em que dois termos ocorrem juntos, o que, na rede gerada, fica mais evidente pela espessura das conexões entre os elementos. A identificação de termos pelo VOSviewer ocorre

através de algoritmos de Processamento de Linguagem Natural. Esse algoritmo funciona desde que os dados de entrada utilizados no software (palavras-chave, resumo, dentre outros) estejam todos em inglês. O processo segue os seguintes passos principais: aplicação de algoritmo de identificação e separação dos textos em sentenças; aplicação de algoritmo de rotulação de palavras a partir de sua função, como substantivo, adjetivo, verbo, advérbio; identificação de frases nominais, ou seja, de sequências textuais cuja última palavra seja um adjetivo ou substantivo, e que as anteriores também o sejam; unificação de frases nominais, em que são removidos caracteres alfa-numéricos, acentos, letras maiúsculas, e convertidos os textos em plural para singular. Além disso, o software é capaz de remover palavras genéricas de pouca relevância, como “conclusão” e “revisão” (VAN ECK; WALTMAN, 2020).

O software VOSviewer foi utilizado, também, para a geração de redes baseadas em co-autoria, co-citação e co-ocorrência, que facilitam a visualização das relações entre países, autores e temas.

5. Resultados

Dada a descrição metodológica apresentada para a seleção de artigos que compuseram a análise bibliométrica, o Quadro 13 apresenta o resumo das fases executadas.

Quadro 13 – Resumo das fases de seleção de artigos segundo metodologia proposta

EIXO	1	2	3	TOTAL
Tema	Modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição	Modelos de informação e redes de distribuição	Smart water e conceitos correlatos	-
Concatenação de busca	TS=("Hydraulic model*") AND TS=("water distrib*" OR "water industr*" OR "water network*" OR "water utilit*" OR "water facilit*") AND TS= ("manag*" OR "digital twin*" OR "real time")	TS=("information model*" OR "digital twin*" OR "bim") AND ts= ("water")	TS=("smart water" OR "digital water") AND ("water distrib*" OR "water industr*" OR "water network*" OR "water utilit*" OR "water facilit*") OR TS= ("water 4.0" OR "water industry 4.0")	-
Quantidade de documentos	222	399	195	816
Repositório A - pós seleção por títulos alinhados	83	43	91	217
Repositório B - artigos selecionados por reconhecimento científico (artigos que representam 80% do total de citações)	24	12	29	65
Documentos do Repositório A que foram reavaliados	59	31	62	152
Repositório R - Artigos do Repositório A entre 2020 e 2022	22	23	39	84
Repositório R - Artigos do Repositório A antigos com autores pertencentes ao banco de autores	7	0	5	12
Descartados	30	8	18	56
Repositório R - Total	29	23	44	96
Repositório C (B + R) - a ser filtrado por leitura de resumo	54	35	73	161
Repositório F - final, após leitura de resumos do Repositório C	35	23	56	114

Fonte: Autora (2022)

As Figura 2 e Figura 3 ilustram os percentuais de artigos de cada eixo sobre o total, considerando a busca inicial e o Repositório final, F. Conforme descrito na Metodologia, a cadeia de busca para o Eixo 2 foi deixada mais ampla, de modo a evitar que artigos relevantes não fossem considerados. Assim, no primeiro momento de busca, esse eixo teve uma participação mais relevante. Porém, já na fase de eliminação por alinhamento de títulos, notou-se uma grande quantidade de artigos relacionados a tópicos como química, físico-química, bioquímica e correlatos; nas fases seguintes, conforme era esperado, artigos relacionando BIM a edificações verticais foram também removidos. Na última fase, inverte-se a proporção de artigos do eixo 2 com o 3, muito em decorrência da inclusão de diversos artigos recentes no eixo 3.

Figura 2 - Número e Porcentagem de artigos por eixo, busca inicial

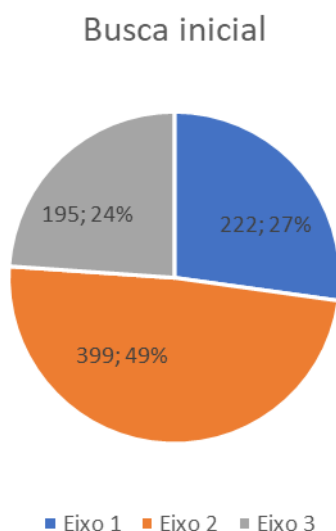
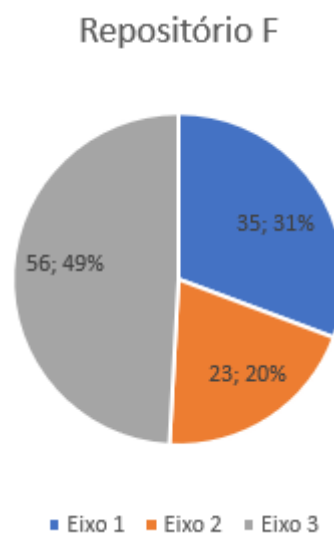


Figura 3 – Número e Porcentagem de artigos por eixo, Repositório F



5.1 Bibliometria descritiva

Nesta seção são apresentados os resultados da análise bibliométrica produzida a partir do Repositório F criado, contemplando todos os artigos selecionados até a fase de leitura dos resumos, no método Proknow-C. Conforme exposto na Metodologia, o software VOSviewer, de acesso livre, foi utilizado como ferramenta para a geração das redes de co-autoria e co-ocorrência aqui apresentadas.

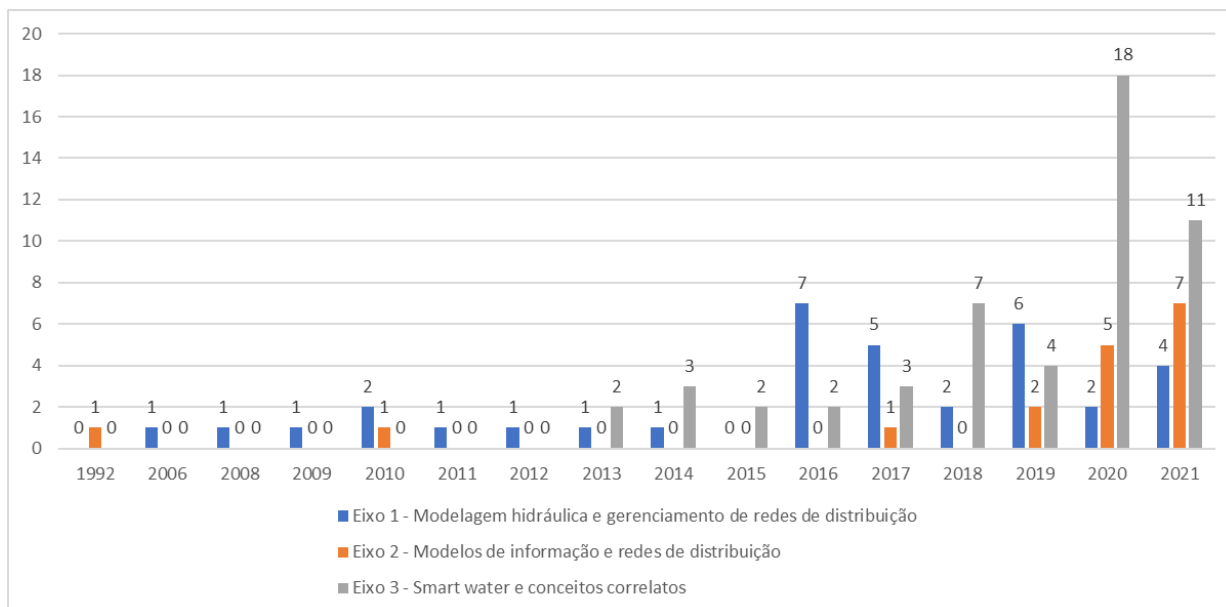
5.1.1 Produção anual

Organizando-se os artigos do repositório F por ano e excluindo-se o ano de 2022 da análise gráfica, uma vez que ainda não é um ano cheio e pode distorcer a visualização de resultados, tem-se a seguinte distribuição temporal de produções (Quadro 14 e Figura 4).

Quadro 14 – Quantitativo de produções acadêmicas ano a ano

Anos	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
1992	-	1	-
2006	1	-	-
2008	1	-	-
2009	1	-	-
2010	2	1	-
2011	1	-	-
2012	1	-	-
2013	1	-	2
2014	1	-	3
2015	-	-	2
2016	7	-	2
2017	5	1	3
2018	2	-	7
2019	6	2	4
2020	2	5	18
2021	4	7	11
2022	-	6	4

Figura 4 – Produções acadêmicas nos eixos de pesquisa, ano a ano



Analisando o Quadro 14 e a Figura 4, nota-se que a quantidade de publicações para o Eixo 1 se mantém praticamente constantes de 2006 a 2014, com aumento a partir de 2016. Para o Eixo 2, as publicações apesar de aparecerem a partir de 1992, são escassas até 2017 e apenas

em 2019/2020 nota-se um aumento na quantidade de artigos. Já no Eixo 3 as publicações encontradas, seguindo a metodologia proposta nesta pesquisa, aparecem só a partir de 2013 com aumento mais significativo em 2018.

5.1.2 Co-autoria de países – Quantitativos

A rede de co-autoria de países demonstra a cooperação entre pesquisadores de diferentes nacionalidades, sendo possível fazer algumas configurações para a composição da rede no software VOSViewer. De modo a englobar na análise todos os países da amostra, foram selecionados os seguintes atributos para criação da rede:

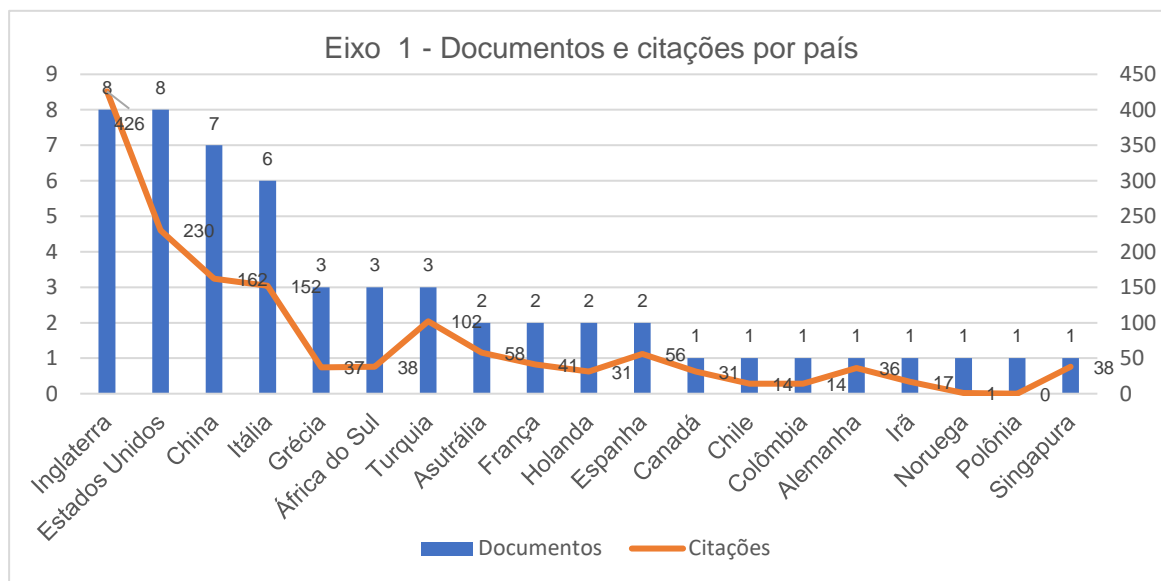
- Número mínimo de documentos de um determinado país: 1
- Número mínimo de citações que os artigos de determinado país receberam: 0

Para o Eixo 1, conforme exposto no Quadro 15 e Figura 5, foram identificados 19 países envolvidos nas pesquisas. Destaca-se que o número total de documentos é superior ao quantitativo de artigos analisados, uma vez que a maioria deles foi publicada em co-autoria e, portanto, cada artigo tem contribuição de autores de 1 ou mais países, sendo essa observação válida para os demais eixos.

Quadro 15 – Produções acadêmicas por país – Eixo 1

País	Documentos	Citações
Inglaterra	8	426
Estados Unidos	8	230
China	7	162
Itália	6	152
Grécia	3	37
África do Sul	3	38
Turquia	3	102
Asutrália	2	58
França	2	41
Holanda	2	31
Espanha	2	56
Canadá	1	31
Chile	1	14
Colômbia	1	14
Alemanha	1	36
Irã	1	17
Noruega	1	1
Polônia	1	0
Singapura	1	38

Figura 5 – Documentos e citações Eixo 1 - modelagem hidráulica e gerenciamento de redes de distribuição

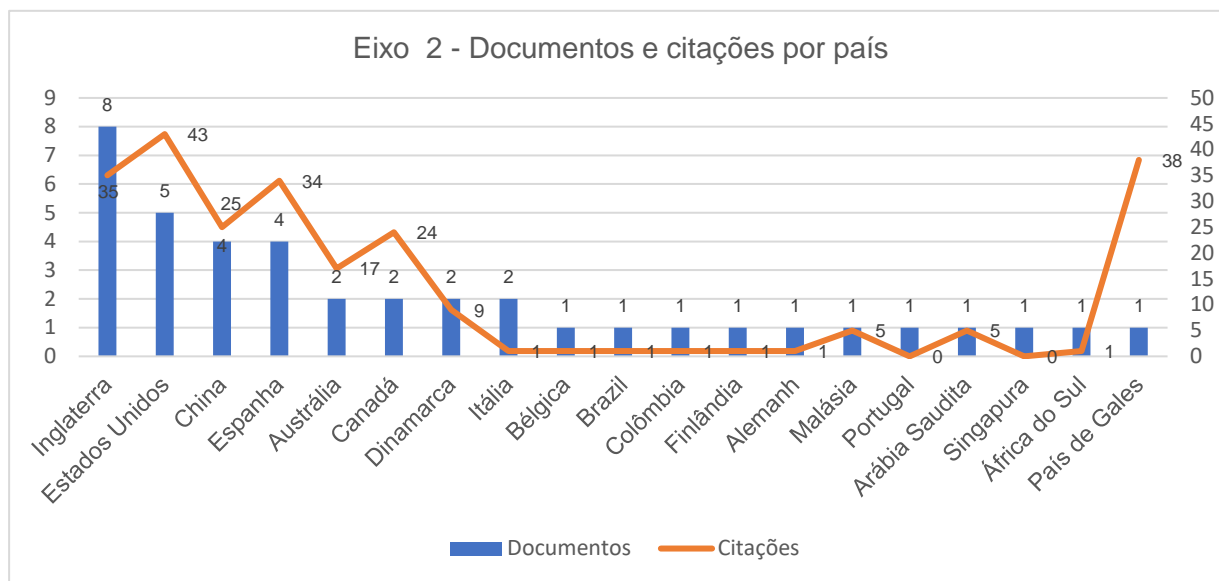


Para o Eixo 2, conforme exposto no Quadro 16 e Figura 6, também foram identificados 19 países envolvidos nas pesquisas, dentre eles o Brasil com participação em 1 artigo.

Quadro 16 - Produções acadêmicas por país – Eixo 2

País	Documentos	Citações
Inglaterra	8	35
Estados Unidos	5	43
China	4	25
Espanha	4	34
Austrália	2	17
Canadá	2	24
Dinamarca	2	9
Itália	2	1
Bélgica	1	1
Brasil	1	1
Colômbia	1	1
Finlândia	1	1
Alemanha	1	1
Malásia	1	5
Portugal	1	0
Arábia Saudita	1	5
Singapura	1	0
África do Sul	1	1
País de Gales	1	38

Figura 6 – Documentos e citações Eixo 2 – Modelos de informação e redes de distribuição

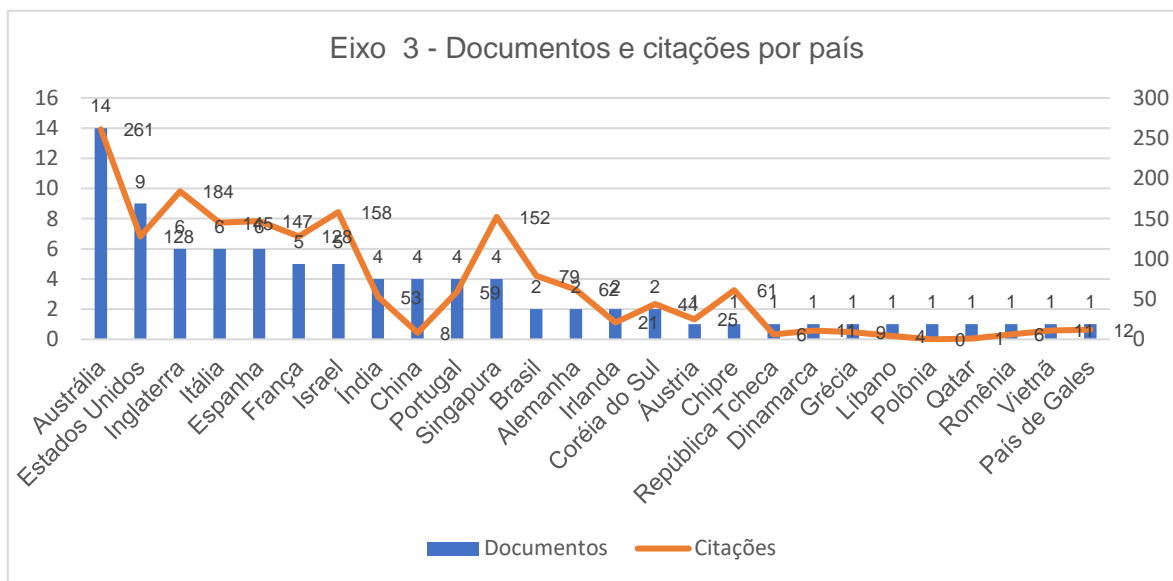


Para o Eixo 3, conforme exposto no Quadro 17 e Figura 7 foram identificados 26 países envolvidos nas pesquisas, com participação de autores brasileiros em 2 artigos.

Quadro 17 - Produções acadêmicas por país – Eixo 3

País	Documentos	Citações
Austrália	14	261
Estados Unidos	9	128
Inglaterra	6	184
Itália	6	145
Espanha	6	147
França	5	128
Israel	5	158
Índia	4	53
China	4	8
Portugal	4	59
Singapura	4	152
Brasil	2	79
Alemanha	2	62
Irlanda	2	21
Coréia do Sul	2	44
Áustria	1	25
Chipre	1	61
República Tcheca	1	6
Dinamarca	1	11
Grécia	1	9
Líbano	1	4
Polônia	1	0
Qatar	1	1
Romênia	1	6
Vietnã	1	11
País de Gales	1	12

Figura 7 - Documentos e citações Eixo 3 – Smart water e conceitos correlatos



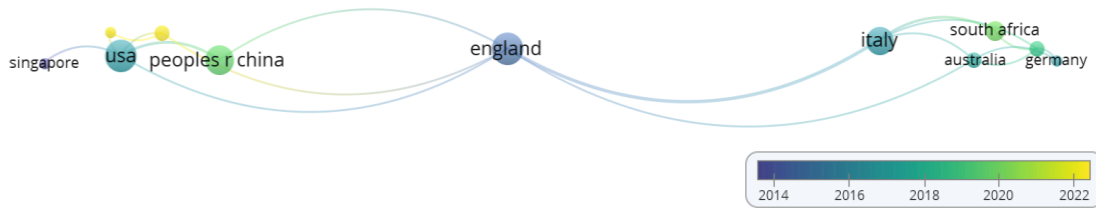
5.1.3 Co-autoria de países – Redes

Dentre os 19 países identificados nas produções do Eixo 1, a maior rede ficou sendo composta de 11 deles, os demais gerando nichos isolados, associados a autores ou grupos de pesquisa na Grécia, Turquia, Polônia, Irã, Espanha e Canadá. Inglaterra, embora tenha mesmo número de produções que Estados Unidos, é mais relevante em termos de citações (vide Figura 5), o que fica evidenciado na Figura 8, que a coloca no centro da rede de co-autoria e mostra sua relação, direta ou indireta, com os demais países que compõem essa rede. Ainda, pode-se concluir, a partir da visão temporal (Figura 9) que os países com maior número de publicações e citações já atuam na área há mais de 5 anos, enquanto que os demais passaram a contribuir nos últimos 2 anos, aproximadamente.

Figura 8 – Rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 1



Figura 9 – Visão temporal da rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 1



No Eixo 2, dentre os 19 países que compuseram o repositório, a maior rede identificada ficou sendo composta de 16 deles, os demais gerando nichos isolados, associados a autores ou grupos de pesquisa na Malásia, Singapura e País de Gales (Figura 10). Focando-se na atuação do Brasil, observa-se interação direta com Colômbia, Alemanha, Espanha e Itália, tendo se tratado de uma publicação recente sobre estimativa de velocidade de rotação de bombas com base em redes neurais convolucionais, modelo hidráulico e monitoramento em tempo real (BONILLA *et al.*, 2022).

Figura 10 - Rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 2

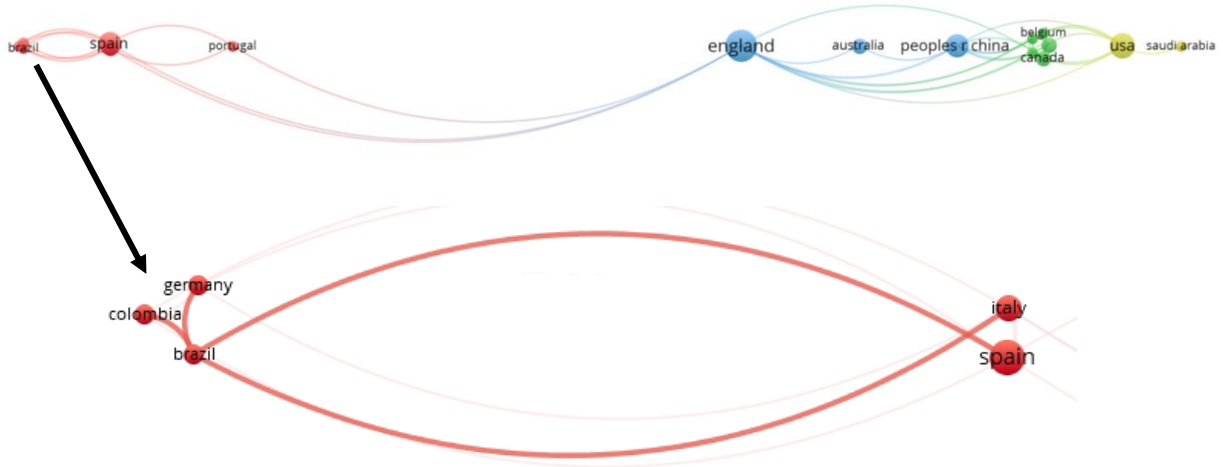
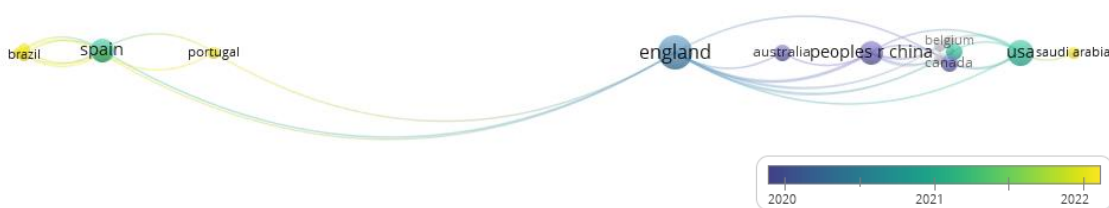


Figura 11 – Visão temporal da rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 2



Dentre os 26 países identificados no Eixo 3, a maior rede ficou sendo composta de 20 deles, os demais gerando nichos isolados, associados a autores ou grupos de pesquisa na Coreia do Sul, Polônia, República Tcheca, Romênia e País de Gales. Neste eixo, foram encontrados dois artigos com co-autoria brasileira, ambos de 2018, um acerca de detecção de anomalias no contexto da Batalha do Algoritmo de Detecção de Ataques (TAORMINA *et al.*, 2018), e outro acerca de gerenciamento de pressões com foco em controle de bombas de rotação variável e válvulas redutoras de pressão (BRENTAN *et al.*, 2018). Focando-se na atuação do Brasil, observa-se interação direta com Estados Unidos, França, Singapura, Israel, Alemanha, Inglaterra e Espanha.

Figura 12 - Rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 3

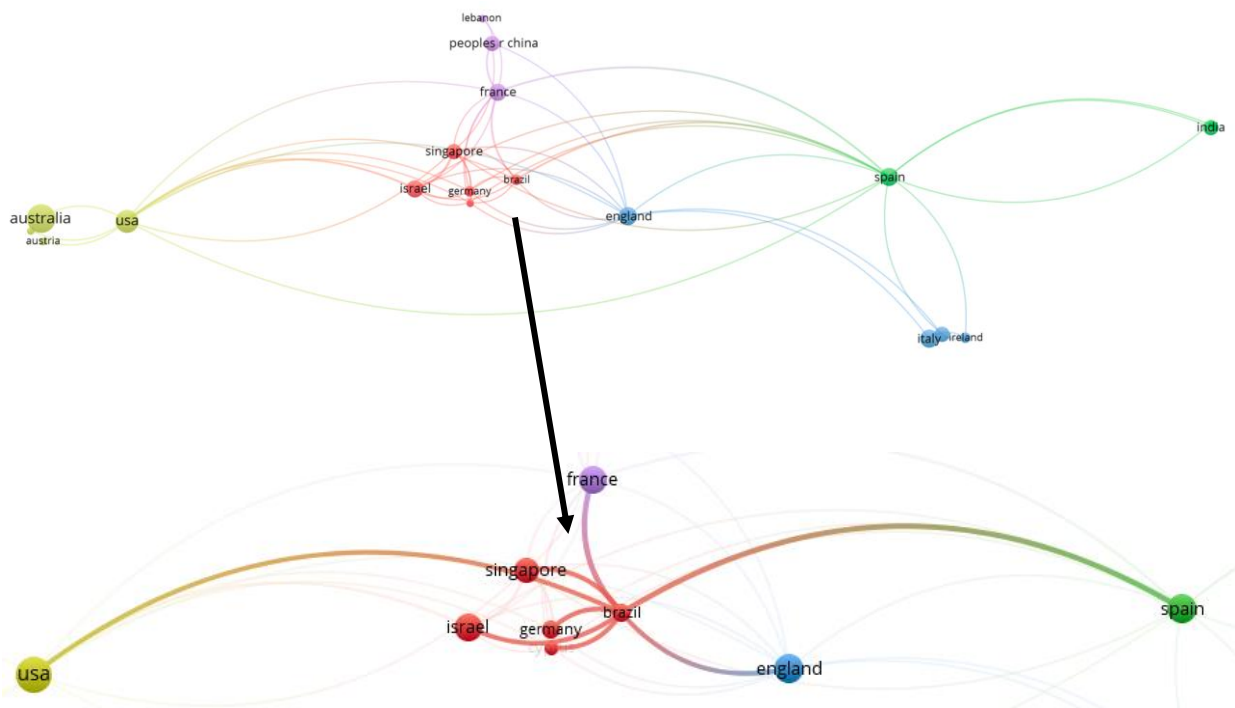
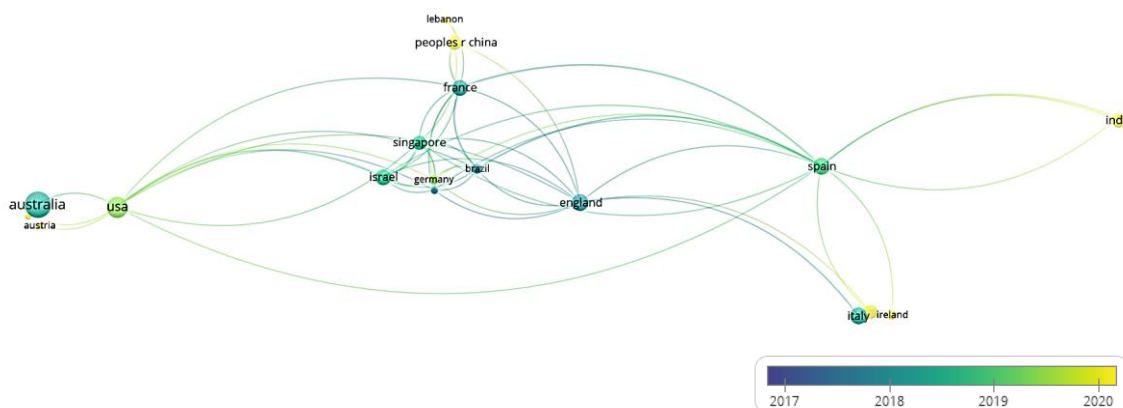


Figura 13 - Visão temporal da rede de co-autoria de países para os resultados do Eixo 3



Nos Eixos 1 e 2 (Figura 5 e Figura 6), Estados Unidos e Inglaterra lideram no número de produções acadêmicas que compuseram o repositório em estudo; no Eixo 3, Austrália assume a liderança (Figura 7) e, também aí, Inglaterra e Estados Unidos têm posição de destaque. Inglaterra, Estados Unidos, Austrália, China, Itália, Espanha e França correspondem a 60% dos países em co-autoria na totalidade do Repositório F.

5.1.4 Co-autoria de autores

No Quadro 18 tem-se os autores cujas somas de citações na Web of Science, para os artigos que compõem o repositório F Eixo 1, **excedem 70**.

Quadro 18 – Análise de co-autoria – Citações recebidas – Eixo 1

Autor	Nº de artigos	Citações
Wu, Z	2	162
Fu, G	2	152
Savic, D	4	136
Kapelan, Z	3	114
Sage, P	1	107
Turtle, D	1	107
Karadirek, ie	3	102
Muhammetoglu, A	3	102
Muhammetoglu, H	3	102
Butler, D	1	100
Diao, K	1	100
Farmani, R	1	100
Sweetapple, C	1	100
Ward, S	1	100
Giustolisi, O	2	84
Zhang, Q	2	78
Kara, S	2	77

No Quadro 19 são apresentados os autores cujas somas de citações na Web of Science, para os artigos que compõem o Repositório F Eixo 2, **excedem 15**. Comparativamente ao Eixo 1, a quantidade de citações dos artigos que compõem o Eixo 2 são significativamente menores, o que está relacionado à menor quantidade de artigos neste eixo, e ao fato de as publicações serem mais recentes.

Quadro 19 – Análise de co-autoria – Citações recebidas – Eixo 2

Autor	Nº de artigos	Citações
Beach, T	1	38
Howell, S	1	38
Rezgui, Y	1	38
Loucks, D	1	35
Ham, Y	1	31
Kim, J	1	31
Campos, J	1	24
Fuertes, P	1	24
Carot, M	1	24
Alzamora, F	1	24
Halfawy, M	1	23
Short, M	1	18
Twiddle, J	1	18
Liu, Z	1	16
Mbachu, J	1	16
Zhao, L	1	16

O Quadro 20 traz os autores cujas somas de citações na Web of Science, para os artigos que compõem o Repositório F Eixo 3, **excedem 60**. A quantidade de citações dos artigos que compõem o Eixo 3 é significativamente maior do que a do Eixo 2, e próxima à do Eixo 1, o que sugere que a cadeia de busca, aqui, por ter focado em temas complementares à modelagem hidráulica (terminologias relacionadas a monitoramento em tempo real, medição inteligente etc), encontrou artigos já mais consolidados, além de o volume de artigos nesse eixo ser o maior dentre os três.

Quadro 20 – Análise de co-autoria – Citações recebidas – Eixo 3

Autor	Nº de artigos	Citações
Stewart, R	8	157
Beal, C	2	101
Di nardo, A	2	98
Salomons, E	3	94

Autor	Nº de artigos	Citações
Galelli, S	3	91
Ostfeld, A	2	91
Taormina, R	2	91
Tippenhauer, N	2	91
Di natale, M	1	65
Santonastaso, G	1	65
Venticinque, S	1	65
Kapelan, Z	1	62
Romano, M	1	62

5.1.5 Co-citação de autores

O Quadro 21 aponta os autores mais citados nas referências dos artigos que compõem o repositório do Eixo 1, considerando-se apenas aqueles com no mínimo 10 citações; o Quadro 22 traz aqueles citados no Eixo 2, considerando-se mínimo 5 citações; e, o Quadro 22, os autores mais citados nas referências dos artigos do Eixo 3, com ao menos 10 citações.

Observa-se que há autores em comum na análise de co-autoria e co-citação, refletindo que o repositório de artigos considerado traz literatura relevante, uma vez que os autores mais citados na análise de co-citações são também representativos do banco de autores do próprio Repositório F.

Quadro 21 – Análise de co-citações - Autores citados pelos artigos do Eixo 1

Autor	Citações
Kanakoudis, V	29
Kapelan, Z	21
Wu, Z	20
Creaco, E	18
Giustolisi, O	18
Walski, T	18
Savic, D	14
Mounce, S	11
Rossmann, L	10
Todini, E	10

Quadro 22 - Análise de co-citações – Autores citados pelos artigos do Eixo 2

Autor	Citações
Sun, Cc	9
Diaz, S	7
Pauwels, P	6
Short, M	6
Curl, J	5
Fuertes, P	5
Tao, F	5

Quadro 23 - Análise de co-citações – Autores citados pelos artigos do Eixo 3

Autor	Citações
Liu, A	26
Taormina, R	20
Nguyen, K	19
Beal, C	18
Stewart, R	17
Cominola, A	15
Gurung, T	15
Boyle, T	14
Beal, C	12
Willis, M	12
Di nardo, A	11
Monks, I	11
Britton, T	10
Herrera, M	10

As Figura 14, Figura 15 e Figura 16 apresentam a rede de co-citações de autores, expandidas para autores com no mínimo 2 citações nos Eixos 1 e 2, e 3 citações no Eixo 3. Foi feita essa diferenciação pois, no Eixo 3, a quantidade de autores co-citados é significativamente maior do que nos demais, porém há menos autores que se destacam. Deve-se pontuar que, nesse tipo de análise, o VOSViewer considera apenas o primeiro nome do autor principal.

Os grupos de diferentes cores que o software organiza representam a proximidade entre os elementos da análise, ou seja, aqueles que estão mais próximos são geralmente citados juntos. Os elementos mais destacados representam os autores seminais, uma vez que associados a eles estão os maiores números de conexões que, nesse caso, representam citações. Observe-se que, no Eixo 1, há alguns autores que se destacam de forma mais evidente, o que não ocorre de forma tão clara nos demais Eixos.

Figura 14 – Rede de co-citações de autores com no mínimo 2 citações, para os resultados do Eixo 1

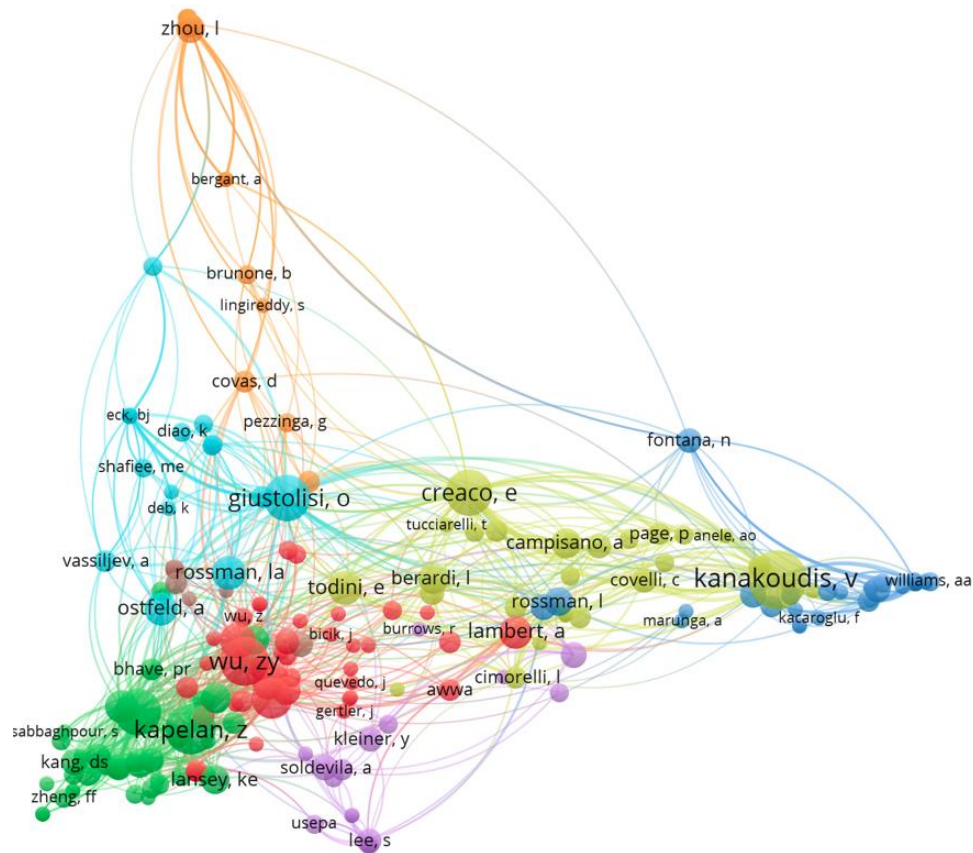


Figura 15 - Rede de co-citações de autores com no mínimo 2 citações, para os resultados do Eixo 2

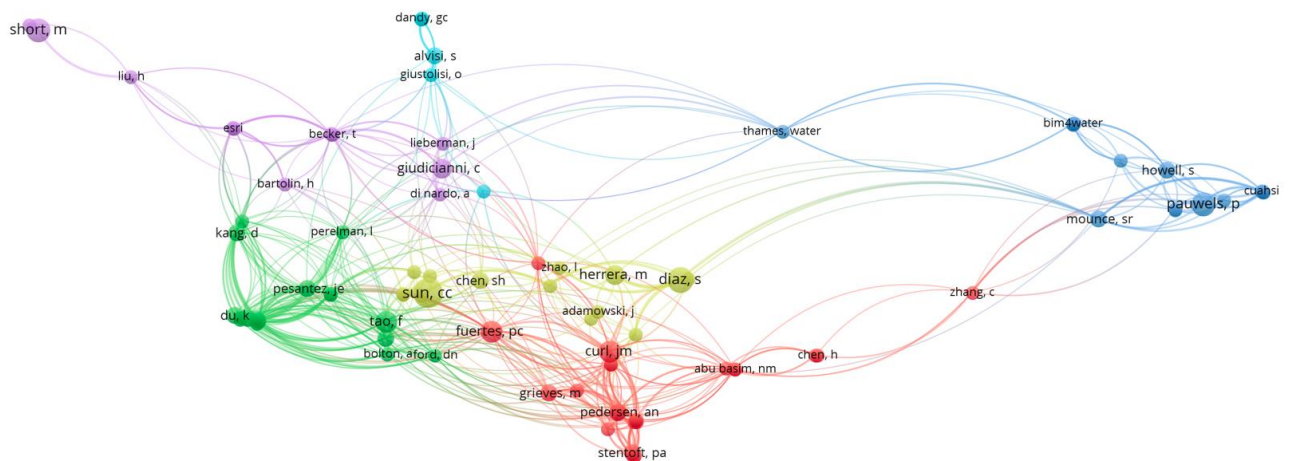
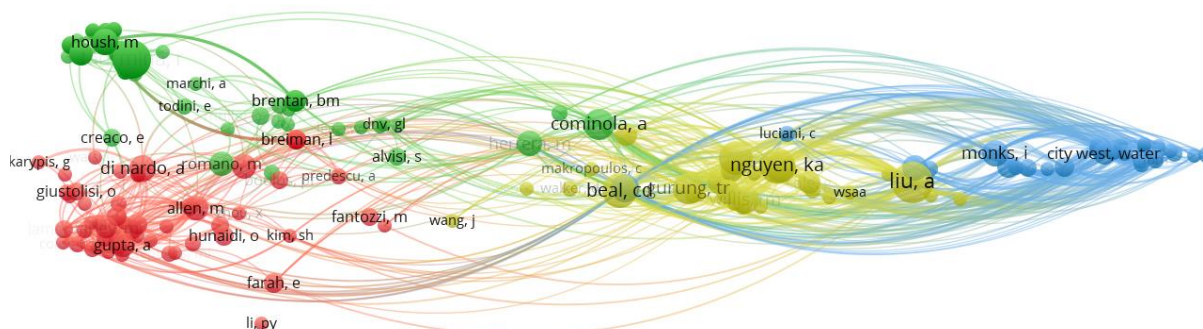


Figura 16 - Rede de co-citações de autores com no mínimo 2 citações, para os resultados do Eixo 3



5.1.6 Co-citação de fontes e referências

Outra análise possível é a de co-citações de fontes e referências, em que ficam evidenciados os periódicos responsáveis pela publicação dos artigos mais citados nas referências daqueles que compuseram o repositório. As 10 fontes e artigos mais citados no Eixo 1 são apresentados nos Quadro 24 e Quadro 25, respectivamente.

Quadro 24 – Periódicos dos artigos mais citados nas referências do Eixo 1

Periódico	Citações	ISSN
Journal of Water Resources Planning and Management	207	0733-9496
Journal of Hydraulic Engineering	84	0733-9429
Procedia Engineering	59	1877-7058
Urban Water Journal	46	1573-062X
Water Resources Management	32	1573-1650
Journal of Hydroinformatics	30	1465-1734
Journal American Water Works Association	26	1551-8833
Water	24	2073-4441
Environmental Modelling & Software	20	1364-8152
Water Resources Research	18	0043-1397

Quadro 25 – Artigos mais citados no Eixo 1

DOI	Citações recebidas pelos artigos do Repositório F	Artigo
doi 10.1080/15730620802613380	8	Quo vadis water distribution model
epanet 2 usersmanual	7	Manual EPANET
doi 10.1061/(asce)0733-9496(2010)136:1(116)	7	Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System
doi 10.1061/(asce)0733-9429(2007)133:8(927)	6	Calibration of Water Distribution Hydraulic Models Using a Bayesian-Type Procedure
doi 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000093	5	Calibration of Nodal Demand in Water Distribution Systems

DOI	Citações recebidas pelos artigos do Repositório F	Artigo
doi 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000691	5	Calibration of Water Demand Multipliers in Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms
doi 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000506	5	Inversion Model of Water Distribution Systems for Nodal Demand Calibration
doi 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000086	5	Real-Time Demand Estimation and Confidence Limit Analysis for Water Distribution Systems
doi 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000191	5	Battle of the Water Calibration Networks

Os Quadro 26 e Quadro 27 trazem as fontes e referências mais citadas no Eixo 2.

Quadro 26 – Periódicos dos artigos mais citados nas referências do Eixo 2

Periódico	Citações	ISSN
Journal of Water Resources Planning and Management	44	0733-9496
Automation in Construction	30	0926-5805
Water	19	2073-4441
Environmental Modelling & Software	18	1364-8152
Water Science and Technology	13	0273-1223
Journal of Infrastructure Systems	11	1943-555X
Procedia Engineering	11	1877-7058
Water Resources Management	11	0920-4741
Journal American Water Works Association	9	1551-8833
Sustainable Cities and Society	9	2210-6707

Quadro 27 – Artigos mais citados no Eixo 2

DOI	Citações recebidas pelos artigos do Repositório F	Artigo
doi 10.1080/1573062x.2020.1771382	5	Building and exploiting a Digital Twin for the management of drinking water distribution networks
doi 10.1002/awwa.1413	4	Digital Twins: The Next Generation of Water Treatment Technology
doi 10.2166/wst.2020.393	3	A critical review of the data pipeline: how wastewater system operation flows from data to intelligence
doi 10.17863/cam.32260	2	Gemini Principles
doi 10.1109/icieeimt.2017.8116804	2	Autobot for precision farming
doi 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000314	2	Urban Water Demand Forecasting: Review of Methods and Models

DOI	Citações recebidas pelos artigos do Repositório F	Artigo
doi 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000506	2	Inversion Model of Water Distribution Systems for Nodal Demand Calibration
doi 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000779	2	Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management
doi 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000741	2	Smart City Digital Twin–Enabled Energy Management: Toward Real-Time Urban Building Energy Benchmarking
doi 10.1109/access.2020.2998358	2	Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research

Os Quadro 28 e Quadro 29 trazem as fontes e referências mais citadas no Eixo 3.

Quadro 28 – Periódicos dos artigos mais citados nas referências do Eixo 3

Periódico	Citações	ISSN
Journal of Water Resources Planning and Management	137	0733-9496
Environmental Modelling & Software	75	1364-8152
Water	75	2073-4441
Procedia Engineering	73	1877-7058
Water Resources Management	61	0920-4741
Journal of Cleaner Production	53	0959-6526
Journal American Water Works Association	31	1551-8833
Urban Water Journal	30	1573-062X
Water Science and Technology - Water Supply	27	0273-1223
Resources, Conservation & Recycling	26	0921-3449

Quadro 29 – Artigos mais citados no Eixo 3

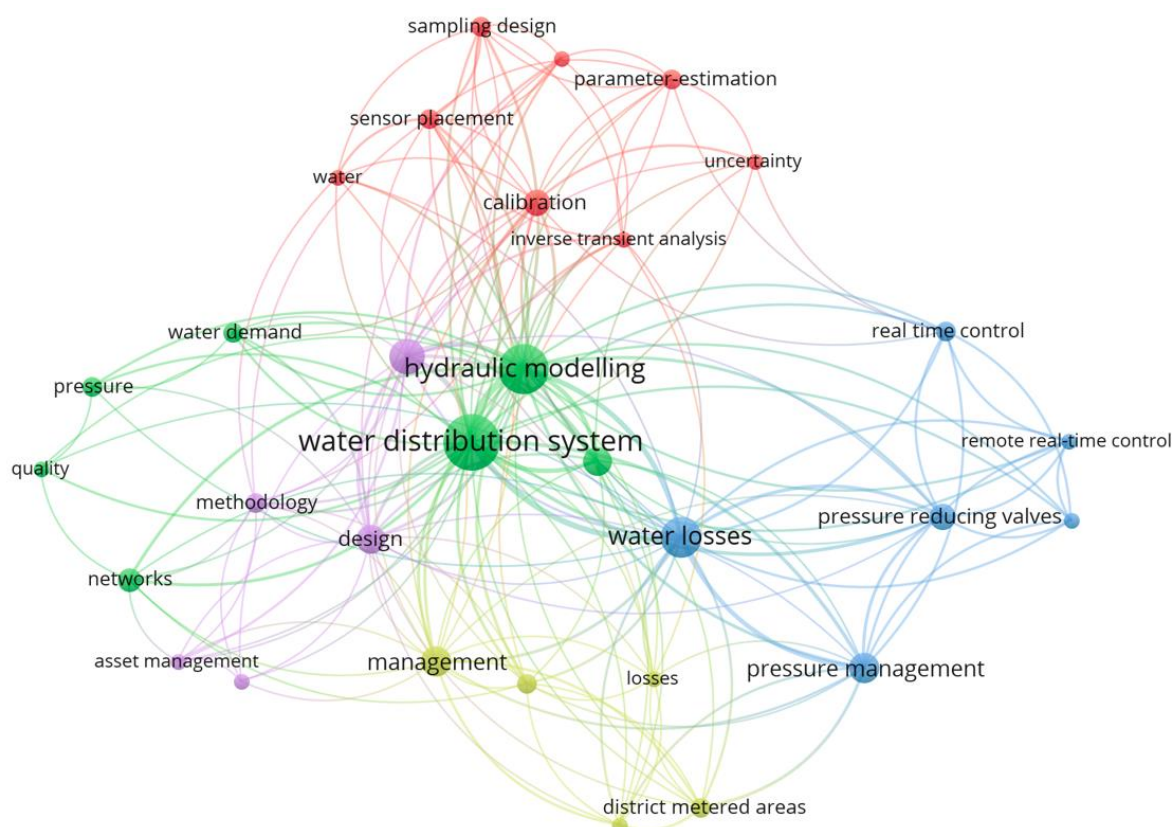
DOI	Citações recebidas pelo repositório selecionado	Artigo
doi 10.3390/w5031052	14	Intelligent Metering for Urban Water: A Review
doi 10.1016/j.jclepro.2013.05.018	9	Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management
doi 10.1080/07293681003767769	8	Web-based knowledge management system: linking smart metering to the future of urban water planning
doi 10.1016/j.envsoft.2015.07.012	7	Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A review
doi 10.1016/j.resconrec.2014.06.005	7	Smart meters for enhanced water supply network modelling and infrastructure planning
doi 10.1016/j.envsoft.2017.12.015	7	Re-engineering traditional urban water management practices with smart metering and informatics

DOI	Citações recebidas pelo repositório selecionado	Artigo
doi 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000749	7	Characterizing Cyber-Physical Attacks on Water Distribution Systems
doi 10.1016/j.resconrec.2015.05.008	6	Motivating metrics for household water-use feedback
doi 10.1016/j.envsoft.2018.03.006	6	Integrated intelligent water-energy metering systems and informatics: Visioning a digital multi-utility service provider
doi 10.2166/wpt.2012.089	5	Case study: a smart water <i>grid</i> in Singapore

5.1.7 Co-ocorrência de palavras-chave

A Figura 17 traz as 31 palavras-chave com no mínimo 2 ocorrências dos artigos do Eixo 1.

Figura 17 – Co-ocorrência de palavras-chave nos artigos do Eixo 1 - conjuntos

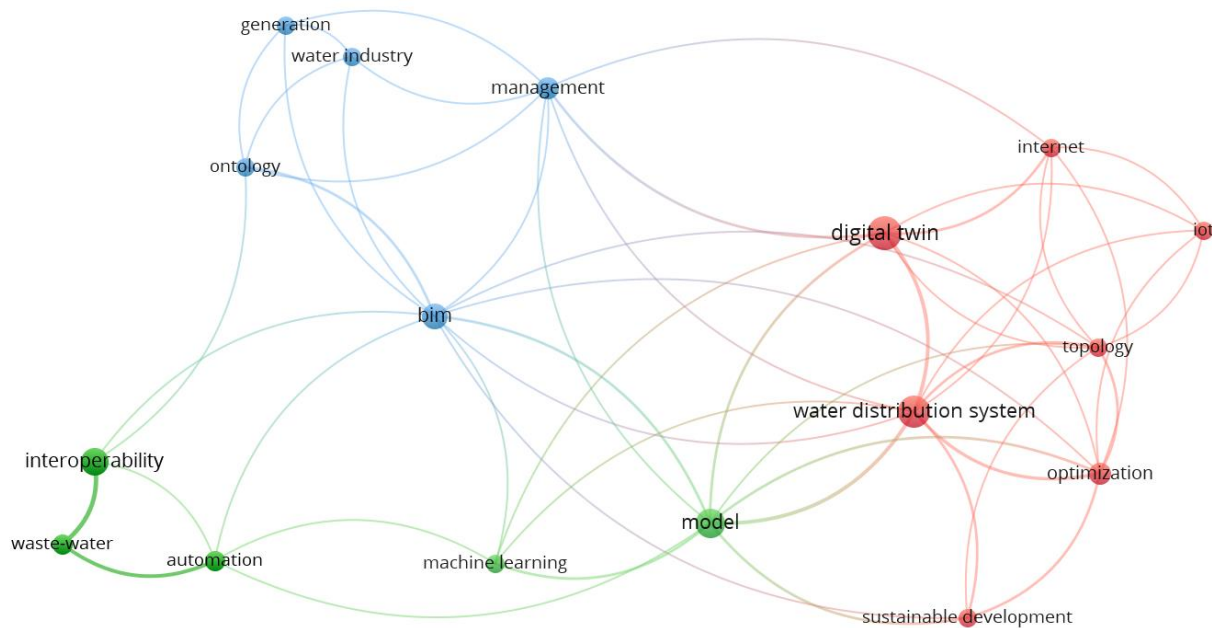


No Eixo 1, os termos identificados foram agregados em 6 conjuntos, podendo-se notar em maior destaque os termos “modelagem hidráulica”, “sistema de distribuição de água”,

“perdas de água”, “gerenciamento de pressões”, e “otimização”, evidenciando-se as temáticas centrais dos artigos selecionados.

A Figura 18 traz as 17 palavras-chave com no mínimo 2 ocorrências identificadas no Eixo. Neste caso, os termos foram agregados em 3 conjuntos, sendo que os termos de maior destaque foram “modelo”, “gêmeo digital”, “bim”, porém, diferentemente do observado no Eixo 1, não houve palavras-chave que se sobressaíssem do todo.

Figura 18 – Co-ocorrência de palavras-chave nos artigos do Eixo 2 - conjuntos

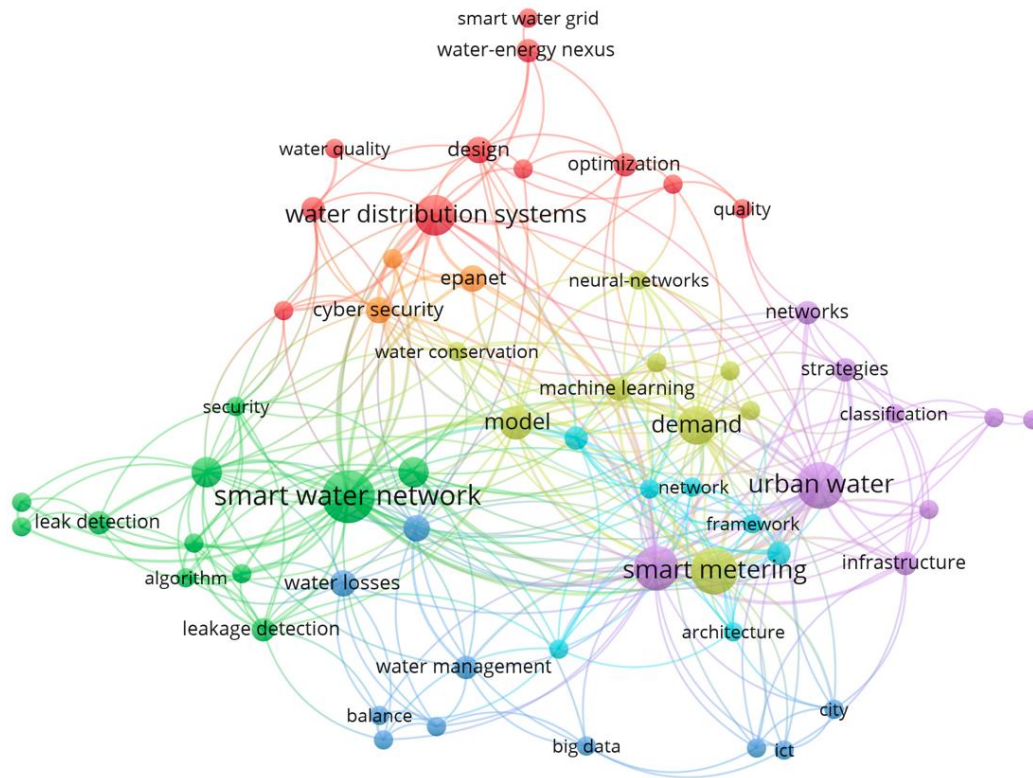


No Eixo 3, foram mapeados 7 conjuntos a partir de 60 palavras-chave com no mínimo duas ocorrências. Observa-se maior destaque em “sistemas de distribuição de água”, “gerenciamento”, “rede de água inteligente”, “medição inteligente”, “água urbana”, “gêmeo digital”.

O conceito de Internet das Coisas (IoT), diretamente relacionado à ideia de transformação digital, inicialmente remetia à possibilidade de conexão de equipamentos como eletrodomésticos à internet, e hoje também abrange uma ampla gama de dispositivos, sensores e atuadores, bem como serviços em nuvem e plataformas que fornecem interfaces com o mundo real. Tem por algumas de suas principais características o processamento de dados, interação com o ambiente e capacidades inteligentes e uma das grandes dificuldades em seu uso é a de criar plataformas genéricas, escaláveis, práticas e que possam integrar diferentes dispositivos e

fluxos de trabalho, portanto, demandando grande conhecimento de desenvolvimento de software, hardware e interação com o usuário (PREDESCU *et al.*, 2020).

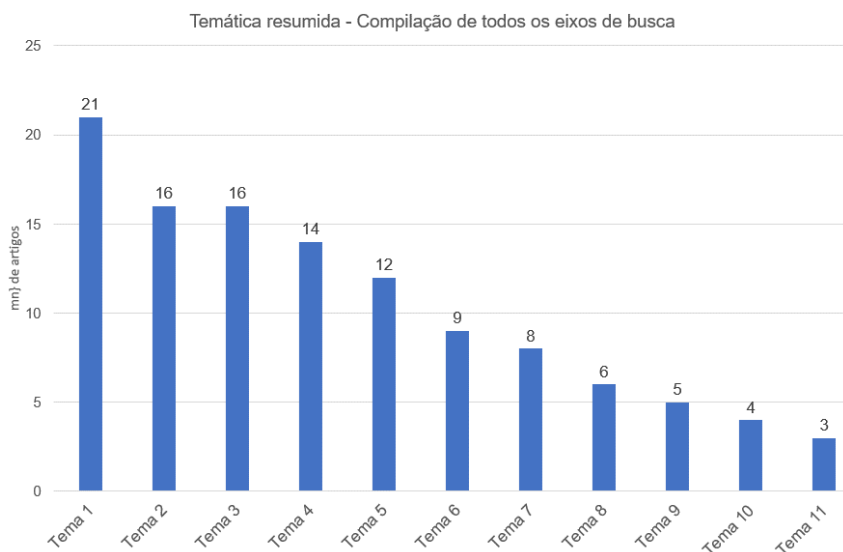
Figura 19 – Co-ocorrência de palavras-chave nos artigos do Eixo 3 - conjuntos



5.2 Temáticas centrais

Para organização do conteúdo, foi extraída a temática central de cada artigo (Figura 20 e Quadro 30) a partir da leitura de resumos, resultados e conclusões. Observa-se que a temática não é única, uma vez que existe interdependência entre assuntos; por exemplo, o tema “Identificação de padrões, calibração, previsão de demandas e rugosidade” frequentemente está associado à utilização de hidrômetros inteligentes, desagregação de padrões, previsão, alimentação e calibração de modelos hidráulicos, e redução de perdas. Desta forma, a discussão busca vincular os artigos com temas relacionados, a partir de uma visão temporal.

Figura 20 – Quantidade de artigos por tema



Tema	Descrição
Tema 1	Identificação de padrões, calibração, previsão de demandas e rugosidade
Tema 2	Detecção de vazamentos
Tema 3	Casos e benefícios do uso de tecnologias inteligentes (medição, comunicação)
Tema 4	Gerenciamento de pressões
Tema 5	Detecção de ataques e segurança cibernética
Tema 6	Integração topológica/ontologia
Tema 7	Gêmeos digitais
Tema 8	Modelagem hidráulica, planejamento e resiliência
Tema 9	Redes de água inteligentes
Tema 10	Modelagem em tempo real
Tema 11	Programa de feedback ao cliente

Fonte: Autora (2022)

Observando-se os quantitativos por tema e ano, no Quadro 30, nota-se que aproximadamente em 2015 o foco das produções se desloca de modelagem hidráulica, métodos de calibração de demandas, modelagem com fim de planejamento, para abordagens mais dinâmicas, ganhando maior evidências os assuntos voltados a monitoramento em tempo real, segurança cibernética e redes inteligentes. Assim, o software VOSviewer foi utilizado para gerar redes de palavras-chave para todos os artigos do repositório F, para conteúdos até 2015 e a partir de 2016.

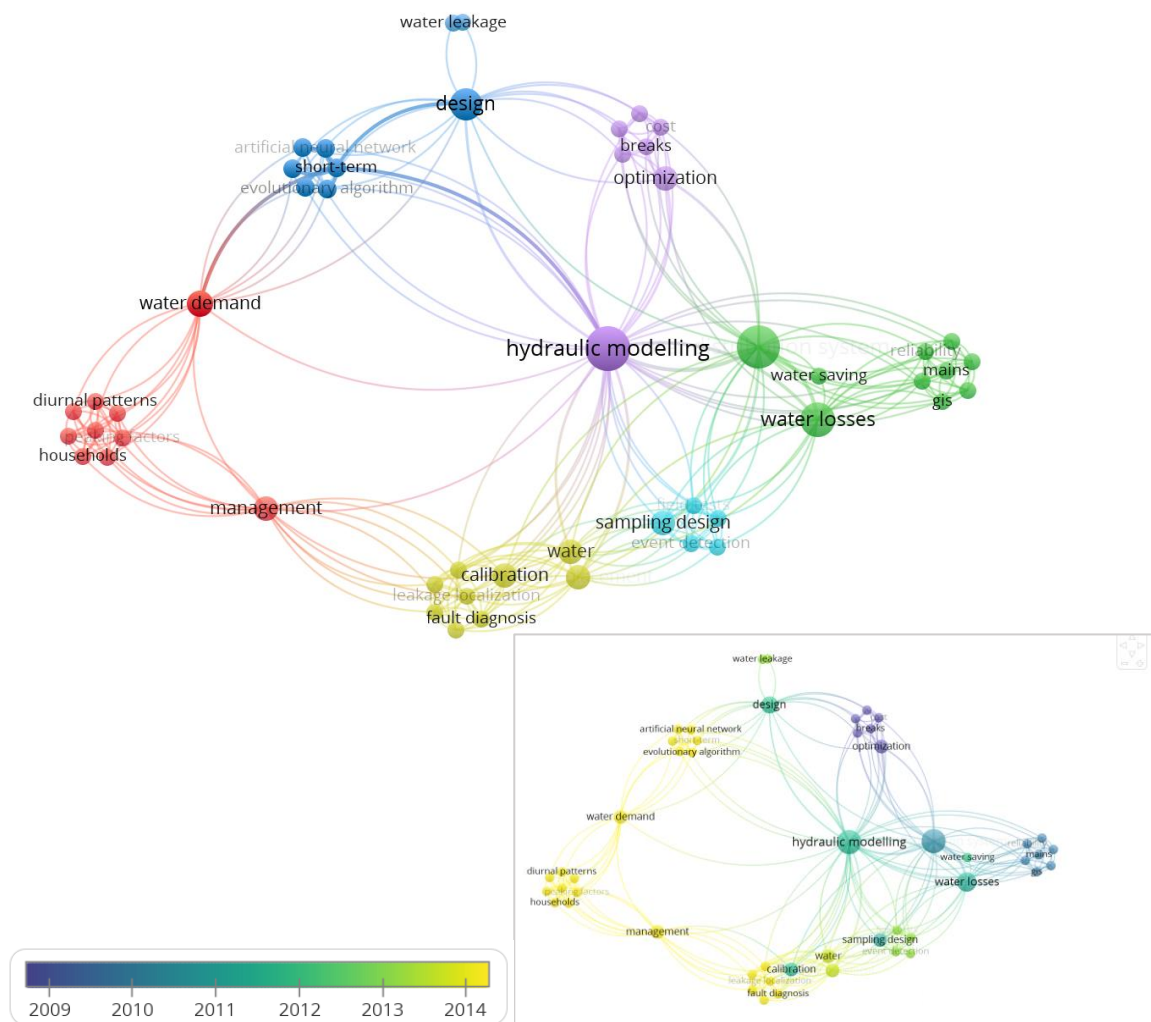
Quadro 30 – Compilação de temáticas centrais dos artigos de todos os eixos de busca

Temáticas centrais - todos os eixos	1992	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Total
Modelagem hidráulica, planejamento e resiliência	1		1		1			1			1				1			6
Identificação de padrões, calibração, previsão de demandas e rugosidade		1		1				1	2		1	2	3	1	3	5	1	21
Modelagem em tempo real						1			1		1			1				4
Deteção de vazamentos					1			1	1		2	1	1	2	3	1	3	16
Gerenciamento de pressões							1				2	3	1	2	3	1	1	14
Casos e benefícios do uso de tecnologias inteligentes (medição, comunicação)										1	1	1	1	1	5	6		16
Redes de água inteligentes										1					2	1	1	5
Programa de <i>feedback</i> ao cliente											1		1		1			3
Deteção de ataques e segurança cibernética												1	1	2	5	2	1	12
Integração topológica/ontologia					1							1	1	2		3	1	9
Gêmeos digitais														1	2	3	2	8

Fonte: Autora (2022)

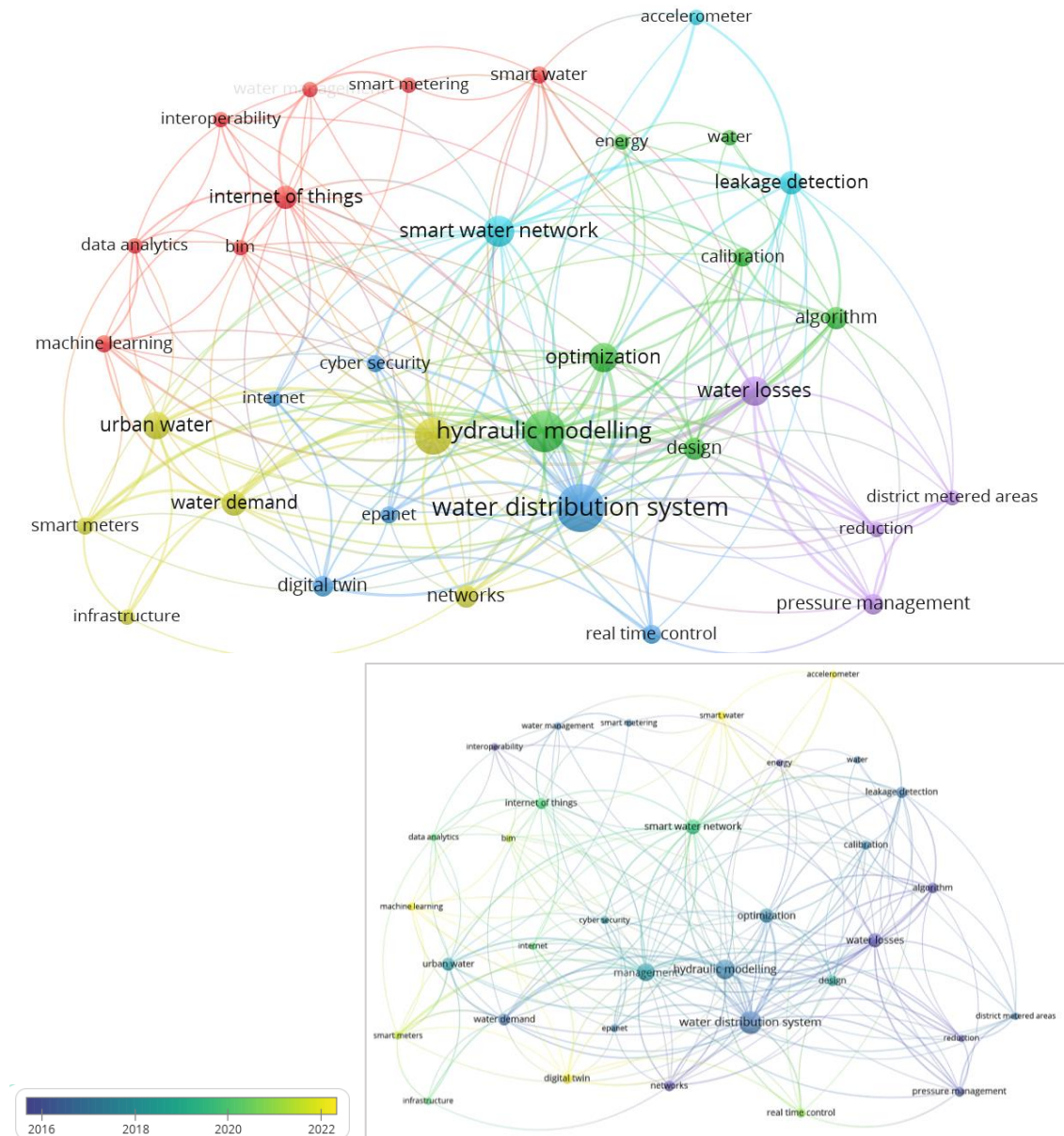
Até 2015, nota-se predominância do tema “modelagem hidráulica”, com produções mais antigas voltadas a controle de perdas, relacionando-se a gerenciamento de pressões, planos de reabilitação e substituição de redes, bem como a metodologias de detecção de vazamentos e otimização de posicionamento de sensores de monitoramento. Mais recentemente, especialmente com o advento dos *smart meters*, o foco de pesquisa vem se transladando para métodos de desagregação de demandas e identificação de padrões de consumo, bem como uso de tecnologias IoT para tratamento da grande quantidade de dados que passa a ser possível gerar e coletar.

Figura 21 – Co-ocorrência de palavras-chave de todo o repositório F, até 2015



A partir de 2019, aproximadamente, outros temas começam a entrar mais em evidência, como redes inteligentes, ferramentas de análise de dados mais avançadas para tratamento das informações de dispositivos e sensores inteligentes, e temas como segurança cibernética, interoperabilidade e gêmeos digitais também passam a tomar corpo.

Figura 22 - Co-ocorrência de palavras-chave de todo o repositório F, a partir de 2016



5.2.1 Modelagem hidráulica, planejamento e resiliência

Particionar uma rede significa subdividi-la em áreas menores e hidraulicamente independentes, chamados Distritos de Medição e Controle, as quais são usualmente delimitadas

por válvulas fechadas e contam, idealmente, com macromedidores na rede de entrada ao distrito, de modo a se facilitar a localização e redução de perdas a partir do gerenciamento de pressões, bem como o cálculo de balanço hídrico do sistema como um todo (DI NARDO *et al.*, 2013). Essa prática, porém, tem como desvantagem a possibilidade de queda na qualidade da água e redução da redundância do sistema, uma vez que as redes, ora projetadas em circuitos, passam a contar com diversas pontas secas e consequente redução de velocidade de escoamento, especialmente em casos em que a setorização, ou particionamento, foi realizado em um momento posterior à implantação completa do sistema. Por isso, esta deve ser planejada cuidadosamente e com uso do recurso de modelagem hidráulica, uma vez que essa permite a visualização e previsão dos parâmetros hidráulicos do sistema quando sujeito a variadas condições de operação (DI NARDO *et al.*, 2013).

Giustolisi; Kapelan; Savic (2008) desenvolveram método para análise da confiabilidade da rede de distribuição a partir de cálculo de pressões, vazões e demandas reais quando da mudança de topologia no sistema (fechamento de válvulas), tendo produzido um modelo com demandas dirigidas por pressão. A análise evidenciou que a segurança do sistema está relacionada ao dimensionamento das tubulações na rede pois, mesmo que haja circuitos, se não houver redundância, o sistema estará sujeito a queda de performance ainda que apenas um trecho da rede e suas respectivas demandas sejam desconectados. Di Nardo *et al.* (2013) utilizaram métodos de particionamento e algoritmos de otimização, de forma automatizada, para a delimitação de DMCs em uma região de Nápoles, sistema sem redundância e que, portanto, oferecia poucas possibilidades de setorização sem queda evidente na performance. Ramos; Carravetta; Nabola (2020) também tratam do tema de resiliência, evidenciando a importância de um sistema robusto capaz de manter pressões moderadas quando em situações usuais, e garantir o atendimento de eventos de emergência.

Com integração entre modelo hidráulico e *SIG*, Tabesh; Delavar; Delkhan (2010) desenvolveram uma ferramenta para planos de reabilitação de sistemas de abastecimento, com base em análise de rompimentos de tubos e vazamentos, performance hidráulica e de qualidade e segurança mecânica, e não apenas em função do número de ocorrências de rupturas, metodologia essa mais usualmente empregada. Outro diferencial do estudo é justamente a integração com uma base de dados georreferenciada, o que permite a inserção e visualização de atributos, facilidade presente em softwares comerciais de modelagem hidráulica.

Mais tarde, Diao *et al.* (2016) irão tratar da resiliência global do sistema, a partir de análise de cenários variando o nível de stress aplicado, considerando três categorias de eventos: falhas em tubulações, demanda excessiva para controle de incêndios e entrada de contaminantes na rede, concluindo que um sistema pode ser mais seguro quanto a algum desses eventos, ao mesmo tempo que mais frágil com relação a outros. Por exemplo, reforços de redes e conectividade entre reservatórios, embora garantam “folga” hidráulica para o atendimento do crescimento natural ou extremo de demandas, oferecem um risco a mais quando da entrada de contaminantes, ou podem agravar a queda na qualidade da água distribuída em casos de baixa demanda.

5.2.2 Identificação de padrões, calibração, previsão de demandas e rugosidade

Rugosidade é um dos parâmetros hidráulicos causadores de incertezas em redes de distribuição, uma vez que variam em função da idade da tubulação, qualidade da água e características do material, e ao longo dos anos tem sido apresentadas abordagens para calibração de rugosidades de forma independente ou em conjunto com calibração de demandas. Essa última, por sofrer maior variabilidade no curto prazo, é a maior responsável pelas incertezas nos resultados da modelagem (DO *et al.*, 2016).

Sumer; Lansley (2009) afirmam que todas as variáveis em uma rede de distribuição são incertas, mas como é inviável trabalhar com todas essas variáveis aleatórias, o usual é utilizar rugosidade como um parâmetro de calibração, e tomar como certas as demandas a que o sistema está sujeito. Além disso, comumente as medições de pressão não são feitas em momentos de sobrecarga e, para situações médias de vazão, é possível chegar a uma calibração razoável através de um largo espectro de possibilidades de rugosidade, o que não significa que o modelo será suficientemente acurado para prever as pressões quando ocorrerem esses eventos extremos. Por este motivo é necessário e tem sido estudadas metodologias para calibração, buscando superar incertezas. Métodos numéricos de calibração simultânea de rugosidade e demandas têm sido estudados, observando-se limitações quanto à necessidade de conhecimento prévio acerca da topologia e das características físicas do sistema, tais como diâmetros e comprimentos de tubos, curvas de bombas e *status* de válvulas; bem como quanto à performance dos métodos em situações de demandas não usuais (XIE; ZHANG; HOU, 2017; ZHANG *et al.*, 2018; ZHOU *et al.*, 2018). Também considerando premissas similares quanto ao conhecimento de parâmetros hidráulicos, Momeni *et al.* (2021) criaram uma *framework* baseada em dados de pressão, vazão

e demandas medidos de forma síncrona, e modelo hidráulico, algoritmo evolucionário e redes neurais, com o objetivo de gerar uma plataforma de avaliação de condições de tubos em termos de rugosidade e diâmetro interno efetivo. Os diâmetros efetivos foram preditos com maior acurácia do que a rugosidade, e as análises foram mais sensíveis a medições de pressão do que de vazão, tendo-se notado que o que fez mais diferença na precisão dos resultados foi a otimização do posicionamento dos sensores.

Do *et al.* (2016) aplicaram método de otimização de seleção de pontos de monitoramento de pressão e vazão em campo, para calibração de padrões de demanda usando algoritmos genéticos. Shao *et al.* (2019) fizeram uso de abordagem bayesiana formal para determinar as demandas nodais com base em dados passados.

Davidson; Bouchart (2006) desenvolveram um trabalho voltado à calibração de demandas em quase tempo real, a partir de dados de SCADA, com um método de cálculo de parâmetros de demandas nodais em oposição a parâmetros de tubulações, como é mais comum. Romano; Kapelan (2014) também utilizaram dados de hidrômetros inteligentes, de DMC no Reino Unido, em conjunto com redes neurais evolucionárias, para previsão de demandas no curto prazo.

O entendimento mais detalhado sobre perfis de consumo anuais, mensais, diários e horários, bem como de períodos de pico, mais facilmente obtíveis a partir de informações coletadas por medidores inteligentes, é um dos alicerces para um novo modo de planejamento e gerenciamento de ativos no setor da água (COLE; STEWART, 2013).

A redução dos picos de consumo pode aliviar a pressão sobre sistemas de abastecimento e, por conseguinte, reduzir necessidade e custos com ampliações e reforços (COLE; STEWART, 2013). Os recursos de medição inteligente podem auxiliar nesse sentido, inclusive através do envolvimento do usuário final e também com ajuste de tarifas durante e fora de períodos de pico.

Com a mudança de paradigma advinda dos sensores e medidores inteligentes e maior interesse em modelagem em tempo real, é necessário reavaliar como as demandas serão tratadas, uma vez que dados históricos de consumo não evidenciam eventos anômalos, como controle de incêndio ou outras situações de emergência (CREACO; PEZZINGA; SAVIC, 2017). Os recursos de medição inteligente têm alavancado, na última década, o uso de modelos

hidráulicos como ferramenta de apoio à tomada de decisões operacionais em tempo real, em oposição aos objetivos de projeto e planejamento a que a modelagem mais comumente atendia (SHAFIEE *et al.*, 2020).

Outros trabalhos voltaram-se à identificação de padrões de demanda com apoio em dados obtidos por hidrômetros inteligentes. Cole; Stewart (2013) e Gurung *et al.* (2014) fizeram a desagregação de demandas em hora de pico, dia de pico e mês de pico, com identificação de consumo doméstico e irrigação. Embora não tenha sido um estudo de modelagem hidráulica, o produto é um recurso para tal, uma vez que trabalha o refinamento de demandas a partir de dados continuamente obtidos por hidrômetros inteligentes, em DMCs de Hervey Bay, Austrália.

Metodologias baseadas em algoritmos de agrupamento foram desenvolvidas para identificação de padrões de consumo (PADULANO; DEL GIUDICE, 2018; RAHIM *et al.*, 2021), e também padrões associados a erros de medição e consumos anômalos (PADULANO; DEL GIUDICE, 2018).

Shafiee *et al.* (2020) criaram um método para atualização de dados de demanda obtidos com hidrômetros inteligentes no modelo hidráulico, a partir de integração entre modelo EPANET e a infraestrutura de medição por meio de *Dynamic Demand Assignment*, portanto, sem interromper a simulação. Pesantez *et al.* (2022) integraram um modelo hidráulico a uma infraestrutura avançada de medição para avaliar os impactos das mudanças em padrão de consumo, observadas durante a pandemia de COVID-19, no funcionamento do sistema de distribuição de água.

Antzoulatos *et al.* (2020) desenvolveram uma plataforma unificada para gerenciamento de sistemas de abastecimento, com emprego de hidrômetros inteligentes, soluções IoT, telemetria para controle e monitoramento de consumo, em conjunto com processos de aprendizagem de máquina para identificação de padrões por trás de picos de consumo e para a predição de demandas. Tratou-se de um estudo piloto, tendo sido observado quedas de performance e níveis de serviço providos pela plataforma conforme aumentava o número de usuários, o que indica a necessidade de redes mais robustas para coleta e transmissão de dados.

5.2.3 Modelagem em tempo real

O projeto Water Sentinel, em Singapura (WaterWise@SG), implantado em 2009, é uma das principais referências que aparecem nas redes de ocorrência geradas no VOSviewer. Trata-se de um projeto de coleta e processamento de dados de modo contínuo, em uma rede de abastecimento real, vinculada a um modelo hidráulico *on line*. Compõe a rede de sensoriamento sem fio do sistema de distribuição de água de Singapura, cujos principais objetivos eram a aplicação de uma rede sem fio de baixo custo para monitoramento *on line* dos parâmetros hidráulicos do sistema; desenvolvimento de sistemas para detecção remota de vazamentos e previsão de rompimentos de tubulações, e monitoramento integrado de parâmetros hidráulicos e de qualidade (ALLEN *et al.*, 2011).

Boulos *et al.* (2014) discutem sobre o sistema de abastecimento de Las Vegas Valley Water District, que desde de 2006 contava com modelos de simulação em tempo real para desenvolver planos de operação diários, gerenciar consumo de energia e qualidade da água, calibrar modelo hidráulico, planejar interrupções no abastecimento e gerenciar respostas de emergência. O estudo de caso teve por objetivo descrever o desenvolvimento do modelo em tempo real e a aplicação de modelagem operacional. Em linhas gerais, o processo consiste em uma componente de previsão de demandas, de ciclagem de reservatórios e ferramentas de seleção e otimização de operação de bombas. O plano de operação diária é transferido para uma base de dados corporativa para validação e baixada pelo operador do SCADA, para colocá-lo em execução e garantir a segurança do processo, sendo que o operador tem autonomia para interferir no processo em caso de emergência. Ao final do dia, o histórico de operação real é gerado e comparado ao plano inicial, sendo que discrepâncias significativas nos registros SCADA podem ser averiguadas. Além disso, o modelo é calibrado diariamente, e anualmente diversos pontos de monitoramento de pressão, vazão e níveis de reservatórios são também averiguados.

Kara *et al.* (2016) propuseram a integração entre sensores de monitoramento e sistema SCADA, realizada para um DMC real de Antalya, Turquia, responsável por abastecer cerca de 60 mil pessoas. A rede de monitoramento conta com sensores de pressão, vazão e de monitoramento de qualidade da água, com temperatura, turbidez, cloro e outros. A integração possibilitou a visualização de tendências espaciais e temporais nos parâmetros monitorados; controle remoto de todos os reservatórios, bombas e válvulas; detecção e localização

aproximada de eventos de vazamentos. Os autores reportam, ainda, que já existia um modelo hidráulico em base *SIG*, mas esse foi utilizado para análises *offline* e não vinculado ao sistema de monitoramento.

Abu-Mahfouz *et al.* (2019) desenvolveram uma *framework* para modelagem hidráulica dinâmica em tempo real voltada à redução de perdas, tendo por pontos focais detecção de vazamentos inerentes (*background leakage*), gerenciamento de pressões e previsão de demandas no curto prazo (na próxima hora). Todavia, no estudo, esses três componentes foram testados de forma separada, sendo indicado pelos autores, em trabalhos futuros, sua integração dentro da *framework*.

Com as descrições dos projetos de monitoramento em tempo real, nota-se a dificuldade de manutenção de um modelo hidráulico *on line*, haja vista apenas dois artigos tendo evidenciado esse feito.

5.2.4 Detecção de vazamentos

Farley; Mounce; Boxall (2013), Wu; Sage; Turtle (2010) e Zhang *et al* (2016) trataram de detecção de vazamentos, trazendo ponderações sobre a importância do posicionamento dos sensores no sistema de modo a refinar os resultados. Wei *et al.* (2020) pontuam que a forma mais evidente de se fazer o monitoramento de um sistema dinâmico de forma abrangente seria o uso de sensores em cada junção existente na rede, porém, como isso não é factível, e também devido à dificuldade de acesso e manutenção a esses sensores em tubulações enterradas, fica evidenciada a importância de se otimizar a alocação de sensores no sistema.

Algoritmos de otimização, sejam eles genéticos ou não, foram usados de forma recorrente para fins de otimização desta distribuição, ainda que os estudos tenham sido conduzidos em escala piloto ou em ambientes controlados. Em testes conduzidos por mais de três meses, observou-se falsa detecção de vazamentos nos instrumentos registradores de pressão, por que esse parâmetro normalmente já oscila mais do que vazão, ficando evidenciado que, caso apenas medição de pressão fosse utilizada para detecção de vazamentos e rompimentos, a frequência de alarmes falsos seria maior (FARLEY; MOUNCE; BOXALL, 2013). Portanto, registros de vazão são mais confiáveis para esse fim, e as pressões ajudam a refinar a localização do evento (FARLEY; MOUNCE; BOXALL, 2013; ZHOU *et al.*, 2019).

Wu; Sage; Turtle (2010) destacam que, até então, os métodos de detecção de vazamentos eram fundamentalmente baseados em balanço hídrico, como a diferença entre vazão medida na entrada do setor e a demanda, sendo que a última era uma combinação entre consumos medidos e estimados, e a perda total era distribuída nos nós da rede de forma proporcional ao número de ligações ou ao comprimento das redes. O método proposto, de detecção de vazamentos dirigidos por pressão, tem potencial inclusive para detecção em tubulações de plástico, para as quais métodos acústicos disponíveis até então eram menos eficientes.

Meseguer *et al* (2014) criaram uma ferramenta para detecção de vazamentos passível de ser utilizada por pessoas não especializadas em métodos de otimização, sendo baseada em SIG, com interface amigável e conectada a um sistema SCADA. Embora no estudo de caso realizado, em Nova Icaria, Barcelona, tenha sido alcançado um nível satisfatório de localização de vazamentos, os autores relatam que algumas das limitações da ferramenta é a necessidade de um modelo hidráulico com topologia e parâmetros bem calibrados, acurácia na distribuição de demandas e precisão dos sensores presentes na rede.

A partir de meados de 2016, os temas dos artigos coletados que se voltavam à detecção de vazamentos, focaram em estratégias de gerenciamento de pressão para localização e redução de perdas inerentes, tanto de energia elétrica quanto de água, efetivamente. Giustolisi *et al.* (2016) apresentaram as estratégias adotadas na “Battle of Background Leakage Assessment for Water Networks”, em sua maioria baseadas em algoritmos genéticos para otimização de operação de bombas, níveis de reservatórios e alocação de válvulas redutoras de pressão, e também em julgamento de engenharia para decisão sobre substituições de redes.

Farah; Shahrour (2017) utilizaram medições de pressão e vazão em tempo real, em conjunto com o método de balanço hídrico, para aprimorar o método de mínimas vazões noturnas, gerando alarmes quando um determinado limite de vazão fosse excedido. A adaptação considerada foi, ao invés de usar interpretação manual e julgamento humano, aplicar médias móveis e desvios padrão móveis aos registros de vazão obtidos. Em um DMC real no Reino Unido (SOPHOCLEOUS; SAVIĆ; KAPELAN, 2019), utilizou-se algoritmo genético para primeiramente reduzir a área de busca, e depois localizar o vazamento em uma área equivalente a 10% do comprimento do sistema analisado. O método proposto deve ser aplicado a um

sistema já calibrado e se mostrou capaz de identificar vazamentos que provocassem uma perturbação no sistema superior ao erro de medição dos equipamentos de monitoramento.

Zhou *et al.* (2019), tendo desenvolvido uma estrutura de aprendizagem profunda para localização precisa de rompimentos de tubos em um distrito em potencial, a partir da coleta de dados complementares de pressão em tempo real em locais delimitados e por curtos períodos de tempo, evidenciaram a relevância da otimização de alocação de sensores para detecção de vazamentos de baixa intensidade, especialmente, devido à possibilidade de que esses acabem confundidos com flutuações em demanda.

Gong *et al.*, (2020); Stephens *et al.* (2020) reportam o impacto de um sistema de monitoramento acústico contínuo, feito por meio de acelerômetro, na identificação antecipada de rompimentos de tubulação de ferro fundido corroídos ou frágeis. O estudo foi conduzido em um sistema real, no centro comercial de Adelaide, Austrália, em um programa que foi lançado em 2017. Foi possível identificar 55% dos rompimentos que estavam em desenvolvimento e diferenciar vazamentos circunferenciais e longitudinais: o primeiro se desenvolve mais rápido e se estabiliza quando a carga que contribuiu para sua ocorrência é aliviada; o segundo, todavia, demora semanas a meses para desenvolver um nível de ruído equivalente ao do primeiro e ser identificado. Os dados coletados pelos sensores são transmitidos via rede 3G, e uma das limitações observadas foi o intervalo espacial que os acelerômetros conseguem rastrear e o alcance da transmissão. Zhang *et al.* (2022) desenvolveram rede neural convolucional para avaliar os registros de ondas acústicas coletadas por esses mesmos acelerômetros acústicos, tendo possibilitado classificar os dados em ruídos associados a anomalias (vazamentos) ou outros tipos de ruídos ambientais. Com o reconhecimento de eventos anômalos, um modelo auxiliar é ativado para identificar se aquele evento é planejado, como irrigação, ou emitir um alarme, caso negativo.

Fabbiano; Vacca; Dinardo (2020) propuseram uma metodologia de detecção de vazamentos baseada na medição do status de vibração radial de tubulações na rede, assumindo-se que a variação de energia transmitida pelas paredes do tubo pela componente radial da vibração, causada pela turbulência do tubo, estaria relacionada ao vazamento.

Momeni; Piratla (2021) desenvolvem um método de detecção de perdas a partir da incorporação de redes neurais em um algoritmo genético para predição de coeficientes de vazamento em uma rede de literatura. Método teórico, tendo por limitações, dentre outras, o

fato de se assumirem conhecidos os locais de vazamentos e todos os outros parâmetros hidráulicos e físicos do sistema.

Ramos *et al.* (2022) definiram uma metodologia para agregação de medição em tempo real, monitorada e gerenciada por supervisor, e método de otimização para identificação de anomalias e consequentes vazamentos, e controle de VRP inteligente a partir das mensurações em campo. Concluiu-se que a estratégia auxiliou para maior rapidez de detecção de vazamentos e, por conseguinte, na redução de perdas. Essa abordagem, todavia, foi mais simplificada, no sentido de que as demandas foram assumidas conhecidas e inseridas como dado de entrada no modelo. Kowalski; Kowalska; Suchorab (2022) também aplicaram estratégia semelhante, integrando sistema SCADA, SIG (ArcGIS) e software de modelagem hidráulica (WaterGEMS) para uso das ferramentas de calibração automática e detecção de vazamentos, em um sistema piloto de uma rede de distribuição real. O método facilitou a detecção de vazamentos e, após três meses de testes e validações, deixou de demandar monitoramento e interpretação constantes dos sensores e dados coletados.

5.2.5 Gerenciamento de pressões

O envelhecimento e deterioração de tubulações e outros elementos causam perdas inerentes, que tem uma característica diferente de vazamentos devido a rompimentos, pois são mais discretas e, assim, permanecem por mais tempo (GERMANOPOULOS, 2007). Devido à queda de pressão na rede causada pelo aumento na rugosidade das tubulações e das perdas que já ocorrem, é usual incrementar-se a pressão de recalque de bombas, o que acaba provocando ainda mais perdas e consequente redução de eficiência (GIUSTOLISI *et al.*, 2016).

Controle de pressão, controle ativo de vazamentos, velocidade e qualidade dos reparos e gestão de ativos são as principais formas de gerenciamento de perdas reais (LAMBERT; MCKENZIE, 2002). Principalmente em situações de redes antigas e deterioradas, a estratégia de controle de pressão é a mais efetiva dentre os métodos de redução de perdas, pois a ocorrência de picos de pressão e de ondas de transiente influenciam na taxa de vazamento, sendo que vazamentos preexistentes são mais sensíveis às pressões médias, uma vez que permanecem por mais tempo e são dirigidos por pressão (GIUSTOLISI *et al.*, 2016; LAMBERT; MCKENZIE, 2002).

Karadirek *et al.* (2012) estudaram a redução de perdas a partir do gerenciamento de pressões, para tanto, um modelo hidráulico foi construído e calibrado com base em monitoramento de pressão e vazão em alguns DMCs de Antalya, Turquia. Nesse estudo, conduzido há cerca de uma década, não foi utilizado demanda dirigida por pressão, e sim dados mensais de hidrometria. O modelo permitiu identificar zonas de alta pressão e, com base nisso, foi feita a alocação de VRPs.

Covelli *et al.* (2016) utilizaram algoritmos genéticos e modelo hidráulico simplificado para otimização de quantidade e posicionamento de VRPs; Kanakoudis e Gonelas (2016) definiram uma metodologia para cálculo de benefícios econômicos e impactos na arrecadação a partir da redução de pressão com apoio de modelo hidráulico, tendo feito uso de setorização e válvulas redutoras de pressão; Page; Abu-Mahfouz; Yoyo (2017) trabalharam com otimização de operação de VRPs para redução de pressão no sistema e consequente redução de perdas, com base em monitoramento em tempo real e controle não paramétrico; Page; Creaco, (2019) utilizaram controles em tempo real baseados em pressão e vazão para operação de VRPs.

De Marchis *et al.*, (2014) já apontava a possibilidade de uso de PATs (Pumps As Turbine), bombas centrífugas operadas em modo reverso, como turbinas, para aproveitar a energia cinética disponível no sistema para gerar energia elétrica, ao invés de dissipá-la por meio unicamente de VRPs. No repositório teórico objeto desta dissertação, a partir de 2017 fica mais em evidência o uso de tal recurso. Muhammetoglu *et al.* (2017) avaliaram a implantação de uma PAT em um sistema real que abastecia cerca de 25 mil pessoas, na Turquia, tendo observado redução de 50 m³/h em perdas decorrentes do controle de pressão (de um total de vazão da ordem de 300 m³/h), bem como geração de energia da ordem de 7kWh no primeiro mês de operação. Patelis, Kanakoudis, Gonelas (2017) avaliaram diversas possibilidades de uso de PAT em substituição a VRP em DMCs de um sistema que abastece cerca de 50 mil pessoas, na Grécia, tendo observado que, embora exista a possibilidade de redução de pressão e geração de energia, o controle de pressão por esses equipamentos não é tão eficiente quanto de VRPs, e que a indisponibilidade de meios de transmissão da energia gerada no local pode inviabilizar sua aplicação. Borge-Diez *et al.* (2021) descrevem a implantação de pico turbina no sistema de Las Palmas de Gran Canaria, Espanha, em situações de baixas e altas pressões disponíveis, evidenciando benefícios e dificuldades de implantação a depender das configurações do sistema. Giudicianni *et al.* (2020) propuseram particionamento dinâmico de redes com integração de micro-geradores de energia para redução de perdas e de consumo de energia

elétrica, alcançando maior resiliência para com diferentes estratégias de gerenciamento e controle de pressão, tendo integrado, também, o uso de PATs.

Brentan *et al.* (2018) propuseram algoritmo de otimização em quase tempo real para gerenciar conjuntamente bombas de rotação variável e VRPs, aprimorando a eficiência operacional. Um modelo de previsão de demandas também foi acoplado ao algoritmo, de modo a atualizar as demandas no modelo hidráulico, reduzindo as incertezas desse parâmetro, e auxiliar na identificação de regimes operacionais otimizados.

Em uma ilha na Grécia, cuja demanda de água varia muito em decorrência de turismo e que, por conta disso, o sistema sofre com oscilações significativas de pressão, modelagem hidráulica foi utilizada para avaliar as consequências, em pressão e qualidade da água, de uma setorização previamente proposta. Os testes consistiram em avaliar o tempo de trânsito da água em uma situação antes da setorização, apenas setorização e setorização com as VRPs, observando-se potencial queda na qualidade da água devido a quedas em velocidade de fluxo. Foi proposta, então, uma nova setorização, evitando-se pontas secas, para balancear os critérios de redução de pressão e manutenção da qualidade da água (PATELIS; KANAKOUDIS; KRAVVARI, 2020).

5.2.6 Casos e benefícios de uso de tecnologias inteligentes (medição, comunicação)

Existe um crescente interesse no campo de aplicações de medidores inteligentes, que começou com os mercados de gás e energia elétrica e, mais recentemente, tem se tornado foco de pesquisas no campo da indústria da água (BOYLE *et al.*, 2013; ALVISI *et al.*, 2019), uma vez que representam um recurso importante nas estratégias de combate a perdas de água.

Beal; Flynn, (2015) conduziram uma pesquisa acerca dos programas de medição e redes inteligentes que estavam sendo implantados na Austrália à época, tendo sido observada a possibilidade de um caso de negócio especialmente para concessionárias que almejam redução de custos operacionais, redução de compra de água bruta ou adiamento de investimentos em aumento de infraestrutura. Paralelamente, dentre as dificuldades mais citadas para planejamento e implantação de um programa de medição inteligente, citou-se com frequência a falta de um caso de negócio que evidenciasse e quantificasse o retorno financeiro dos investimentos, bem como limitações quanto ao conhecimento para lidar com diferentes tecnologias. Dentre os benefícios, o mais evidente deles remete à redução de perdas.

Kulkarni; Farnham (2016) analisam casos de *Smart water* em duas concessionárias na Europa, elaborando considerações sobre conectividade sem fio e custo proprietário para seleção de soluções, uma vez que a questão da comunicação é central na implementação de estratégias de gerenciamento. Propõem uma *framework* para apoio na avaliação dos custos que diferentes soluções de comunicação podem impor e das consequências que a escolha pode trazer.

Farah; Shahrour (2018) apresentam *feedback* sobre um programa de medição inteligente que foi implantado em um campus universitário na França, responsável por abastecer cerca de 25 mil pessoas, monitorando as alimentações dos edifícios e dos pontos de entrada d'água. Com o programa, foi possível detectar vazamentos tanto nas unidades consumidoras quanto nas redes, a partir dos dados de medidores inteligentes instalados e métodos de balanço hídrico e mínimas vazões noturnas.

March *et al.* (2017) fizeram uma série de entrevistas para identificar potenciais benefícios e desvantagens do uso de hidrômetros inteligentes em Alicante, Espanha. Benefício econômico ainda não é tão claro, devido ao curto intervalo de tempo com que essa tecnologia tem sido utilizada, e à possibilidade de aumento no custo da água no futuro (MARCH *et al.*, 2017; MONKS *et al.*, 2019). Dentre as vantagens alcançadas, podem-se citar identificação de padrões de consumo, redução de custo com mão-de-obra, redução do consumo e incremento na eficiência do sistema, desenvolvimento de esquemas de preço para segmentos de usuários e em função da oscilação de consumo, engajamento do usuário e detecção de consumos anômalos (MARCH *et al.*, 2017). Com relação à visão do usuário, pode-se gerar um “efeito Big Brother” devido ao monitoramento contínuo, bem como rejeição da tecnologia por parte da sociedade. No mais, diferentemente do que é comumente discutido, os autores pontuam o risco de a água se tornar, efetivamente, uma *commodity*, com o padrão de uso baseado exclusivamente no seu custo, o que pode se concretizar especialmente quando se tratando da parcela financeiramente vulnerável da população. Essa pode acabar forçosamente alterando seus padrões de consumo, devido a uma demanda reprimida, reduzindo ainda mais consumos já baixos e essenciais (MARCH *et al.*, 2017).

Monks *et al.*, (2019); Monks *et al.*, (2020) mapearam, a partir de entrevistas com experts da indústria da água na Austrália e revisão de literatura do setor, potenciais benefícios do uso de hidrômetros inteligentes, tanto do ponto de vista do prestador de serviço quanto do usuário. Os autores identificaram 8 facilitadores de mudança a que idealmente os prestadores de serviço

devem se atentar para alcançar benefícios: i) leitura automática do medidor usando infraestrutura avançada; ii) aprimorar a previsão de demanda e receita a partir de métodos avançados de análise de dados; iii) estabelecer alertas de vazamentos; iv) estabelecer um portal de dados para os usuários; v) fazer cobranças mensais (na Austrália, a cobrança de energia elétrica e abastecimento de água comumente se dá a cada 3 meses); vi) estabelecer balanço hídrico detalhado de DMCs temporários e permanentes; vii) estabelecer capacidade de análise de dados de medições e uso final; viii) aumentar o conhecimento sobre os ativos e os consumidores.

Rahim *et al.* (2020) identificaram os potenciais e limitações do uso de aprendizado de máquina e análise de dados para o uso das informações geradas por medidores inteligentes. Os temas frequentes identificados em literatura foram *feedback* sobre uso de água, previsão de demandas, perfis de consumo, categorização de eventos de consumo e análise socioeconômicas. Dentre as evidências mais significativas, os autores observaram que quanto mais personalizado o programa de medição inteligente, mais efetivo é para a redução de consumo. Ainda, que as informações coletadas são muitas vezes subutilizadas, com poucas soluções avançadas de aprendizado de máquina e análise de dados, como aprendizagem profunda, detecção de anomalias e outras.

Slaný *et al.* (2020) desenvolveram estudo piloto focado no projeto, implementação, otimização e verificação de uma solução para medição inteligente de consumo e identificação de falhas, refletindo os conceitos tecnológicos de Cidades Inteligentes e Indústria 4.0, como integração de dados e interoperabilidade. A funcionalidade da plataforma IoT proposta foi verificada em laboratório e depois em escala real; a propagação de sinal na área municipal também foi testada. O objetivo do estudo era a implantação de um sistema IoT para monitoramento contínuo de demandas e identificação de vazamentos, com solução modular que pode se adequar às necessidades do prestador e da área a ser monitorada. Cassidy *et al.* (2021) reportaram a utilização de ferramentas de monitoramento de vazão e hidrometração em tempo real para a categorização de eventos de rompimentos, avaliação dos impactos nas perdas de água e identificação de ineficiências operacionais, bem como redução de perdas aparentes devido à melhor acurácia no cálculo de erros de medição.

Com uma abordagem diferente dos demais estudos, Müller-Czygan *et al.* (2021) tiveram por motivação identificar o desbalanço entre as diversas soluções inteligentes que surgem a

partir de meados de 2015 no mercado, e o que tem sido feito com esses recursos em um contexto real. Foram conduzidas revisão de literatura e mercado, entrevista, pesquisa com especialistas e *workshops* para identificação do *status* do processo de digitalização do setor, bem como dificuldades. Evidenciou-se que há muito enfoque em soluções técnicas e pouca discussão acerca dos processos e da dinâmica para a mudança de paradigma do manual para o automatizado. Diferentemente do que ocorre em fábricas da indústria 4.0, o setor da água não pode ser totalmente automatizado, sendo necessária a participação ativa de pessoal de operação. Foram levantados fatores de relevância para o progresso de soluções de digitalização, sendo que os mais citados foram necessidade de projetos piloto e boas práticas, valor adicionado reconhecível, aceitação por parte de funcionários e definição de um “dono de projeto”, ou seja, critérios não técnicos.

5.2.7 Redes de água inteligentes

Li; Yang; Sitzenfri (2020) apontam para a falta de consenso acerca do conceito de sistemas de água inteligentes, propondo dois aspectos chave que podem definir até que ponto um sistema é inteligente: *Smartness*, que seria o lapso de tempo entre a entrada e saída de dados no sistema, idealmente menor do que 15 minutos e tendendo a tempo real; e *cyber wellness*, que avalia a segurança cibernética e tem por objetivo armazenar a maior quantidade de dados antes de qualquer ataque cibernético, e responder a este de modo simultâneo, com a mínima perda de informação.

Os artigos desta temática trataram principalmente de *smart water grids*, trazendo conceituações, exemplos de aplicações e abordagens que tem sido utilizadas para aprimorar a segurança e eficiência de redes de distribuição de água. Lee *et al.* (2015) argumentam que *smart water grids* são baseadas em soluções de tecnologia da informação e comunicação com foco em segurança do abastecimento e consumo de água a energia, devendo ser pautadas em 5 aspectos principais: i) plataforma integrada de comunicação; ii) garantia de fontes de água, tanto convencionais quanto alternativas, dentro daquela rede, de forma a gerar um esquema de gerenciamento parcialmente descentralizado; iii) redes inteligentes, com capacidade de comunicação bidirecional entre seus elementos, para controle do sistema tanto na plataforma de ICT quanto a partir das estruturas físicas e possibilidade de operação dentro de um conjunto de processos ou de modo isolado; iv) gerenciamento baseado em monitoramento em tempo real

e tecnologias de previsão; e v) integração entre *smart water grids* e *smart power grids* para maior eficiência e segurança energética.

Smart water Grids são redes de abastecimento em que os consumidores estão conectados a um sistema de telemetria capaz de ler e transmitir dados de medição de consumo, permitindo a coleta de um volume significativo de dados e, por conseguinte, servindo como recurso para identificação de padrões de consumo (COMINOLA *et al.*, 2018; PADULANO; DEL GIUDICE, 2018).

Ramos *et al.* (2020) desenvolveram um estudo de implantação de uma *smart grid*, visando à redução de perdas de água e de consumo de energia elétrica, fundamentando em gerenciamento de redes inteligentes, com previsão de investimento em sensores de pressão e redução de perdas. Koo *et al.* (2021) descrevem um laboratório vivo de *smart grid* que fica em uma Ilha na Coreia do Norte, contando com dispositivos inteligentes de monitoramento desde a captação de água, tratamento, reservação, distribuição e até o consumidor final, atendendo a cerca de 8 mil pessoas. O estudo descreve o desenvolvimento desta *smart water grid*, lançada em 2012, e as tecnologias envolvidas no gerenciamento das fontes de abastecimento e distribuição, estratégias de planejamento, controle e operação do sistema, a infraestrutura de medição inteligente, comunicação bidirecional e as soluções operacionais adotadas. Pontuam-se algumas fragilidades do sistema, dentre elas, a qualidade dos dados coletados e impactos decorrentes de mal funcionamento ou falhas; a importância de aprimorar métodos de previsão de demandas e a avaliação da necessidade de uso de modelagem dirigida por pressão para melhor identificação de vazamentos.

5.2.8 Programa de *feedback* ao cliente

Cahn; Katz; Ghermandi (2020) fizeram entrevistas em grupo para 3 sistemas de abastecimento de Israel, com a participação de 6 pessoas em cada um, acerca da opinião dos usuários sobre aplicativos para monitoramento de consumo, visando obter uma visão inicial sobre o impacto dessa iniciativa na redução de consumo. Apesar da limitação da amostra, notou-se pouco interesse dos usuários pelas soluções, exceto para o caso de informações sobre vazamentos, ficando evidente a importância da personalização do conteúdo, assim como pontuado por Rahim *et al.* (2020). Liu *et al.* (2016) criaram uma estrutura de programa de *feedback* ao cliente, com base em dois programas implantados na Austrália, para servir como referência para a criação desse tipo de solução. A estrutura apresenta um panorama dos

principais aspectos a serem levados em consideração para o projeto, implementação, e avaliação de programas de retorno ao cliente em conjunto com tecnologias inteligentes.

5.2.9 Detecção de ataques e segurança cibernética

Com o avanço no uso de tecnologias digitais nos sistemas de abastecimento de água, também aumenta a necessidade de segurança cibernética, e com esta, o desenvolvimento de metodologias para detecção de ataques. No escopo do Repositório F desta pesquisa, isso se evidencia a partir de 2017, aproximadamente. Addeen *et al.* (2021) conduziram uma pesquisa sobre os tipos de ataques cibernéticos mais comuns e mecanismos de detecção, comparando métodos, resultados, vantagens e limitações. Foram identificadas algumas classes de ataques, a saber: i) ataques a sensores, alterando a leitura de dados críticos; ataques a atuadores, induzindo ações erradas e que podem interromper ou prejudicar o serviço; iii) ataques a sistemas de controle, normalmente tendo sistemas supervisórios como alvo; iv) ataques a programadores lógicos, “confundindo” a operação do sistema; v) ataques a redes de comunicação, podendo prejudicar a comunicação entre sensores, atuadores, SCADA e outros componentes de hardware ou software.

Taormina *et al.* (2017) desenvolveram uma ferramenta capaz de identificar sensores e CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) mais vulneráveis, e de especificar o tipo de ataque, simulando no EPANET. Identificou-se que a resposta ao ataque depende das condições iniciais do sistema e da demanda nos nós, sendo possível obter o mesmo tipo de resultados para diferentes ataques, o que sugere que, além da detecção de qual elemento está sendo invadido, também é necessário detectar comportamentos anômalos. Indicam a importância de estudos sobre a injeção intencional de contaminantes em tubos, reservatórios e outros elementos.

A “Batalha dos Algoritmos de Detecção de Ataques” (TAORMINA *et al.*, 2018), foi um evento cujo objetivo foi a comparação da capacidade de diferentes algoritmos de detectar ataques cibernéticos em uma rede real, de médio porte, controlada por controladores lógicos e SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Dentre as conclusões apresentadas após o evento, tem-se que a disponibilidade de dados SCADA, nem sempre possível, é um diferencial para a detecção acurada de ataques; a modelagem de sistemas dirigidos por demanda, característica do caso utilizado, é um limitante em termos de detecção de variações em pressão e qualidade da água; existe necessidade de distinção entre anomalias causadas por ataque e outras, como disfunção no registro de níveis de reservatórios, as quais podem gerar

resultados coincidentes. Abokifa *et al.* (2019) desenvolveram algoritmo baseado em redes neurais artificiais que foram treinadas para compreender padrões passados e identificar comportamentos divergentes, solução capaz de detectar todas as simulações de ataque apresentadas na batalha. Taormina *et al.* (2019) desenvolveram uma ferramenta de código aberto para simulação de cenários de ataque e avaliação das consequências, via EPANET, possibilitando o uso de análise dependente de pressão ou demanda, em situações de pressão suficiente ou deficiente.

Com maior foco em detecção de contaminações, sejam acidentais ou propositais, os artigos analisados trataram de método de otimização de pontos de amostragem de qualidade da água para rastreamento da intrusão de contaminantes (WEI *et al.*, 2020); otimização e adaptação da distribuição de sensores em função do número e localização de suspeitas fontes de contaminação (SHAHRA; WU, 2020). Saab; Shahrour; Chehade (2020) trabalharam com avaliação de risco de contaminação acidental, com base em sensores de monitoramento em tempo real. Observou-se que a amplitude de desvios e o tempo de duração identificada pela abordagem proposta em relação aos parâmetros definidos para a análise de riscos sinalizam uma suspeita de contaminação, possibilitando sua detecção precoce.

Salomons; Sela; Housh (2020), colocam em pauta o problema da perda de privacidade por parte dos consumidores atendidos por hidrômetros digitais, uma vez que o refinamento das informações coletadas está associada à rotina do indivíduo e pode, inclusive, prejudicar a aceitação de tais instrumentos pela sociedade. Os autores desenvolveram algoritmos e aplicações que podem ser vinculadas ao hidrômetro inteligente de modo a amortecer os registros de consumo final, porém, sem prejudicar funcionalidades essenciais desse tipo de recurso para a concessionária, como a possibilidade de detecção de consumos anômalos e vazamentos.

Moazeni; Khazaei (2021) injetaram dados de medição adulterados em sistemas de monitoramento de bombas, induzindo altas pressões em pontos específicos do sistema e desviando dos métodos de detecção de validade de dados. O ataque simulado foi capaz de identificar, para o sistema avaliado, o número de bombas que criariam o efeito em cascata mais destrutivo, e também quais bombas mais provavelmente seriam alvos.

5.2.10 Integração topológica/ontologia

Nos domínios de *smart grids* e cidades inteligentes, a pesquisa frequentemente foca em desenvolver e aprimorar modelos que facilitem troca de dados, possibilitem a integração de sistemas legados e promovam boa performance e segurança. Com o crescente interesse em medição inteligente no contexto da indústria da água, é interessante que ocorram trocas de conhecimento com a pesquisa já mais consolidada em *smart grid* (HOWELL; REZGUI; BEACH, 2017), que começou com o setor elétrico (FANG *et al.*, 2012).

Halfawy (2010) pontua que, até 2010, pouca atenção vinha sendo dada ao desenvolvimento de sistemas e modelos de dados integrados para gerenciamento de infraestrutura, observando-se alguns trabalhos focando em técnicas e modelos de apoio para gerenciamento de infraestruturas isoladas. Dessa forma, o autor evidencia algumas problemáticas comuns no armazenamento e troca de informações no setor de infraestrutura: armazenamento de dados de forma isolada, em diferentes departamentos e comumente em duplicata e de forma inconsistente; necessidade frequente de tradução ou reinserção em diferentes softwares, de forma ineficiente e sujeita a erros; visão parcial dos dados disponíveis, sem possibilidade de gerar uma visão global de modo prático; além de ineficiência em coleta, acesso, compartilhamento e gerenciamento de informações.

Halfawy (2010) desenvolveu *framework* focando na integração de dados para gerenciamento de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Propôs a distribuição de elementos em classes e subclasses, como ocorre no IFC, mas usando GML; a caracterização física e hierárquica de elementos e, ainda, a possibilidade de vinculação dos elementos a características externas, como nome da rua. Outras classes, como parâmetros hidráulicos - que permitiriam, por exemplo, que o modelo fosse usado para simulação hidráulica e análise de riscos - também foram incorporadas aos elementos. Foi necessário criar alguns "adaptadores" para rodar na *framework* desenvolvida softwares comumente usados pelas concessionárias, como EPANET, e foi possível acessar o banco de dados espacial do sistema diretamente pelo EPANET, bem como fazer simulações, a partir de ferramentas do último e do ArcGIS. Em suma, foi desenvolvida uma arquitetura para agregar dados de diferentes fontes para fins de gerenciamento de sistema de abastecimento de água e esgotamento sanitário, considerando-se um protótipo para a cidade de Regina, no Canadá.

Mais recentemente, a pesquisa tem se voltado a melhorar tendências de consumo de água a partir de estudos de precificação baseados em demanda, interfaces de *feedback* ao usuário e dispositivos inteligentes, evidenciando um novo campo voltado à integração de BIM, dispositivos e sensoriamento inteligentes, e cibernética (HOWELL; REZGUI; BEACH, 2017).

Com o uso de medidores inteligentes, a quantidade de dados aumenta de forma significativa; assim, soluções abrangentes e capazes de interpretar informações de múltiplas fontes tornam-se cada vez mais necessárias, e ontologias são tecnologias para assumir esse papel, sendo essenciais para a aquisição, estruturação e filtração de conhecimento (MOUNCE *et al.*, 2010). Ontologias descrevem conceitos, relações, propriedades de dados e restrições dentro de um determinado domínio, visando um determinado sistema alvo, e de uma forma que possa ser lida por máquinas (HOWELL; REZGUI; BEACH, 2017). Dessa maneira, são um meio de promover a interoperabilidade.

Howell; Rezgui; Beach (2018) desenvolveram uma ontologia da cadeia de valor da água, composta de três partes: física, social e cibernética. A primeira como uma extensão *SIG* e integração com EPANET, descrevendo os ativos da rede física e suas propriedades; a segunda, descrevendo as organizações e pessoas envolvidas na cadeia, como prestadores de serviço, órgãos fiscalizadores, governos locais e cargos dentro das organizações; a terceira, descrevendo sensores, atuadores, dados e software no ambiente de tecnologia da informação e comunicação que suporta o gerenciamento da rede. Possibilita integração com leituras de sensores e emissão de alarmes.

Zhao; Liu; Mbachu (2019) fizeram extração dos dados do BIM para *SIG* por meio do IFC, empregando-se as entidades capazes de armazenar informações sobre trechos de rede, conexões, válvulas e reservatórios; em *SIG*, foram armazenadas em CityGML, padrão oficial e aberto suportado por variadas plataformas *SIG*, tendo sido definidas regras topológicas para adequada conexão entre os elementos. De maneira sucinta, a metodologia consistiu em integrar BIM e *SIG* usando mapeamento semântico, desenvolver o modelo 3D e validar regras topológicas para identificação de conflitos entre o sistema proposto e seus entornos. Obteve-se como resultado um modelo que agrega as vantagens tanto do BIM quanto do *SIG*, facilitando processos de planejamento uma vez que o primeiro disponibiliza informações paramétricas das redes e dispositivos, enquanto que o segundo produz a visualização 3D no contexto da cidade e permite o desenvolvimento de análises.

Alvisi *et al.* (2019) desenvolveram uma solução de medição inteligente interoperável com outras tecnologias, de modo a contornar a problemática recorrente de propriedade de dados, dependência dos softwares e recursos providos por fornecedores, bem como de falta de controle sobre a infraestrutura de coleta de dados. A solução tem como cerne o *Smart water Metering Middleware (SWaMM)*, um *middleware* sem fio que é capaz de fazer a interface com diversas soluções *smart* que operem sob diferentes protocolos de comunicação. Obtiveram-se resultados favoráveis, mas com diferentes alcances, a depender do protocolo de comunicação associado a cada tipo de hidrômetro incluído no estudo.

Kamunda *et al.* (2021) investigaram os elementos BIM atualmente utilizados na indústria da água, e buscaram compreender a cultura organizacional que apoie essa mudança de paradigma. Identificou-se que, no Reino Unido, o uso se dá para fins de projeto, a partir de softwares comerciais como Autodesk Revit, Civil 3D e de realidade virtual. Os benefícios evidenciados foram visualização 3D e extração de cronogramas de obra.

Gilbert *et al.* (2021) propuseram um algoritmo espacial para inferir as conexões entre modelos hidráulicos em escala urbana e BIM, com o intuito de obter melhor conhecimento acerca das conexões do sistema, visando à garantia de adequados níveis de serviço (citam-se clientes especiais, como hospitais, onde não podem ocorrer grandes flutuações no abastecimento); otimização de particionamento de redes; planejamento e redundância do sistema bem como prevenção de danos a ativos durante escavação. Destacam que o georreferenciamento das informações no modelo BIM é relevante para que a inferência ocorra de forma mais confiável e que, ao se atingir critérios adequados de georreferenciamento nos modelos BIM disponíveis, em alinhamento com o modelo hidráulico, a inferência não seria necessária.

Alani *et al.* (2021) desenvolveram uma ontologia cujo objetivo é representar o produto com um alto nível de detalhamento que é útil e aplicável à indústria da água do Reino Unido, de modo a aprimorar o processo de aquisição durante as fases de operação e manutenção das infraestruturas. Dentre diversas outras dificuldades reportadas que justificam a ineficiência em aquisição de dados de produto, validação e estruturação está a falta de um sistema de classificação unificado para ativos da indústria da água

Singh; Anumba (2022) propuseram um método de integração entre BIM, inteligência artificial, aprendizado de máquina e técnicas de otimização para geração e otimização de

cronograma de instalação de tubulações, provendo informações sobre os componentes do sistema, bem como mapeando os eventos para evitar sobreposições de atividades, tempo e custo. Embora o estudo não tenha se voltado à modelagem hidráulica, nota-se que a abordagem pode se comunicar com estratégias de planos de renovação de tubulações de distribuição de água, se aliada à identificação de tubulações críticas, possível por meio da modelagem hidráulica, SIG e dados históricos de monitoramento de pressões e vazões.

5.2.11 Gêmeos digitais

Autiosalo *et al.* (2020), a partir de análise de literatura, colocam que um gêmeo digital deve ter algumas peculiaridades que descrevam suas funcionalidades técnicas, não sendo necessário que todas estejam presentes, mas algumas sendo prioritárias a depender da área de aplicação: “conexão de dados, acoplamento, identificador, segurança, armazenamento de dados, interface do usuário, modelo de simulação, análise de dados, inteligência artificial e computação”.

Pedersen *et al.*, (2021) argumentam que Gêmeos Digitais são uma representação sistemática dos elementos e interações de um sistema físico real, estruturada com um conjunto de recursos que se conectam e comunicam a partir de padrões para dados abertos. Uma das características mais importantes é a vinculação com modelos de simulação e análise de dados avançada. Os autores propõem uma distinção entre “gêmeos digitais vivos” e “gêmeos digitais prototípicos”. Os primeiros dizem respeito a uma representação quase-tempo-real do sistema de distribuição, em que mudanças são frequentemente agregadas (tanto em topologia quanto em parâmetros hidráulicos), e existe associação com medições em tempo real e modelos hidráulicos. Por esse motivo, podem ser utilizados para operação e controle. Os segundo, por outro lado, não agregam dados em tempo real, tendo, portanto, finalidade de planejamento e projeto.

Dada a natureza duradoura das estruturas de distribuição de água, e de sua vinculação direta com a transformação urbana, que ocorre tanto espacial quanto temporalmente, a aplicação de Gêmeos Digitais nesse contexto difere de outras indústrias onde o conceito já é mais consolidado (PEDERSEN *et al.*, 2021). O termo foi cunhado aproximadamente nos anos 2000, com foco em gerenciamento de ciclo de vida do produto, momento em que dados de performance passaram a ser transferidos de um ambiente real para um virtual (GRIEVES; VICKERS, 2016).

Na literatura científica falta consenso acerca da terminologia Gêmeo Digital (PEDERSEN *et al.*, 2021; PESANTEZ *et al.*, 2022), o que leva a uma aplicação muito ampla e difusa. Segundo Wright; Davidson (2020), três aspectos são comuns e devem existir em um gêmeo digital: i) um modelo do objeto; ii) um conjunto de dados relativos ao objeto e que esteja em constante evolução; iii) uma maneira de ajustar ou atualizar dinamicamente o modelo a partir dos dados existentes. Dessa forma, o modelo, para configurar um Gêmeo Digital, deve ser orientado por dados. O gêmeo físico e digital devem evoluir juntos, para que o digital se configure em um repositório de conhecimento que é atualizado de modo contínuo e, assim, se mantém relevante e mais útil do que um modelo de simulação convencional, executado de forma independente (PESANTEZ *et al.*, 2022).

No setor da água, gêmeos digitais já têm sido utilizados por fabricantes de bombas com objetivo de otimizar a proposta de valor do produto e melhorar a experiência do cliente. Porém, quando se consideram os sistemas de abastecimento de água como um todo, os gêmeos digitais devem atender a necessidades diferentes das observadas em nível de plantas industriais, processos, produtos ou componentes: nem todas as particularidades que são relevantes de uma perspectiva de componente o serão sob a perspectiva de sistema (PESANTEZ *et al.*, 2022).

Fuertes *et al.* (2020) propõem requisitos que um gêmeo digital de um sistema de distribuição de água deve atender, através da apresentação do estudo de caso de Valença, Espanha, que está em operação. No entendimento dos autores, um gêmeo digital deve representar com acurácia todos os elementos do sistema bem como seu comportamento hidráulico, tanto em situações cotidianas quanto durante operações de manutenção ou emergenciais, e também apresentar alto nível de confiança quanto aos dados de monitoramento que o alimentam, de modo a promover segurança em tomadas de decisão. Foi desenvolvida uma aplicação, chamada GO2HydNet, capaz de construir o modelo hidráulico a partir da plataforma de *big data* da companhia, compilando informações de SIG, medições automatizadas, sistemas computadorizados de gerenciamento de manutenções e SCADA. Ainda assim, foram necessários trabalhos de ajuste de dados oriundos dessa plataforma para correta compilação pela ferramenta, mas foi possível obter um modelo passível de ser atualizado e produzir análises de dados e previsões essenciais para a operação eficiente do sistema.

5.3 Discussão sobre os temas

Com a análise dos artigos segundo a organização de temáticas identificadas, foi possível visualizar tendências das linhas de pesquisa obtidas no Repositório F. Nas pesquisas mais antigas, métodos de calibração primeiramente distribuíam perdas de forma proporcional ao carregamento dos nós. Com o progresso dos estudos, passa-se a buscar otimizar a localização de pontos de monitoramento de pressão e vazão visando identificar a correlação entre pressões e demandas (demandas dependentes de pressão), que influencia tanto consumos, efetivamente, especialmente em caso de escassez, quanto vazamentos. Evidencia-se, também, a importância de calibração em situações extremas, como vazões de incêndio, para melhor calibração de rugosidades, uma vez que, sob baixas vazões, um largo espectro de rugosidades pode conduzir ao mesmo resultado.

Para a detecção de vazamentos, se observa que métodos baseados em medição de pressão devem, preferencialmente, ser utilizados para refinamento da localização do vazamento, uma vez que o parâmetro “pressão” varia mais no sistema do que vazões, e vazões, por sua vez, variam em função de flutuações normais de demanda, que podem mascarar vazamentos. Assim, monitoramento de vazões são essenciais para o aprimoramento destes métodos. Ao longo do desenvolvimento das pesquisas voltadas à detecção de vazamentos, observa-se a transição de métodos manuais de busca, como o uso de equipamentos acústicos, até o uso mais recente de acelerômetros, possível graças ao avanço em tecnologias de sensoriamento e transmissão de dados. Ainda neste enfoque, métodos de detecção de vazamentos, em princípio, também eram muito dependentes de um modelo hidráulico já muito bem calibrado. Recursos de monitoramento em tempo real, combinados com aprendizado de máquina e aprendizagem profunda, têm potencial para auxiliar na calibração e detecção de anomalias.

Nota-se, também, ênfase em questões de identificação de padrão de demandas, bem como previsão. Isso evidencia uma das tantas dificuldades associadas à gestão dos sistemas de abastecimento de água bem como à manutenção de uma base de ativos funcional e dinâmica. Logo, é compreensível o interesse crescente em hidrômetros e outras tecnologias inteligentes, que permitem monitoramento contínuo, e, aos poucos, evidenciam o potencial dessas tecnologias para abordar problemáticas ainda recorrentes, tais como: defasagem no registro de consumo (mensal), falta de engajamento, por parte do usuário, acerca de seu próprio consumo, atualização de base comercial (status de ligações, pedidos de corte ou de religação, histórico,

novos consumidores que são diariamente ligados à rede). Com o avanço do uso de hidrômetros inteligentes e sistemas de monitoramento em tempo real ou quase tempo real, pode-se reduzir a barreira causada por incertezas em demandas, e, a partir de seu uso, passa-se a focar em métodos de desagregação para identificação de padrões por trás de picos de consumo e mesmo padrões de consumo anômalos. Esse novo paradigma, todavia, abre brechas para problemáticas associadas à segurança cibernética, segurança hídrica, privacidade, propriedade de dados e interoperabilidade.

Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de protocolos de comunicação abertos, de modo a abranger as soluções proprietárias disponíveis no mercado de medição inteligente, lidar com obsolescência e encontrar meios de integrar hidrômetros mecânicos preexistentes, no caso de implantação de redes inteligentes em projetos de larga escala. Também se torna imperativo o estudo e desenvolvimento de redes de transmissão de dados de baixo custo e baixo consumo de energia, com capacidade de transmissão inclusive a partir de locais de difícil acesso.

Como forma de atacar questões de interoperabilidade, notou-se nos artigos do Repositório F, voltados ao âmbito BIM, algumas pesquisas dedicadas ao desenvolvimento de ontologias para o setor da água, embora ainda com maior enfoque em fases de projeto do que de operação e manutenção. Vinculação direta com modelagem hidráulica é um assunto ainda pouco tratado, mas o desenvolvimento das tecnologias caminha junto, visando ao gêmeo digital.

Paralelamente, métodos de gerenciamento de pressão seguem sendo desenvolvidos ao longo do tempo, inicialmente com maior foco em particionamento de redes para equalização de pressões, avançando para controles por meio de válvulas redutoras de pressão e otimização de operação de bombas e reservatórios, por vias remotas vinculadas a monitoramento em tempo real. Mais recentemente, com foco em sustentabilidade e produção energética, têm surgido mais iniciativas para o uso de micro usinas geradoras de energia elétricas e bombas operando em modo reverso, em conjunto ou não com VRPs, para redução de pressão e aproveitamento da carga cinética para geração de energia em pequena escala. A energia gerada pode ser utilizada para alimentação de equipamentos de monitoramento, a depender da disponibilidade de estrutura para a transmissão da energia coletada.

5.3.1 Pontos principais das temáticas

Dadas as considerações sobre as temáticas levantadas, apresenta-se, a seguir, um resumo com os principais pontos identificados.

5.3.1.1 *Modelagem hidráulica, planejamento e resiliência*

- Particionamento de sistemas de abastecimento
- Busca por redundância
- Planos de reabilitação
- Análise de resiliência em função de falhas em tubulações, demanda excessiva e entrada de contaminante
- Modelagem como recurso para avaliação e aprimoramento de resiliência.

5.3.1.2 *Identificação de padrões, calibração, previsão de demandas e rugosidade*

- Sistemas orientados por demanda, em princípio
- Algoritmos de calibração de rugosidade e demandas, juntas ou separadamente
 - Importância da medição de vazão para redução de espectro de rugosidades possíveis
- Estudos reforçam necessidade de conhecimento físico e topológico dos sistemas
- Apoio em dados obtidos por hidrômetros inteligentes
 - Demandas em tempo quase real
 - Identificação e desagregação de perfis e picos de consumo
 - Previsão de demandas
 - Consumos anômalos

5.3.1.3 *Modelagem em tempo real*

- Water Sentinel (Singapura): coleta e processamento de dados de uma rede de abastecimento conectada a modelo hidráulico (2009)
- Las Vegas Valley Water District (2006): Modelo hidráulico em tempo real para operações diárias
- Dois únicos estudos com modelagem e monitoramento tempo real integrados.

5.3.1.4 *Detecção de vazamentos*

- Detecção por balanço hídrico: Detecção por medição de vazões e pressões
- A partir de 2016, foco em vazamentos de baixa intensidade e longa duração, controlados especialmente por gerenciamento de pressões
- Otimização de alocação de sensores, modelos bem calibrados
- Monitoramento acústico contínuo com acelerômetros
- Detecção e interpretação de ondas acústicas para previsão de rompimentos em rede.

5.3.1.5 *Gerenciamento de pressões*

- Uso de VRPS
- Otimização de posicionamento e quantificação de VRPs
- Bombas em modo reverso (PATs), a partir de 2017, aproximadamente, no escopo desta pesquisa;
 - Geração de energia com possível uso em alimentação de sensores
 - Dificuldade com meios de transmissão da energia
- Otimização em tempo quase-real de bombas com rotação variável e VRP
 - Acoplamento de algoritmo de previsão de demanda

5.3.1.6 *Casos e benefícios de uso de tecnologias inteligentes (medição, comunicação)*

- Falta de casos de negócio evidenciando retorno financeiro de soluções de medição inteligente
- Dificuldades e alternativas para comunicação entre soluções proprietárias
- Redução de perdas nas unidades consumidoras e em redes
- Riscos:
 - Rejeição por parte da sociedade
 - Consumo de água ser regido pelo seu custo unicamente, especialmente em populações vulneráveis, gerando demanda reprimida
- Temas frequentes: previsão de demanda, perfis de consumo, análise socioeconômica
- Soluções técnicas em detrimento de discussões sobre o processo de mudança de paradigma manual *versus* automatizado, pontuando-se a relevância de critérios técnicos e não técnicos

5.3.1.7 *Redes de água inteligentes*

- Falta consenso sobre “sistemas de água inteligentes”
- Rede em que consumidores estão ligados a uma rede de telemetria (COMINOLA et al., 2018; PADULANO; DEL GIUDICE, 2018).
- *Smartness* e *cyber wellness*
- *Smart water grids*: Soluções TI e de comunicação voltadas à segurança do abastecimento (LEE et al., 2015)
 - Plataforma integrada
 - Garantia de fontes de água
 - Redes com capacidade de comunicação bidirecional
 - Monitoramento em tempo real e previsões
 - Integração entre smart water grids e smart power grids

5.3.1.8 *Programa de feedback ao cliente*

- Impacto da personalização do programa nos efeitos em redução do consumo
- Desenvolvimento de *frameworks*, com base em programas já implantados, com um panorama de ações para este tipo de solução (redes e medições inteligentes)

5.3.1.9 *Deteção de ataques e segurança cibernética*

- Artigos a partir de 2017, com mais evidência
- Levantamentos dos tipos de ataques
- Criação de algoritmos para deteção de pontos vulneráveis e alvos de ataques, com apoio em históricos de medição e modelagem hidráulica
 - Limitante: modelagem de sistemas dirigidos por demanda, devido à dificuldade de identificar variações em pressão e qualidade da água decorrentes de ataques
- Otimização de amostragem de pontos de monitoramento de qualidade
- Problemas com perda de privacidade por parte do consumidor

5.3.1.10 *Integração topológica/Ontologia*

- Foco em modelos para facilitar troca de dados, integração de sistemas legados
- Desenvolvimento de arquitetura para integrar diferentes bases de dados

- Ontologias como soluções para interpretar informações de diferentes fontes, dentro de determinado domínio
- Falta de sistema de classificação unificado para indústria da água
- Enfoque ainda em projetos e planejamento de obras, em oposição à operação e manutenção

5.3.1.11 Gêmeos Digitais

- Também falta consenso para definição do termo, aplicação muito ampla e difusa
- Devem cumprir três requisitos (RIGHT; DAVIDSON, 2020)
 - Modelo do objeto
 - Conjunto de dados relativo ao objeto, sempre em evolução
 - Maneira de atualizar dinamicamente o modelo
- Gêmeos digitais “vivos” e “prototípicos” (Pedersen et al., 2021)
 - Vivos: vinculados a monitoramento em tempo real ou quase, mudanças são frequentemente agregadas ao modelo, tanto em topologia quanto em parâmetros hidráulicos
 - Prototípicos: não agregam dados em tempo real, sendo então usados para fins de planejamento apenas.

6. Considerações finais

A necessidade de adoção de estratégias digitais e as oportunidades na indústria da água são crescentes, conforme os sistemas se tornam cada vez mais complexos. A tecnologia digital tem potencial para tornar as concessionárias mais resilientes, inovadoras, eficientes e, por conseguinte, até mais viáveis economicamente. O uso, dentre outros, de dados, automação e inteligência artificial permite que os prestadores de serviço possam caminhar no sentido da redução de perdas, conservação de recursos hídricos e incremento do ciclo de vida das infraestruturas.

A título de exemplo, o sensoriamento remoto e o uso de gêmeos digitais podem conectar as infraestruturas às fontes de abastecimento; outras tecnologias, por sua vez, podem garantir a conectividade à gestão operacional. Para suprir a demanda por conectividade por parte dos consumidores, podem ser empregados recursos como ferramentas analíticas de experiência do usuário, plataformas de dados abertos e aplicativos para dispositivos móveis. Nesse cenário, os variados ramos da tecnologia, como armazenamento em nuvem, comunicação móvel, sensoriamento, redes de comunicação, *big data* e *analytics* podem ser empregados.

Sensores podem ser distribuídos pelo sistema de produção e distribuição para acompanhamento de vazões, qualidade da água, pressões e níveis de reservatórios. Além disso, associados a modelos hidráulicos, podem auxiliar na definição de estratégias operacionais que otimizem o uso de recursos, atuem na identificação de necessidade de manutenção preventiva para evitar rupturas de redes, facilitem a identificação de prioridades para a substituição de elementos que atingiram sua vida útil e promovam o planejamento a longo prazo.

Dessa maneira, observa-se o potencial de uso da modelagem hidráulica não como objetivo fim de concepção, mas como ferramenta para elevar o nível da gestão operacional de sistemas de distribuição de água potável. O que se pode notar nos estudos levantados acerca do tópico é a presença constante de dados de monitoramento, informações cadastrais, manipulação e utilização destes dados no controle do sistema, podendo-se, inclusive, com aprendizado de máquina, identificar anomalias na operação e atuar na manutenção preditiva das redes e equipamentos, em oposição à manutenção corretiva.

Aprendizado de máquina e Inteligência Artificial são utilizados para processar os dados coletados por sensoriamento, mas também podem colaborar com a otimização dos processos,

uma vez que a capacidade de “aprendizagem” permite identificar padrões operacionais e atualizar algoritmos com novos dados de entrada, favorecendo o planejamento estratégico das operações, rastreando as perdas (água, energia elétrica, produtos químicos) em tempo real e, assim, tornando os sistemas mais eficientes e rentáveis, ao mesmo tempo mais sustentáveis ao consumidor final.

Um tópico recorrente no Eixo 3 da pesquisa foi a aplicação de hidrômetros inteligentes, ficando evidenciada a importância da micromedição e da atualização do parque de hidrômetros, para que gerem menos defasagem entre a leitura e o registro, visto que, atualmente, as leituras são frequentemente obsoletas: lê-se a diferença entre a data de referência entre o mês atual e o anterior, ou seja, tem-se apenas registros médios de consumo o que, a depender do perfil de sazonalidade do local, pode trazer lacunas de informação, pois sabe-se que há aumento ou decaimento de consumo, mas não se sabe sob que circunstâncias estes ocorrem, o que é fundamental para fins de planejamento e continuidade de abastecimento.

Nota-se uma tendência de adoção de estratégias *smart*, no sentido de design resiliente, uso combinado de estratégias sob medida, recuperação e reuso dos vários recursos na cadeia produtiva de água, bem como controle digital com Internet das Coisas. Tais recursos agem como suporte para modelos retroalimentados, que permitem a otimização operacional de bombas, válvulas, sensores e atuadores, além da melhoria na comunicação com o cliente a partir de meios digitais.

Considerando um grau avançado de aplicação de tecnologias digitais, cabível também ao contexto da indústria da água, estão os gêmeos digitais. Unindo dados de SIG, sensoriamento e realidade virtual, é possível gerar réplicas dos sistemas físicos que contemplam imagens de satélite e dados em tempo real de operação em campo para simular o funcionamento das infraestruturas, de modo que se torna possível não apenas visualizar e monitorar as condições atuais, como também prever cenários possíveis. Frisa-se que, apesar da ainda falta de consenso acerca da definição de “gêmeo digital”, é necessário que este tipo de modelo permita, ao menos, o desenvolvimento de simulações, e que evolua junto com o gêmeo físico.

No mais, observa-se no processo de inovação digital do setor da água uma oportunidade para o aproveitamento de dados analíticos para melhor fundamentar tomadas de decisão que deverão trazer impactos relacionados ao gerenciamento de recursos hídricos, gestão



operacional, manutenção, serviço ao consumidor e planejamento financeiro tanto no curto quanto no longo prazo.

7. Recomendações

Na pesquisa desenvolvida, foram observadas muitas abordagens técnicas para resolução de problemas relacionados a identificação de padrões e previsão de demandas, calibração de rugosidade de tubulações, gerenciamento de pressões e redução de perdas, interoperabilidade tanto entre dispositivos de coleta, leitura e armazenamento de dados, bem como entre diferentes plataformas (SIG e BIM) com o objetivo de caminhar para a realidade dos gêmeos digitais. Todavia, não foram identificados estudos tratando de questões relacionadas a inconsistências cadastrais, e poucos foram aqueles que apresentaram estudos de caso reais de sistemas complexos contemplando modelagem hidráulica, monitoramento em tempo real e as dinâmicas envolvidas no processo de construção de tal sistema integrado. De maneira geral, os estudos consideram modelos já calibrados e com premissas de parâmetros hidráulicos conhecidos.

Embora ainda haja problemas basais relacionados à qualidade de cadastro técnico, informações operacionais e ao conhecimento aprofundado e dinâmico acerca da base de ativos dos prestadores de serviços de abastecimento, há de se considerar uma mudança de paradigma, usando-se de apoio as tecnologias que têm sido desenvolvidas, e a realidade e necessidade de cada prestador. É necessário que a companhia identifique seus gargalos e suas potencialidades, capacite equipes e promova estratégias de comunicação entre os diferentes setores da empresa.

Além disso, é recomendável realinhar expectativas quanto a entregas de fornecedores, como projetos de novas redes em ambiente SIG, para que aquele ativo possa ser rapidamente cadastrado em uma base unificada. Assim, recomendam-se alguns focos de pesquisa:

- Benchmarking no Brasil visando identificar o avanço digital do setor, quais pontos atacar primeiro para aprimorar a performance do prestador, identificar práticas que as concessionárias com melhor performance têm adotado para comunicação entre cadastro, campo e modelagem hidráulica;
- Métodos de aplicação e integração de tecnologias já disponíveis com vias a otimizar o processo de adequação topológica dos ativos de sistemas de distribuição de água, investigando como o uso de sensoriamento, dispositivos sem fio, softwares de acompanhamento de serviço de campo, e mesmo modelos em fase de calibração, podem ser usados para melhoria cadastral e de performance;

- Desenvolvimento e publicação de casos de negócio evidenciando as vantagens do uso de hidrômetros digitais sob o ponto de vista de retorno de investimento;
- Estudos acerca da problemática da invasão de privacidade decorrente do avanço no uso de hidrômetros digitais;
- Desenvolvimento de meios para garantir a interoperabilidade entre sensores, hidrômetros e outros dispositivos de diferentes fornecedores, como forma de lidar com o problema de propriedade de dados;
- Desenvolvimento e divulgação de abordagens de segurança cibernética para sistemas que, ainda que não completamente automatizados, contem com sistemas SCADA, programadores lógicos e atuadores controlados remotamente, dentre outros;
- Estudos de caso em sistemas reais utilizando bombas operando em modo reverso para investigação do custo-benefício desse tipo de solução.

8. Referências bibliográficas

ABOKIFA, A. A. et al. Real-Time Identification of Cyber-Physical Attacks on Water Distribution Systems via Machine Learning–Based Anomaly Detection Techniques. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 1, p. 04018089, jan. 2019.

ABU-MAHFOUZ, A. M. et al. Real-time dynamic hydraulic model of water distribution networks. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 3, 1 mar. 2019.

ADDEEN, H. H. et al. A survey of cyber-physical attacks and detection methods in smart water distribution systems. **IEEE Access**, v. 9, p. 99905–99921, 2021.

ALANI, Y. et al. A semantic common model for product data in the water industry. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 26, p. 566–590, 1 jul. 2021.

ALLEN, M. et al. Real-time in-network distribution system monitoring to improve operational efficiency. **Journal AWWA**, v. 103, n. 7, p. 63–75, 2011.

ALVISI, S. et al. Wireless middleware solutions for smart water metering. **Sensors (Switzerland)**, v. 19, n. 8, 2 abr. 2019.

ANTZOULATOS, G. et al. Making urban water smart: The SMART-WATER solution. **Water Science and Technology**, v. 82, n. 12, p. 2691–2710, 15 dez. 2020.

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

AUTIOSALO, J. et al. A Feature-Based Framework for Structuring Industrial Digital Twins. **IEEE Access**, v. 8, p. 1193–1208, 2020.

AZEVEDO, M. T. DE. **Transformação digital na indústria: indústria 4.0 e a rede de água inteligente no Brasil**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências) - Sistemas Eletrônicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

BEAL, C. D.; FLYNN, J. Toward the digital water age: Survey and case studies of Australian water utility smart-metering programs. **Utilities Policy**, v. 32, p. 29–37, 1 mar. 2015.

BERARDI, L.; GIUSTOLISI, O. Calibration of Design Models for Leakage Management of Water Distribution Networks. **Water Resources Management**, v. 35, n. 8, p. 2537–2551, 1 jun. 2021.

BONILLA, C. A. et al. A Digital Twin of a Water Distribution System by Using Graph Convolutional Networks for Pump Speed-Based State Estimation. **Water (Switzerland)**, v. 14, n. 4, 1 fev. 2022.

BORGE-DIEZ, D. et al. Pico turbines, the solution to self-supply energy to the water supply network. A case study in Las Palmas de Gran Canaria. **Energy**, v. 229, 15 ago. 2021.

BOULOS, P. F. et al. **Real-time modeling of water distribution systems: A case study** *Journal - American Water Works Association* American Water Works Association, , 1 set. 2014.

BOYLE, T. et al. Intelligent metering for urban water: A review. **Water (Switzerland)**, v. 5, n. 3, p. 1052–1081, 2013.

BRADLEY, A., *et al.* BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. **Automation construction**, v.71, p. 139-152, 2016.

BRASIL. Decreto n. 9.377, de 17 de maio de 2018. Institui a Estratégia de Disseminação do Building Information Modelling. Diário Oficial da União, Brasília, Edição 95, Seção 1, p. 3, mai. 2018. Atos do Poder Executivo. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/Decreto/D9377.htm. Acesso em: 5 out. 2018

BRASIL. Decreto n° 9.983 de 22 de agosto de 2019. Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 2, 23 agosto 2020.

BRASIL. Decreto n° 10.306 de 2 de abril de 2020. Estabelece a utilização do Building Information Modelling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal, no âmbito da Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling – Estratégia BIM BR,

instituída pelo Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 5, 3 abril 2020.

BRENTAN, B. et al. Joint Operation of Pressure-Reducing Valves and Pumps for Improving the Efficiency of Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 9, p. 04018055, set. 2018.

CAHN, A.; KATZ, D.; GHERMANDI, A. Analyzing Water Customer Preferences for Online Feedback Technologies in Israel: A Prototype Study. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 146, n. 4, p. 06020002, abr. 2020.

Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC). 2016. **Fundamentos BIM – Parte 1: Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras**. Vol. 1, 124 p. Brasília, 2016.

CARRIJO, I. B. et al. Operational optimization of WDS based on multiobjective genetic algorithms and operational extraction rules using data mining. **Proceedings of the 2004 World Water and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management**, p. 4475–4482, 2004.

CASSIDY, J. et al. Taking water efficiency to the next level: Digital tools to reduce non-revenue water. **Journal of Hydroinformatics**, v. 23, n. 3, p. 453–465, 1 maio 2021.

CHECCUCCI, É. DE S. Teses e dissertações brasileiras sobre BIM: uma análise do período de 2013 a 2018. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019008–e019008, 26 fev. 2019.

CHEW, E. **Value Co-Creation in the Organizations of the Future**. ([], Ed.)European Conference on Management, Leadership & Governance. **Anais...Kidmore End: Academic Conferences International Limited**, 2013.

COELHO, F.J.M. **Estudo de sistemas cadastrais de empresas de saneamento através de benchmarking**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

COLE, G.; STEWART, R. A. Smart meter enabled disaggregation of urban peak water

demand: Precursor to effective urban water planning. **Urban Water Journal**, v. 10, n. 3, p. 174–194, jun. 2013.

COLLIN, J. et al., (2015). **IT Leadership in Transition - The Impact of Digitalization on Finnish Organizations**. Research report, Aalto University. Department of Computer Science.

COMINOLA, A. et al. Implications of data sampling resolution on water use simulation, end-use disaggregation, and demand management. **Environmental Modelling & Software**, v. 102, p. 199–212, 1 abr. 2018.

COVELLI, C. et al. Optimal Location and Setting of PRVs in WDS for Leakage Minimization. **Water Resources Management**, v. 30, n. 5, p. 1803–1817, 1 mar. 2016.

CREACO, E.; PEZZINGA, G.; SAVIC, D. On the choice of the demand and hydraulic modeling approach to WDN real-time simulation. **Water Resources Research**, v. 53, n. 7, p. 6159–6177, 1 jul. 2017.

DAVIDSON, J. W.; BOUCHART, J.-C. Adjusting Nodal Demands in SCADA Constrained Real-Time Water Distribution Network Models. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 1, p. 102–110, 2006.

DE CARVALHO, G. D. G. et al. Bibliometrics and systematic reviews: A comparison between the Proknow-C and the Methodi Ordinatio. **Journal of Informetrics**, v. 14, n. 3, 1 ago. 2020.

DE MARCHIS, M. et al. Energy Recovery in Water Distribution Networks. Implementation of Pumps as Turbine in a Dynamic Numerical Model. **Procedia Engineering**, v. 70, p. 439–448, 1 jan. 2014.

DINARDO, A. et al. An Automated Tool for Smart Water Network Partitioning. **Water Resources Management**, v. 27, n. 13, p. 4493–4508, out. 2013.

DIAO, K. et al. Global resilience analysis of water distribution systems. **Water Research**, v. 106, p. 383–393, 1 dez. 2016.

DO, N. C. et al. Calibration of Water Demand Multipliers in Water Distribution Systems

Using Genetic Algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 11, p. 04016044, nov. 2016.

EDIRISINGHE, R. et al. Building information modelling for facility management: Are we there yet? **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 24, n. 6, p. 1119–1154, 2017.

ENSSLIN, L. et al. Research Process for Selecting a Theoretical Framework and Bibliometric Analysis of a Theme: Illustration for the Management of Customer Service in a Bank. **Modern Economy**, v. 06, n. 06, p. 782–796, 2015.

FABBIANO, L.; VACCA, G.; DINARDO, G. Smart water grid: A smart methodology to detect leaks in water distribution networks. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 151, 1 fev. 2020.

FANG, X. et al. Smart grid - The new and improved power grid: A survey. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 14, n. 4, p. 944–980, 2012.

FARAH, E.; SHAHROUR, I. Leakage Detection Using Smart Water System: Combination of Water Balance and Automated Minimum Night Flow. **Water Resources Management**, v. 31, n. 15, p. 4821–4833, 1 dez. 2017.

FARAH, E.; SHAHROUR, I. Smart water technology for leakage detection: feedback of large-scale experimentation. **Analog Integrated Circuits and Signal Processing**, v. 96, n. 2, p. 235–242, 1 ago. 2018.

FARLEY, B.; MOUNCE, S. R.; BOXALL, J. B. Development and Field Validation of a Burst Localization Methodology. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 6, p. 604–613, nov. 2013.

FERREIRA, B. **Desenvolvimento de metodologias BIM de apoio aos trabalhos construtivos de medição e orçamentação**. 2015. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2015.

FUERTE, C. P. et al. Building and exploiting a Digital Twin for the management of drinking water distribution networks. **Urban Water Journal**, v. 17, n. 8, p. 704–713, 13 set. 2020.

GERMANOPOULOS, G. A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. <http://dx.doi.org/10.1080/02630258508970401>, v. 2, n. 3, p. 171–179, 2007.

GILBERT, T. et al. Topological integration of BIM and geospatial water utility networks across the building envelope. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 86, 1 mar. 2021.

GIUSTOLISI, O. et al. Operational and Tactical Management of Water and Energy Resources in Pressurized Systems: Competition at WDSA 2014. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 5, maio 2016.

GIUSTOLISI, O.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. Extended Period Simulation Analysis Considering Valve Shutdowns. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 134, n. 6, p. 527–537, 2008.

GONG, J. et al. Detection of Emerging through-Wall Cracks for Pipe Break Early Warning in Water Distribution Systems Using Permanent Acoustic Monitoring and Acoustic Wave Analysis. **Water Resources Management**, v. 34, n. 8, p. 2419–2432, 1 jun. 2020.

GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. **Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches**, p. 85–113, 1 jan. 2016.

GURUNG, T. R. et al. Smart meters for enhanced water supply network modelling and infrastructure planning. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 90, p. 34–50, 2014.

HALFAWY, M. R. Municipal information models and federated software architecture for implementing integrated infrastructure management environments. **Automation in Construction**, v. 19, n. 4, p. 433–446, jul. 2010.

HJELSETH, E. Exchange of Relevant Information in BIM Objects Defined by the Role and life-Cycle Information Model. **Architectural Engineering and Design Management**, Vol. 6, Iss. 4, 2010.

HOWELL, S.; REZGUI, Y.; BEACH, T. Integrating building and urban semantics to empower smart water solutions. **Automation in Construction**, v. 81, p. 434–448, 1 set. 2017.

HOWELL, S.; REZGUI, Y.; BEACH, T. Water utility decision support through the semantic web of things. **Environmental Modelling and Software**, v. 102, p. 94–114, 1 abr. 2018.

HUTTON, C. J. et al. Dealing with Uncertainty in Water Distribution System Models: A Framework for Real-Time Modeling and Data Assimilation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 2, p. 169–183, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16.739-1**: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries – Part 1: Data schema. 2018

JAMIESON, D. G. et al. Conceptual design of a generic, real-time, near-optimal control system for water-distribution networks. **Journal of Hydroinformatics**, v. 9, n. 1, p. 3–14, 2007.

KAMUNDA, A. et al. BIM in the water industry: addressing challenges to improve the project delivery process. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 28, n. 2, p. 510–529, 15 fev. 2021.

KANAKOUDIS, V.; GONELAS, K. Non-revenue water reduction through pressure management in Kozani's water distribution network: from theory to practice. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 25, p. 11436–11446, 6 jan. 2016.

KARA, S. et al. Real time monitoring and control in water distribution systems for improving operational efficiency. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 25, p. 11506–11519, 2016.

KARADIREK, I. E. et al. Implementation of Hydraulic Modelling for Water-Loss Reduction Through Pressure Management. **Water Resources Management**, v. 26, n. 9, p. 2555–2568, jul. 2012.

KOO, K. M. et al. Smart water grid research group project: An introduction to the smart water grid living-lab demonstrative operation in yeongjong island, korea. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 9, 1 maio 2021.

KOWALSKI, D.; KOWALSKA, B.; SUCHORAB, P. Smart water supply system: a

quasi intelligent diagnostic method for a distribution network. **Applied Water Science**, v. 12, n. 135, 2022.

KULKARNI, P.; FARNHAM, T. Smart City Wireless Connectivity Considerations and Cost Analysis: Lessons Learnt from Smart Water Case Studies. **IEEE Access**, v. 4, p. 660–672, 2016.

LAMBERT, A. O.; MCKENZIE, D. R. D. **Practical Experience in using the Infrastructure Leakage Index**. (W. B. of Lemosos, Ed.) IWA Conf. on Leakage Management: A practical approach. **Anais...Lemosos**, Cyprus: IWA Publishing, 2002.

LEE, S. W. et al. Smart water grid: the future water management platform. **Desalination and Water Treatment**, v. 55, n. 2, p. 339–346, 10 jul. 2015.

LI, J.; YANG, X.; SITZENFREI, R. Rethinking the framework of smart water system: A review. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 2, 1 fev. 2020.

LIU, A. et al. Detailed water-use feedback: A review and proposed framework for program implementation. **Utilities Policy**, v. 43, p. 140–150, 1 dez. 2016.

LOUCKS, D. WATER RESOURCE SYSTEMS MODELS: THEIR ROLE IN PLANNING 3. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 118, n. 3, p. 214–223, 1992.

MA, Z.; REN, Y. Integrated Application of BIM and GIS: An Overview. **Procedia Engineering**, v. 196, p. 1072–1079, 1 jan. 2017.

MARCH, H. et al. Household smart water metering in Spain: Insights from the experience of remote meter reading in alicante. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 4, 11 abr. 2017.

MARSILIO, M.; CAPPELLARO, G.; CUCCURULLO, C. The intellectual structure of research into PPPS: A bibliometric analysis. **Public Management Review**, v. 13, n. 6, p. 763–782, 2011.

MARZOUK, M.; OTHMAN, A. Planning utility infrastructure requirements for smart cities using the integration between BIM and GIS. **Sustainable Cities and Society**, v. 57, p.

102120, 1 jun. 2020.

MESEGUER, J. et al. A decision support system for on-line leakage localization. **Environmental Modelling and Software**, v. 60, p. 331–345, 2014.

MOAZENI, F.; KHAZAEI, J. Formulating false data injection cyberattacks on pumps' flow rate resulting in cascading failures in smart water systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 75, 1 dez. 2021.

MOMENI, A. et al. Leveraging Hydraulic Cyber-Monitoring Data to Support Primitive Condition Assessment of Water Mains. 2021.

MOMENI, A.; PIRATLA, K. R. A Proof-of-Concept Study for Hydraulic Model-Based Leakage Detection in Water Pipelines Using Pressure Monitoring Data. **Frontiers in Water**, v. 3, 12 ago. 2021.

MONKS, I. et al. **Revealing unreported benefits of digital water metering: Literature review and expert opinions** *Water (Switzerland)* MDPI AG, , 1 abr. 2019.

MONKS, I. et al. Expert opinion valuation method to quantify digital water metering benefits. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 5, 1 maio 2020.

MOUNCE, S. R. et al. Knowledge management for more sustainable water systems. **Electronic Journal of Information Technology in Construction**, v. 15, n. February, p. 140–148, 2010.

MUHAMMETOGLU, A. et al. Full-Scale PAT Application for Energy Production and Pressure Reduction in a Water Distribution Network. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 8, p. 04017040, ago. 2017.

MÜLLER-CZYGAN, G. et al. How does digitization succeed in the municipal water sector? The waterexe4.0 meta-study identifies barriers as well as success factors, and reveals expectations for the future. **Energies**, v. 14, n. 22, 1 nov. 2021.

ORMSBEE, L. E. Implicit Network Calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 115, n. 2, p. 243–257, 1989.

PADULANO, R.; DEL GIUDICE, G. A Mixed Strategy Based on Self-Organizing Map

for Water Demand Pattern Profiling of Large-Size Smart Water Grid Data. **Water Resources Management**, v. 32, n. 11, p. 3671–3685, 1 set. 2018.

PAGE, P. R.; ABU-MAHFOUZ, A. M.; YOYO, S. Parameter-Less Remote Real-Time Control for the Adjustment of Pressure in Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 9, p. 04017050, set. 2017.

PAGE, P. R.; CREACO, E. Comparison of flow-dependent controllers for remote real-time pressure control in a water distribution system with stochastic consumption. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 3, 1 mar. 2019.

PALO, P.R. **Avaliação da eficácia de modelos de simulação hidráulica na obtenção de informações para diagnóstico de perdas de água**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PATELIS, M.; KANAKOUDIS, V.; GONELAS, K. Combining pressure management and energy recovery benefits in a water distribution system installing PATs. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 66, n. 7, p. 520–527, 1 nov. 2017.

PATELIS, M.; KANAKOUDIS, V.; KRAVVARI, A. Pressure regulation vs. water aging in water distribution networks. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 5, 1 maio 2020.

PEDERSEN, A. N. et al. Living and prototyping digital twins for urban water systems: Towards multi-purpose value creation using models and sensors. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 5, 1 mar. 2021.

PESANTEZ, J. E. et al. Using a digital twin to explore water infrastructure impacts during the COVID-19 pandemic. **Sustainable Cities and Society**, v. 77, 1 fev. 2022.

PREDESCU, A. et al. An advanced learning-based multiple model control supervisor for pumping stations in a smart water distribution system. **Mathematics**, v. 8, n. 6, 1 jun. 2020.

RAHIM, M. S. et al. **Machine learning and data analytic techniques in digital water metering: A review** **Water (Switzerland)** MDPI AG, , 1 jan. 2020.

RAHIM, M. S. et al. A clustering solution for analyzing residential water consumption

patterns. **Knowledge-Based Systems**, v. 233, 5 dez. 2021.

RAMOS, H. M. et al. Smart water management towards future water sustainable networks. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 1, 1 jan. 2020.

RAMOS, H. M. et al. New Challenges towards Smart Systems' Efficiency by Digital Twin in Water Distribution Networks. **Water**, v. 14, n. 8, p. 1304, 17 abr. 2022.

RAMOS, H. M.; CARRAVETTA, A.; MC NABOLA, A. **New challenges in water systems** **Water (Switzerland)** MDPI AG, , 1 set. 2020.

ROMANO, M.; KAPELAN, Z. Adaptive water demand forecasting for near real-time management of smart water distribution systems. **Environmental Modelling and Software**, v. 60, p. 265–276, 2014.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 Users Manual EPA/600/R-00/57** **Water Supply and Water Resources Division, U.S. Agency, Environmental Protection**, 2000.

SAAB, C.; SHAHROUR, I.; HAGE CHEHADE, F. Risk Assessment of Water Accidental Contamination Using Smart Water Quality Monitoring. **Exposure and Health**, v. 12, n. 2, p. 281–293, 1 jun. 2020.

SALDARRIAGA, J. et al. Rehabilitation and Leakage Reduction on C-Town Using Hydraulic Criteria. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 5, p. 1–8, 2016.

SALOMONS, E.; SELA, L.; HOUSH, M. Hedging for Privacy in Smart Water Meters. **Water Resources Research**, v. 56, n. 9, 1 set. 2020.

SARNI, W. et al. **Digital Water. Industry Leaders chart the transformation journey** **Digital Water**. International Water Association in partnership with Xylem inc. London, 2019.

SEBBAGH, K.; SAFRI, A.; ZABOT, M. Pre-Localization Approach of Leaks on a Water Distribution Network by Optimization of the Hydraulic Model Using an Evolutionary Algorithm. p. 588, 2018.

SHAFIEE, M. E. et al. Streaming Smart Meter Data Integration to Enable Dynamic

Demand Assignment for Real-Time Hydraulic Simulation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 146, n. 6, p. 06020008, jun. 2020.

SHAHRA, E. Q.; WU, W. Water contaminants detection using sensor placement approach in smart water networks. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, 2020.

SHAMIR, U.; HOWARD, C. D. D. Engineering Analysis of Water-Distribution Systems. 1977.

SHAO, Y. et al. Real-Time Water Distribution System Hydraulic Modeling Using Prior Demand Information by Formal Bayesian Approach. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 12, p. 04019059, dez. 2019.

SINGH, J.; ANUMBA, C. J. Real-time pipe system installation schedule generation and optimization using artificial intelligence and heuristic techniques. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 27, p. 173–190, 23 fev. 2022.

SIQUEIRA, J. P. G. **Métodos de partição de rede de abastecimento de água : um estudo de caso em Pederneiras/SP**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

SLANÝ, V. et al. An integrated iot architecture for smart metering using next generation sensor for water management based on lorawan technology: A pilot study. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 17, p. 1–23, 1 set. 2020.

SOPHOCLEOUS, S.; SAVIĆ, D.; KAPELAN, Z. Leak Localization in a Real Water Distribution Network Based on Search-Space Reduction. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 7, p. 04019024, jul. 2019.

STEPHENS, M. et al. Leak-Before-Break Main Failure Prevention for Water Distribution Pipes Using Acoustic Smart Water Technologies: Case Study in Adelaide. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 146, n. 10, p. 05020020, out. 2020.

SUMER, D.; LANSEY, K. Effect of Uncertainty on Water Distribution System Model Design Decisions. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 135, n. 1, p. 38–47, 2009.

TABESH, M.; DELAVAR, M. R.; DELKHAH, A. Use of geospatial information system based tool for renovation and rehabilitation of water distribution systems 1. **Int. J. Environ. Sci. Tech**, v. 7, n. 1, p. 47–58, 2010.

TADEU DE OLIVEIRA LACERDA, R.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho A bibliometric analysis of strategy and performance measurement. **Gest. Prod.**, v. 19, n. 1, p. 59–78, 2012.

TAORMINA, R. et al. Characterizing Cyber-Physical Attacks on Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 5, p. 04017009, maio 2017.

TAORMINA, R. et al. Battle of the Attack Detection Algorithms: Disclosing Cyber Attacks on Water Distribution Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 8, p. 04018048, ago. 2018.

TAORMINA, R. et al. A toolbox for assessing the impacts of cyber-physical attacks on water distribution systems. **Environmental Modelling and Software**, v. 112, p. 46–51, 1 fev. 2019.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. VOSviewer Manual version 1.6.16. **Universteit Leiden**, n. November, p. 1–52, 2020.

WALSKI, T. M. Case Study: Pipe Network Model Calibration Issues. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 112, n. 2, p. 238–249, 1 abr. 1986.

WEI, Z. et al. Optimal Sampling of Water Distribution Network Dynamics Using Graph Fourier Transform. **IEEE Transactions on Network Science and Engineering**, v. 7, n. 3, p. 1570–1582, 1 jul. 2020.

WRIGHT, L.; DAVIDSON, S. How to tell the difference between a model and a digital twin. **Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences**, v. 7, n. 1, 2020.

WU, Z. Y.; SAGE, P.; TURTLE, D. Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 1, p. 116–128, 2010.

XIE, X.; ZHANG, H.; HOU, D. Bayesian Approach for Joint Estimation of Demand and Roughness in Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 8, p. 04017034, ago. 2017.

ZHANG, C. et al. A convolutional neural network for pipe crack and leak detection in smart water network. **Structural Health Monitoring**, p. 147592172210801, 15 abr. 2022.

ZHANG, Q. et al. Leakage Zone Identification in Large-Scale Water Distribution Systems Using Multiclass Support Vector Machines. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 11, p. 04016042, nov. 2016.

ZHANG, Q. et al. Efficient Numerical Approach for Simultaneous Calibration of Pipe Roughness Coefficients and Nodal Demands for Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 10, p. 04018063, out. 2018.

ZHANG, X.; LI, F.; LI, X. **Bibliometric analysis of ecological compensation and its application in land resources Landscape and Ecological Engineering**. Springer Japan, 1 out. 2021.

ZHAO, L.; LIU, Z.; MBACHU, J. An Integrated BIM–GIS Method for Planning of Water Distribution System. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 8, p. 331, 27 jul. 2019.

ZHAO, X. A scientometric review of global BIM research: Analysis and visualization. **Automation in Construction**, v. 80, p. 37–47, 1 ago. 2017.

ZHOU, X. et al. Self-Adaptive Calibration of Real-Time Demand and Roughness of Water Distribution Systems. **Water Resources Research**, v. 54, n. 8, p. 5536–5550, 1 ago. 2018.

ZHOU, X. et al. Deep learning identifies accurate burst locations in water distribution networks. **Water Research**, v. 166, 1 dez. 2019.