OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA POR MEIO DE APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO EM MODELO HIDRÁULICO: ESTUDO DE CASO EM REDCLIFFE NA AUSTRÁLIA

Leandro Rinaldo Merli[(1)]
Engenheiro Civil e Mestrando em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP). Na WCS atua como engenheiro de otimização de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Atua em projetos de engenharia no Brasil, Estados Unidos, Austrália e Nova Zelândia.
André George Camalionte
Engenheiro Civil pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e MBA em Data Science e Big Data na FIAP. Na WCS atua como engenheiro de otimização de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Atua em projetos de engenharia no Brasil, Estados Unidos, Austrália e Nova Zelândia.
Lucas Djehdian
Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia Civil pela University of Illinois Urbana-Champaign. Na WCS atua como Diretor da WCS Brasil e engenheiro de otimização senior de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Atua em projetos de engenharia no Brasil, Estados Unidos, Austrália e Nova Zelândia.
Andrew Faulkner
Engenheiro Civil pela Colorado State University. Na WCS atua como Diretor de Inovação e como engenheiro de otimização senior de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Atua em projetos de engenharia nos Estados Unidos, Austrália e Nova Zelândia.
Joel Wilson
Engenheiro Civil pela The University of Queensland. Fundador da WCS e especialista em otimização de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Atua em projetos de engenharia nos Estados Unidos, Austrália e Nova Zelândia.

Endereço[(1)]: Rua Diogo Farias 181, Sala 807 – Centro – Guarulhos – São Paulo – CEP: 07110-090 – Brasil – Tel +1 (507) 316-1557 – e-mail: leandro.merli@wcsengineering.com

RESUMO

Este estudo apresenta a aplicação de algoritmos genéticos, em ambiente de computação em nuvem, para a otimização de um sistema de abastecimento de água (SDA) real, localizado na região de Redcliffe, Austrália. A partir do modelo hidráulico calibrado fornecido pela concessionária local, foram conduzidas análises de desempenho para o horizonte de 2051, identificando deficiências significativas relacionadas a pressão mínima e máxima, perda de carga excessiva e vazões insuficientes para hidrantes. A metodologia proposta integrou, em um único processo de otimização, tanto intervenções para aumento de capacidade quanto a renovação de ativos antigos, utilizando o software Optimizer™. Foram simulados mais de 57 mil cenários em análise multiobjetivo e aproximadamente 168 mil em análise de objetivo único. Os resultados mostraram que as soluções otimizadas apresentaram desempenho hidráulico de até 6,5 vezes superior às propostas tradicionais, utilizando o mesmo orçamento. A curva de Pareto obtida evidenciou o *trade-off* entre custo e desempenho, fornecendo uma base quantitativa para decisões mais racionais. A abordagem se mostrou replicável e adaptável a outros sistemas, desde que as deficiências hidráulicas possam ser modeladas e os custos atribuídos. Trata-se, portanto, de uma ferramenta estratégica para o planejamento eficiente e moderno de sistemas de abastecimento de água.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização de SDA, Modelo Hidráulico, Algoritmo Genético

INTRODUÇÃO

Evolução da Complexidade dos Sistemas de Distribuição de Água

O sistema de distribuição de água (SDA) é um conjunto integrado de estruturas, processos e equipamentos destinados a transportar a água dos mananciais até os consumidores finais, visando manter as condições adequadas de pressão, vazão e qualidade ao longo de toda a rede (Tsituya, 2006). Historicamente, os SDAs representam um dos ativos organizacionais mais relevantes para o funcionamento das sociedades urbanas (Parvaze *et al.*, 2023). A busca por formas de captação, condução e distribuição de água acompanha a história das civilizações. Desde os canais de irrigação no Egito e na Mesopotâmia (cerca de 6000 - 7000 a.C.), passando pelos sistemas desenvolvidos na Grécia e na Ásia (2000 - 200 a.C.), até os aquedutos romanos (aproximadamente 100 d.C.), observa-se uma evolução constante das soluções voltadas ao uso urbano da água. Na era moderna, destacam-se o sistema de abastecimento de água implementado em Londres em 1237 e o primeiro sistema público nos Estados Unidos, instalado na Pensilvânia em 1754 (Mays, 2000).

No Brasil, a primeira cidade a contar com um sistema de abastecimento de água foi o Rio de Janeiro. Inicialmente, realizava-se a escavação de poços, cujas águas eram posteriormente aduzidas até os centros urbanos. Com o tempo, foram construídos aquedutos que conduziam as águas dos rios até os chafarizes públicos da cidade (Azevedo Neto, 1984). O primeiro aqueduto do Rio de Janeiro foi construído em 1723 (Frias, 2015), enquanto em São Paulo os primeiros registros de chafarizes e adutoras datam de 1744 (Sant'Anna, 2019). No entanto, apenas em 1842 foi elaborado o primeiro projeto de distribuição de água para a cidade de São Paulo (Tsituya, 2006), e em 1876 para o Rio de Janeiro (Azevedo Neto, 1984).

Alguns marcos internacionais também merecem destaque por representarem avanços significativos em relação aos sistemas modernos de abastecimento público. Entre eles, destacam-se a introdução de medidores distritais em Londres, em 1880, e o primeiro estudo sistemático sobre perdas de água, realizado em Glasgow, Escócia, em 1881. No Brasil, o primeiro levantamento de perdas em sistemas de abastecimento foi realizado apenas em 1950 (Tsituya, 2006). Esses eventos históricos ilustram a evolução técnica dos sistemas de abastecimento e refletem a crescente complexidade e sofisticação das redes ao longo do tempo.

Com o avanço da urbanização e o crescimento populacional ao longo dos anos, os SDAs passaram a operar em escalas cada vez maiores, incorporando configurações físicas mais sofisticadas (Mala-Jetmarova *et al*., 2018). Os sistemas implantados nas cidades contemporâneas apresentam uma pesada e complexa infraestrutura, compreendendo uma malha de alta densidade de elementos interligados, como tubulações, bombas, válvulas e dispositivos de controle, o que torna sua gestão mais desafiadora (Tsituya, 2006, Abrahão, 2020). Além disso, a maior parte desses componentes está instalada em subsolo, frequentemente com idades e condições variadas (Grigg, 2024), o que dificulta o monitoramento, o planejamento de intervenções e a resposta a falhas operacionais, aspectos que reforçam a necessidade de ferramentas digitais capazes de representar e gerenciar a infraestrutura de forma integrada.

Nesse contexto, ganha relevância a adoção de tecnologias de representação digital, como ambientes baseados em GIS (do inglês *Geographic Information System*) e CAD (do inglês *Computer-aided Design*), que permitem estruturar, visualizar e integrar dados espaciais e operacionais dos sistemas de abastecimento de forma mais precisa e acessível. Essas ferramentas têm se tornado fundamentais para a consolidação de cadastros técnicos modernos e para a gestão eficiente de sistemas complexos em ambientes urbanos (Abrahão, 2020). A importância dessa estruturação digital é evidenciada pelo crescente número de iniciativas voltadas ao levantamento, digitalização e atualização cadastral promovidas por empresas de saneamento nos últimos anos (Abrahão et al., 2018; Franco et al., 2023; Jesus et al., 2024; Franco et al., 2024; Lima et al., 2024).

A complexidade do funcionamento dos SDAs está associada não apenas à sua configuração física, mas também à dinâmica operacional necessária para atender a demandas variáveis no tempo e no espaço, mantendo a eficiência e a segurança do abastecimento (Salehi, 2021). Para além do controle básico, esses sistemas exigem atualmente programas de suporte à operação voltados à redução de perdas por vazamentos, controle de pressões, monitoramento da qualidade da água e otimização do uso energético (Marini, 2023). Soma-se a isso o impacto crescente de fatores externos, como mudanças climáticas, secas severas e gestões inadequadas, que têm intensificado a pressão sobre os recursos hídricos em diferentes regiões do mundo, adicionando uma camada adicional de complexidade à gestão dos SDAs (Salehi, 2021).

Modelagem Hidráulica de SDAs e Aplicação em Planos Diretores de Água

As demandas sobre os sistemas de abastecimento de água tornaram-se progressivamente mais desafiadoras, exigindo contínuos levantamentos de campos, intervenções estruturais e operacionais para viabilizar a regularidade e a eficiência do abastecimento. Observa-se não apenas a necessidade de projetar e implantar novos SDAs, como também de realizar ampliações, reabilitações e reconfigurações em sistemas existentes. Tais ações são motivadas tanto pela busca por maior capacidade hidráulica e disponibilidade hídrica, quanto pela necessidade de substituição de componentes antigos e deteriorados, que podem comprometer a eficiência, a confiabilidade operacional e a qualidade da água distribuída (Mala-Jetmarova *et al*., 2018).

Nesse contexto, surgiu a aplicação de modelos computacionais como ferramentas de apoio ao planejamento e à tomada de decisão em SDAs. A modelagem de sistemas de distribuição, também conhecida como modelagem hidráulica, consiste no uso de modelos matemáticos computacionais para simular o desempenho do sistema em diferentes condições operacionais, sem a necessidade de intervenção direta na rede real (Methods *et al*., 2003). Essencialmente, um modelo hidráulico de redes de distribuição aplica os fundamentos da Hidráulica, mais especificamente as leis da Conservação da Massa nos nós e da Conservação de Energia nas malhas (tubulações), considerando condições de contorno, como a forma de entrada e saída de água no sistema, os níveis dos reservatórios, a operação de bombas, além das demandas e da localização dos consumidores (Manzi, 2020). Essa abordagem permite resolver uma ampla variedade de questões relacionadas a projeto, operação, planejamento do sistema, qualidade da água, controle de perdas, gestão energética e resposta a emergências (AWWA, 2017).

Os softwares de simulação modernos contam com interfaces gráficas que facilitam a construção e manipulação do modelo, possibilitando a inserção de elementos como tubulações, reservatórios e válvulas diretamente sobre uma base georreferenciada (GIS), com a definição de seus atributos físicos e hidráulicos. Além disso, esses ambientes permitem a visualização dos resultados das simulações, como pressões e velocidades nas tubulações ou níveis nos reservatórios, ao longo do tempo, por meio de animações ou mapas temáticos (Methods *et al*., 2003).

A partir da década de 1990, observou-se um crescimento exponencial nas capacidades da modelagem hidráulica de SDAs (AWWA, 2017). Um dos marcos desse avanço foi o lançamento do EPANET, motor de simulação desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (do inglês *US Environmental Protection Agency*, US EPA), disponibilizado gratuitamente para apoiar pesquisas e aplicações práticas. Dentre suas funcionalidades, o EPANET permite (US EPA, 2020):

- Modelar um número ilimitado de componentes hidráulicos, como nós e trechos de tubulação;
- Aplicar diferentes equações de perda de carga, incluindo Hazen-Williams, Darcy-Weisbach e Chezy-Manning);
- Considerar perdas localizadas em acessórios hidráulicos por meio do método dos coeficientes de perda (Ks);
- Simular bombas com velocidade variável, associadas a sistemas com inversores de frequência;
- Representar a atuação dos principais tipos de válvulas, como válvulas de manobra, retenção, redutoras e reguladoras de pressão; e
- Modelar consumo dependente da pressão nos nós, representando dispositivos emissores como vazamentos e sistemas de irrigação por gotejamento.

Com o tempo, empresas privadas passaram a incorporar o motor de simulação do EPANET em interfaces gráficas com mais recursos e integradas a softwares líderes em CAD e GIS, ampliando as funcionalidades e facilitando o uso por profissionais do setor. Recursos como simulações em período estendido e modelagem da qualidade da água tornaram-se funcionalidades padrão nos principais pacotes comerciais (AWWA, 2017).

Os modelos hidráulicos de SDAs podem ser aplicados em diferentes escalas e objetivos. Destaca-se, contudo, sua utilização no planejamento de longo prazo (*master planning*) em Planos Diretores de Água (PDAs), tanto para novas expansões como para reabilitação de sistemas existentes. Esse processo envolve a análise detalhada de diversos aspectos do sistema de abastecimento, com o objetivo de identificar projetos prioritários de investimento em infraestrutura que assegurem a continuidade e qualidade do serviço prestado. O planejamento pode contemplar projeções de crescimento e uso da água para horizontes temporais de 5, 10, 20 ou até 30 anos (Methods *et al*., 2003).

Ao apoiar a elaboração de PDAs, os modelos hidráulicos desempenham um papel importante na análise de alternativas de intervenção, com impactos diretos tanto sobre os custos de capital (*Capital Expenditure* – CAPEX) quanto sobre os custos operacionais (*Operatitonal Expenditure* – OPEX) do sistema. Por meio da simulação de diferentes cenários, como expansão de rede, setorização, substituição de tubulações ou adição de novos reservatórios, é possível avaliar o desempenho hidráulico e energético de cada solução antes de sua implantação.

No contexto do CAPEX, a modelagem permite, por exemplo, comparar configurações de traçado e diâmetros de redes para atender a demandas futuras com menor volume de obras e menor custo de infraestrutura. Também possibilita otimizar a localização e a capacidade de reservatórios, reduzindo a necessidade de grandes investimentos em terrenos, estruturas e conexões. Já em relação ao OPEX, os modelos ajudam a prever o impacto de diferentes estratégias operacionais sobre o consumo de energia, identificando situações de sobrepressão que poderiam ser corrigidas com válvulas redutoras ou ajustes no regime de bombeamento.

Além disso, a modelagem fornece subsídios técnicos para decisões como a divisão em Distritos de Medição e Controle (DMCs), o redimensionamento de trechos críticos e o escalonamento de projetos ao longo do horizonte de planejamento. Também permite a simulação de diferentes cenários de demanda, condições de abastecimento e estratégias operacionais, possibilitando a análise de impactos no sistema e a avaliação de soluções para uma variedade de contextos. Dessa forma, os investimentos podem ser priorizados com base em critérios de eficiência hidráulica, impacto financeiro e risco operacional.

Manzi (2020) destaca que a construção de modelos hidráulicos, mesmo diante de cadastros incompletos ou incertezas operacionais, pode ser uma ferramenta importante para a compreensão da dinâmica real do sistema e para a identificação de inconsistências cadastrais, sem a necessidade de escavações ou intervenções invasivas em campo. Isso significa que, mesmo modelos preliminares, quando bem estruturados, permitem realizar análises exploratórias úteis para o diagnóstico de pressões excessivas, áreas de baixa vazão, eventuais desconformidades hidráulicas e regiões mal atendidas pela rede. Esses diagnósticos podem orientar inspeções direcionadas, calibragens pontuais e investimentos mais precisos, contribuindo para um uso mais eficiente dos recursos, com impacto direto sobre o CAPEX e o OPEX do sistema. Assim, o modelo deixa de ser apenas uma ferramenta de simulação para se tornar um instrumento prático de apoio à priorização de ações e ao planejamento financeiro.

Apesar das múltiplas possibilidades oferecidas pelos modelos hidráulicos, sua utilização convencional apresenta limitações quando aplicada ao processo de avaliação de alternativas em estudos de planejamento. Em geral, cada cenário a ser simulado exige a definição de uma configuração específica da rede, envolvendo decisões como o traçado das tubulações, os diâmetros adotados, a localização e capacidade dos reservatórios, os regimes de operação de bombas, entre outros parâmetros. Para cada nova alternativa de projeto, o modelador precisa realizar manualmente essas alterações na geometria do sistema, ou ajustar as demandas (e.g. cenário de maior consumo ou consumo médio) e executar novamente a simulação. Esse processo, além de ser altamente dependente da experiência do usuário do modelo, é oneroso em termos de tempo e não garante que as soluções testadas representem, de fato, as melhores em custo e em eficiência hidráulica entre o conjunto de possibilidades.

Por exemplo, ao se avaliar a substituição de um conjunto de tubulações ou a setorização de uma área de abastecimento, diferentes combinações de intervenções podem resultar em desempenhos hidráulicos bastante distintos. Isso exigiria centenas ou até milhares de simulações manuais para uma análise completa, o que se torna impraticável em estudos de grande escala. A complexidade aumenta ainda mais quando se consideram alternativas para outras estruturas, como o redimensionamento de reservatórios, ampliação de estações de tratamento ou diferentes estratégias de operação. Além disso, calcular o custo associado a cada uma dessas alternativas, a fim de avaliar sua relação custo-benefício, representa um desafio adicional que consome tempo e recursos. Assim, torna-se necessário o uso de abordagens computacionais que automatizem a geração, avaliação e comparação de múltiplas alternativas, ampliando a capacidade analítica dos modelos hidráulicos.

O avanço no acesso a dados, capacidade computacional e investimentos em pesquisa e desenvolvimento têm ampliado as aplicações dos modelos hidráulicos para áreas cada vez mais complexas e automatizadas (AWWA, 2017). Nesse contexto, destaca-se a integração de técnicas de otimização com os modelos de simulação, em especial o uso de algoritmos genéticos, que permitem explorar automaticamente a eficiência financeira-hidráulica de múltiplas alternativas de projeto ou operação de sistemas de abastecimento de água, superando as limitações das análises tradicionais.

Otimização de SDAs por meio de Algoritmo Genético

A otimização de redes de distribuição de água visa minimizar o uso de recursos e os custos envolvidos, ou maximizar a eficiência operacional e os benefícios obtidos (Parvaze *et al.*, 2023). Projetar SDAs economicamente eficientes é uma tarefa desafiadora, que exige a resolução simultânea de diversas equações hidráulicas não lineares, otimizando a dimensão, a localização e o estado operacional de componentes como tubulações, bombas, reservatórios e válvulas (Batchabani & Fuamba, 2014). A complexidade do problema se intensifica quando se incluem múltiplos objetivos (como qualidade da água ou resiliência a incêndios), exigências mais próximas da realidade (como incertezas e fases construtivas), ou quando se busca atender simultaneamente a diversos critérios de desempenho que competem entre si (Mala-Jetmarova *et al.*, 2018).

Tradicionalmente, o dimensionamento de redes é realizado com base em experiências empíricas. No entanto, nas últimas décadas, tem crescido significativamente o corpo de estudos dedicados à aplicação de técnicas de otimização em sistemas de distribuição de água (Nicklow *et al.*, 2010). A otimização, nesse contexto, é uma ferramenta de engenharia voltada à busca automática de um conjunto de variáveis de decisão que satisfaça restrições operacionais e proporcione a melhor resposta para uma função objetivo previamente definida. Com o avanço da capacidade computacional, tornou-se viável resolver problemas de maior escala e complexidade por meio dessas técnicas, e hoje uma ampla variedade de métodos é utilizada para enfrentar diferentes desafios da área de sistemas de abastecimento de água (Reddy & Kumar, 2020).

Entre essas técnicas, destacam-se os algoritmos evolutivos (*Evolutionary Algorithms* – EAs), que ganharam notoriedade nas últimas três décadas como uma abordagem promissora para a otimização de sistemas complexos. Esses algoritmos têm sido amplamente aplicados no planejamento, na calibração de modelos e na formulação de estratégias de gestão em recursos hídricos (Reddy & Kumar, 2020). Dentre os métodos evolutivos, os algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms* – GAs) se destacam por sua ampla utilização e por serem inspirados nos processos de evolução biológica (Goldberg, 1989).

Os algoritmos genéticos são especialmente eficazes para resolver problemas de otimização não linear, como os que surgem no equacionamento e planejamento de sistemas de distribuição de água (SDAs). Inspirados nos princípios da biologia, esses algoritmos utilizam conceitos de genética populacional para simular um processo evolutivo de busca por soluções. Mecanismos como cruzamento, mutação e seleção natural são aplicados iterativamente sobre uma população de soluções candidatas. Inicialmente, essa população pode ser gerada de forma totalmente aleatória, cobrindo uniformemente o espaço de busca (Parvaze *et al.*, 2023), ou, alternativamente, pode ser parcialmente composta por soluções previamente conhecidas como promissoras, chamadas de *seeds* (sementes), com o intuito de direcionar a busca inicial. Cada indivíduo representa uma solução potencial, composta por "genes" que codificam os parâmetros de projeto.

Em aplicações voltadas a modelos hidráulicos de redes de distribuição, os “genes” que compõem cada indivíduo da população podem representar diferentes parâmetros de projeto, como por exemplo, a utilização ou não de um trecho de tubulação, variação do diâmetro das tubulações em cada trecho, o posicionamento de válvulas, o volume útil de reservatórios ou a curva característica de operação de bombas. Cada indivíduo, portanto, define uma solução completa e autônoma para o sistema, cujas características são convertidas em dados de entrada para motores de simulação hidráulica como o EPANET. O algoritmo genético atua como um mecanismo de geração e aprimoramento contínuo de alternativas estruturais e operacionais, aprendendo iterativamente os padrões de custo-benefício do sistema a partir das soluções hidraulicamente mais eficientes encontradas em gerações anteriores, e não apenas por meio da geração aleatória de alternativas.

A cada geração, os indivíduos de uma população são avaliados com base em uma função objetivo, que é uma expressão matemática que representa os critérios de desempenho definidos para o problema de otimização. No contexto dos SDAs, essas funções podem ser formuladas para minimizar custos, maximizar a confiabilidade do sistema, ou equilibrar múltiplos fatores operacionais e ambientais. De acordo com Mala-Jetmarova *et al.* (2018), as funções objetivo em SDAs podem ser agrupadas em quatro categorias principais: (i) econômicas, que incluem os custos de ciclo-de-vida de implantação, reabilitação e operação; (ii) comunitárias, relacionadas à qualidade do serviço prestado aos usuários, como manutenção de pressão e qualidade da água; (iii) de desempenho, que avaliam a robustez e a confiabilidade da rede; e (iv) ambientais, que consideram as emissões de gases de efeito estufa e os impactos das obras sobre o meio ambiente. A escolha da função objetivo (ou de múltiplas funções,

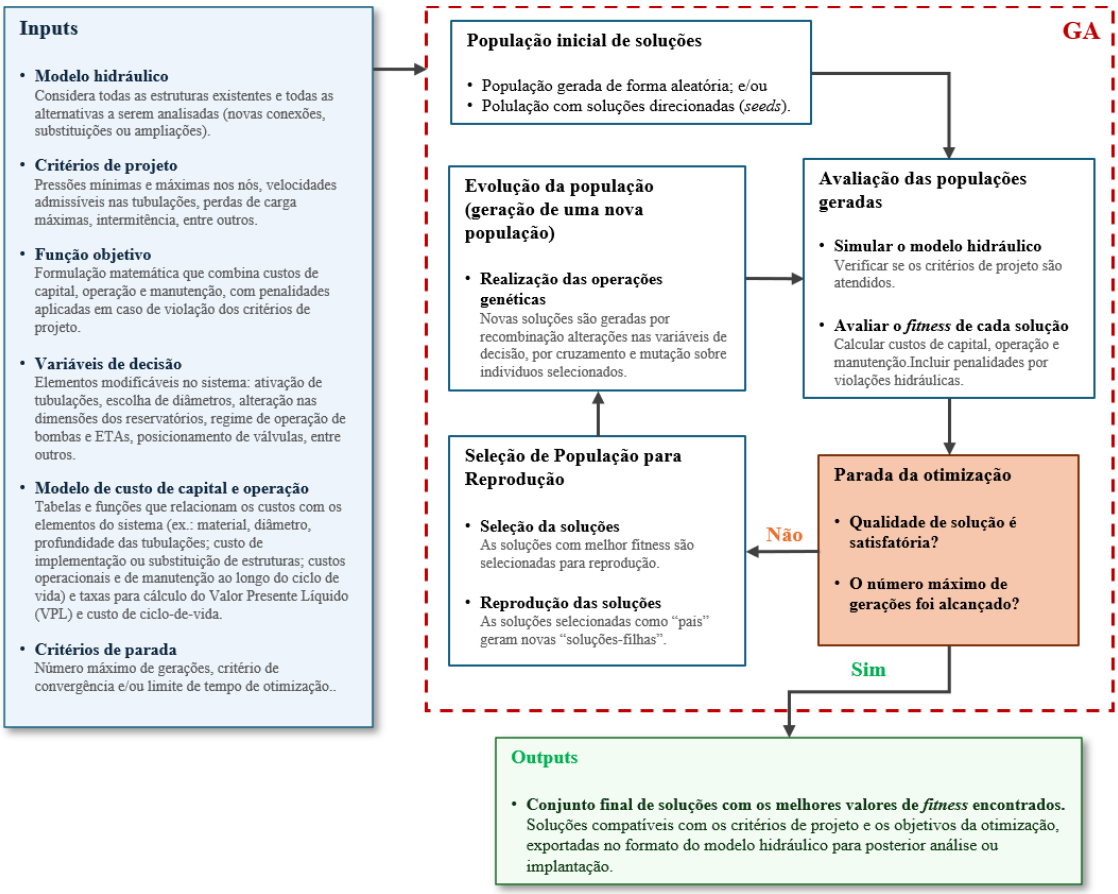
no caso de otimizações multiobjetivo) define o rumo da busca por soluções mais adequadas, podendo essas serem minimizadas ou maximizadas (Nicklow *et al*., 2010; Mala-Jetmarova *et al*., 2018).

Durante o processo evolutivo, a função objetivo é utilizada para calcular o *fitness* de cada indivíduo, isto é, uma medida quantitativa de sua aptidão ou qualidade relativa. O *fitness* é, portanto, uma transformação da função objetivo, adaptada para que o algoritmo genético possa comparar e selecionar soluções. Em problemas de minimização, por exemplo, é comum utilizar o inverso da função objetivo (1/custo) como valor de *fitness*, de forma que soluções com menor custo apresentem maior aptidão (Simpson *et al*., 1994). Essa transformação é fundamental, pois o algoritmo atua sobre a maximização do *fitness* para guiar a seleção evolutiva (Nicklow *et al.*, 2010; Reddy & Kumar, 2020).

A otimização por meio de algoritmos genéticos é um processo iterativo de evolução de soluções, em que os indivíduos com maior *fitness* são mais propensos a serem selecionados como "pais" para compor a próxima geração. A partir do cruzamento de seus "genes" (parâmetros de projeto) e da introdução de mutações aleatórias, são geradas novas "soluções-filhas", que compõem uma nova população. Esse ciclo é repetido, conforme ilustrado no fluxograma da **Figura 1**, até que um critério de parada seja atingido, como um número máximo de gerações, tempo computacional ou estabilização dos resultados (Reddy & Kumar, 2020).

Esse processo de seleção e recombinação imita o princípio darwinista da "sobrevivência dos mais aptos", sendo especialmente vantajoso por sua capacidade de explorar extensos espaços de busca não lineares. Isso permite investigar diversas configurações hidráulicas e estruturais mesmo em cenários com múltiplas variáveis e restrições interdependentes. Além disso, como o algoritmo evolui progressivamente em direção às soluções com melhor desempenho nas simulações hidráulicas, torna-se possível incorporar simultaneamente critérios técnicos (como pressão, velocidade e nível) e econômicos (como custos de capital, operação e manutenção), mesmo em sistemas de alta complexidade, conforme definido pelos objetivos da otimização.

Figura 1 – Fluxograma do Processo de Otimização dos Modelos Hidráulicos de SDAs por meio de Algoritmo Genético



Fonte: elaboração própria.

O processo de otimização de modelos hidráulicos com o uso de algoritmos genéticos, conforme ilustrado na **Figura 1**, pode envolver ciclos repetitivos de avaliação que se estendem por centenas de milhares de simulações. Isso ocorre porque, para alcançar soluções com o melhor valor de *fitness*, ou seja, que atendam de forma mais eficiente aos critérios de projeto e aos objetivos da otimização, o algoritmo precisa explorar um grande espaço de possibilidades, gerando e avaliando diversas alternativas ao longo das gerações.

O critério de parada assume, nesse contexto, um papel fundamental. É ele que define em que momento a otimização será encerrada, e deve ser estabelecido com base na experiência do engenheiro de otimização e na complexidade do sistema modelado. Usualmente, esse número pode variar de 20.000 a 100.000 gerações por rodada de otimização. Valores muito baixos podem resultar em exploração insuficiente do espaço de soluções, levando o algoritmo a convergir para ótimos locais, isto é, soluções que aparentam ser as melhores dentro de um subconjunto do problema, mas que deixam de considerar alternativas mais vantajosas em um espaço de busca mais amplo. Por outro lado, definir um número excessivamente alto de gerações pode gerar redundância: mesmo com mutações e recombinações, as soluções tendem a se estabilizar, convergindo matematicamente para o mesmo valor de *fitness* após certo ponto, sem ganhos adicionais significativos.

Outra técnica comumente utilizada no processo de otimização é a otimização sequencial em múltiplas rodadas. Nesse caso, a primeira rodada considera uma população inicial composta por soluções aleatórias e, eventualmente, soluções direcionadas (*seeds*) que já atendem parcialmente aos critérios de projeto. Após essa primeira otimização, os melhores indivíduos obtidos, as soluções com maior fitness, são utilizados como população inicial da próxima rodada, funcionando como um novo conjunto de *seeds*. Com isso, o processo de busca evolutiva passa a ser direcionado a partir de soluções já otimizadas, aumentando a eficiência computacional e a probabilidade de encontrar soluções ainda mais refinadas.

Esse método permite a realização de otimizações temáticas ou parciais, em que cada rodada prioriza um conjunto específico de objetivos ou intervenções. Por exemplo, pode-se realizar uma primeira otimização voltada à ampliação de rede, uma segunda centrada na expansão de capacidade de reservatórios, e uma terceira focada na redução de perdas em setores críticos, e uma quarta incluindo todas as opções. Os resultados dessas otimizações individuais podem, então, ser combinados em uma rodada final abrangente, que utiliza as melhores soluções anteriores como base (*seeds*) para considerar simultaneamente todas as alternativas e objetivos no mesmo processo de busca. Essa abordagem estruturada permite explorar de forma mais estratégica o espaço de soluções, reduzindo a chance de convergência prematura e aumentando a diversidade e qualidade dos resultados e conclusões.

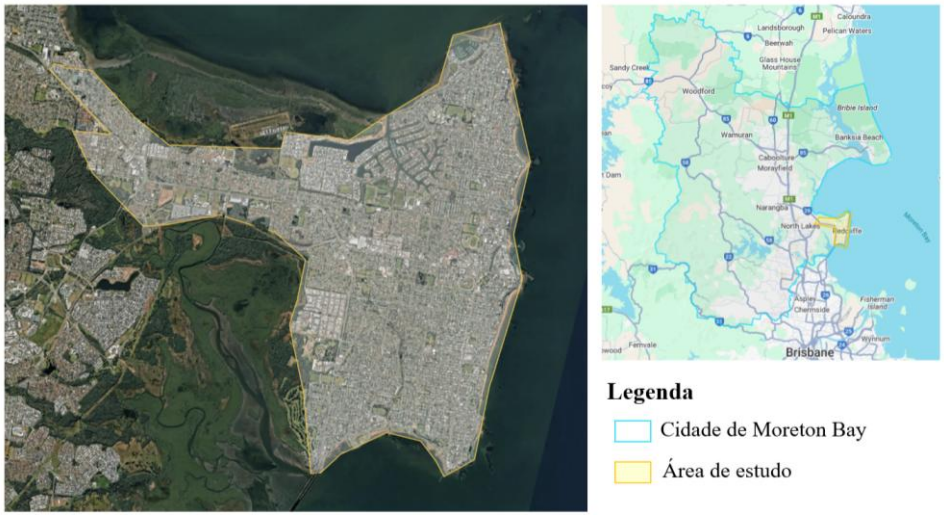
Além das decisões sobre convergência, é necessário considerar o custo computacional envolvido. Cada solução gerada pelo algoritmo é testada diretamente no modelo hidráulico, que precisa ser executado para simular o desempenho da configuração proposta. Por exemplo, se uma simulação hidráulica com período estendido de três dias leva três minutos para ser concluída, 50.000 alternativas testadas podem resultar em um tempo acumulado de 150.000 minutos, o equivalente a aproximadamente 104 dias. Para lidar com esse desafio, é comum que otimizações baseadas em algoritmos genéticos sejam realizadas em ambientes de computação em nuvem, utilizando múltiplos núcleos de processamento paralelos, o que significantemente reduz o tempo total de execução (por exemplo, de 4 a 12 horas), mas também acarreta custos financeiros adicionais.

Dessa forma, o engenheiro de otimização de SDAs precisa avaliar o número necessário de gerações, balanceando entre abrangência da busca, tempo de execução e recursos computacionais disponíveis. Além disso, deve-se estabelecer critérios claros de desempenho e convergência que garantam que o processo evolutivo esteja produzindo soluções de qualidade sem comprometer a viabilidade do projeto ou do cronograma. Mais do que apenas compreender a lógica dos algoritmos genéticos, esse profissional deve possuir conhecimento sólido em modelagem hidráulica, domínio dos fundamentos de engenharia de sistemas de abastecimento de água e, principalmente, familiaridade com as condições reais de operação do sistema estudado. É fundamental entender quais soluções são, de fato, tecnicamente viáveis e implementáveis na prática, considerando restrições físicas, operacionais, econômicas e institucionais. Essa visão integrada entre otimização, simulação e realidade operacional é o que torna a aplicação dos algoritmos genéticos uma ferramenta eficaz no apoio à tomada de decisão em projetos de planejamento, reabilitação e expansão de sistemas de distribuição de água.

Estudo de Caso – Otimização do SDA da Região de Redcliffe, na cidade de Moreton Bay na Austrália

O estudo de caso apresentado neste trabalho refere-se à região de Redcliffe, localizada na cidade de Moreton Bay, no estado de Queensland, na costa leste da Austrália, nas proximidades de Brisbane. O estudo foi contratado pela concessionária local responsável pelo sistema de abastecimento de água da região, e desenvolvido pelos autores deste artigo, com base no modelo hidráulico previamente calibrado (com dados reais de operação) fornecido pela empresa. A **Figura 2** ilustra a localização geográfica da área estudada, destacando a área específica do estudo que contempla o modelo hidráulico do sistema de distribuição de água da região.

Figura 2 - Localização da área de estudo e abrangência do modelo hidráulico em Redcliffe, Austrália



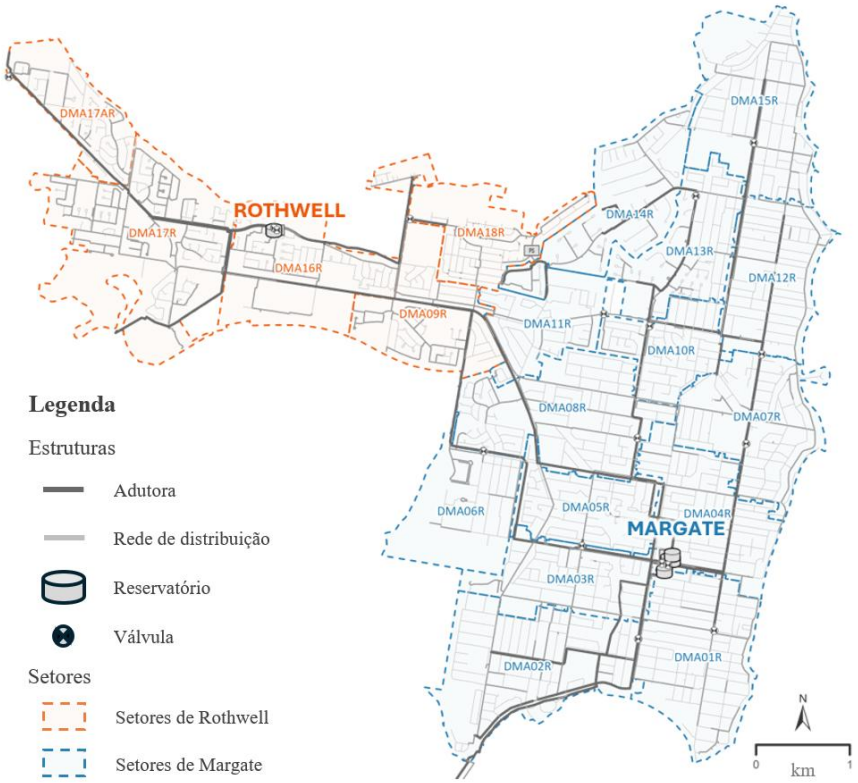
Fonte: elaboração própria a partir de imagens do Google Earth e Google Maps.

A área de atendimento do sistema de distribuição de água de Redcliffe atualmente possui uma demanda modelada correspondente a aproximadamente 83.000 habitantes equivalentes, conforme dados de 2021 fornecidas pela empresa responsável pelo SDA. Essa estimativa inclui tanto o consumo residencial quanto o não residencial, sendo que 82,4% da demanda é atribuída ao uso doméstico e os 17,6% restantes correspondem a atividades comerciais, industriais e institucionais. As projeções demográficas realizadas no âmbito do plano diretor urbano indicam um crescimento populacional relativamente constante de cerca de 0,8% ao ano, com expectativa de que a região atinja cerca de 106.000 habitantes até o ano de 2051. Esses dados indicavam a necessidade de planejamento estratégico para que a capacidade do sistema em atender à demanda futura fosse com eficiência e confiabilidade.

A rede hidráulica da região é composta por aproximadamente 395 km de tubulações pressurizadas, subdivididas em 57 km de adutoras de maior diâmetro (DN > 200 mm), responsáveis pelo transporte principal de água, e 338 km de redes de distribuição (DN ≤ 200 mm), que atendem diretamente os consumidores finais. O sistema é alimentado por dois reservatórios principais localizados em Rothwell e Margate. A área de atendimento está ainda dividida em 19 distritos de medição setorizados. O modelo hidráulico utilizado neste estudo foi fornecido pela companhia responsável pelo abastecimento e se encontrava no software InfoWater, software desenvolvido pela Autodesk que integra funcionalidades de modelagem hidráulica com ambiente GIS. A **Figura 3** apresenta o esqueleto do modelo hidráulico da região, destacando a malha principal e secundária.

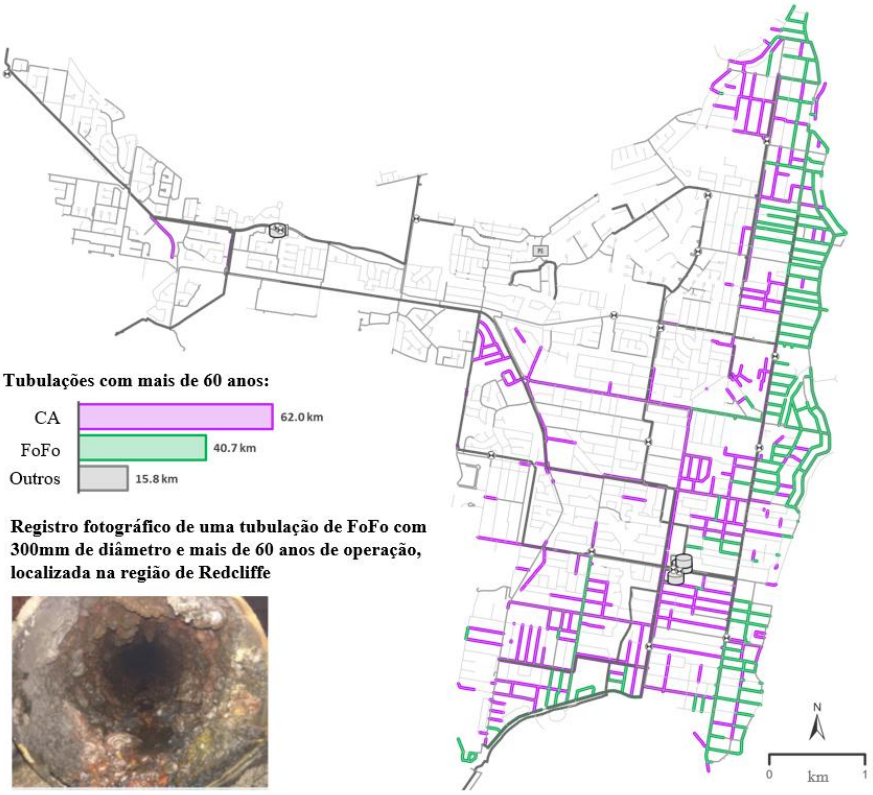
No que se refere à idade da infraestrutura, as tubulações da rede apresentam, em média, cerca de 45 anos, com aproximadamente 30% dos segmentos operando há mais de seis décadas. A maior parte dessas adutoras é composta por materiais tradicionalmente utilizados nas décadas passadas, como ferro fundido (FoFo) e cimento amianto (CA), que atualmente estão associados a elevados índices de falhas estruturais. Estudos técnicos internos da empresa responsável indicam que esses materiais são responsáveis por cerca de 80% das rupturas e vazamentos registrados em sistemas similares. Como consequência, observa-se um aumento nas perdas de carga ao longo das tubulações, decorrente do acúmulo de incrustações e do desgaste interno. Especificamente, as adutoras de ferro fundido são responsáveis por cerca de 40% das falhas por perda de carga identificadas no modelo hidráulico de 2021, devido aos elevados coeficientes de atrito considerados nas simulações. A **Figura 4** destaca os trechos de tubulações de ferro fundido e cimento amianto com mais de 60 anos de operação.

Figura 3 - Modelo hidráulico do SDA de Redcliffe e localização dos reservatórios principais



Fonte: elaboração própria a partir do modelo hidráulico fornecido.

Figura 4 - Indicação das tubulações de FoFo e CA com mais de 60 anos no SDA de Redcliffe



Fonte: elaboração própria a partir do modelo hidráulico fornecido.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Diante desse cenário, o sistema de Redcliffe enfrenta um desafio duplo: expandir sua capacidade para atender à demanda futura prevista e, simultaneamente, modernizar uma infraestrutura envelhecida e suscetível a falhas. Assim, a concessionária local de abastecimento de água implementou um projeto piloto de otimização utilizando ferramentas de computação em nuvem com inteligência computacional aplicando algoritmos genéticos. O objetivo do projeto foi demonstrar a aplicação da abordagem de otimização e priorização em um sistema real, estabelecendo um programa de intervenções que integrasse, de forma simultânea, otimizada, e cronológica, a substituição de redes antigas e o aumento da capacidade hidráulica do sistema.

Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho hidráulico da rede de distribuição de Redcliffe, com base no modelo InfoWater fornecido pela concessionária, considerando os cenários de 2021 (situação atual) e 2051 (horizonte de projeto).
- Propor melhorias de capacidade e substituição de ativos envelhecidos em uma única análise de otimização, visando resolver falhas relacionadas a pressões máximas e mínimas (para abastecimento regular e para vazões emergenciais de combate a incêndio), perda de carga excessiva e níveis mínimos operacionais dos reservatórios de Rothwell e Margate.
- Desenvolver uma solução otimizada e priorizada para o atendimento das demandas futuras, utilizando algoritmos genéticos em ambiente de computação em nuvem.

METODOLOGIA UTILIZADA

Dados Disponíveis e Definição dos Critérios de Projeto

Os dados utilizados neste estudo, incluindo o modelo hidráulico previamente calibrado com base em dados reais de medição na rede, além das informações de custo de capital, operação e manutenção, foram fornecidos pela concessionária responsável pelo sistema de abastecimento de água de Redfcliffe (*Unitywater*) aos autores deste artigo para fins de desenvolvimento da análise de otimização. Os critérios de projeto adotados neste estudo foram definidos com base nas diretrizes do código de projeto e construção de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário de *South East Queensland* (*SEQ WS&S D&C Code*), além das premissas hidráulicas e operacionais presentes no modelo fornecido pela concessionária local. Todas as demandas e parâmetros hidráulicos utilizados foram importados diretamente do modelo fornecido, desenvolvido previamente no contexto do planejamento diretor da área de estudo pela *Unitywater*.

No que se refere à representação da rugosidade interna das tubulações, optou-se pela adoção dos fatores de atrito de *Colebrook-White* (*CW*) para todas as simulações. Embora o uso da equação de *Hazen-Williams* seja mais comum e compatível com as normas da SEQ, a escolha pelo modelo *CW* foi justificada por sua capacidade de representar de forma mais conservadora as falhas por perda de carga em cenários de combate a incêndio, além de refletir de forma mais realista o efeito da degradação de ativos envelhecidos. A **Tabela 1** apresenta o conjunto de critérios hidráulicos utilizados nas simulações, incluindo limites mínimos e máximos de pressão admissível durante hora de pico, condições mínimas para vazões de combate a incêndio, perdas de carga máximas permitidas por trecho, velocidades máximas admissíveis nas tubulações e o nível mínimo de operação nos reservatórios.

Tabela 1 - Critérios hidráulicos de projeto adotados

Critérios de Projeto	Resumo
Pressão mínima de serviço durante Hora de Pico (HP)	22 m na tubulação junto à divisa da propriedade
Pressão máxima de serviço durante HP	55 m
Condições operacionais para combate a incêndio	Pressão mínima de 12 m na tubulação no ponto do hidrante
Vazão de combate à incêndio	15 L/s por 2 horas para áreas residenciais de baixa densidade (≤ 3 pavimentos); 30 L/s por 4 horas para áreas residenciais de alta densidade e comerciais

Critérios de Projeto	Resumo
Perda de carga (PC) máxima durante HP	5 m/km para tubulações com DN < 200 mm 3 m/km para tubulações com DN 200 mm
Velocidade máxima permitida durante HP	2,5 m/s
Nível mínimo de operação dos reservatórios	Manutenção de, no mínimo, 15% da profundidade em todos os reservatórios

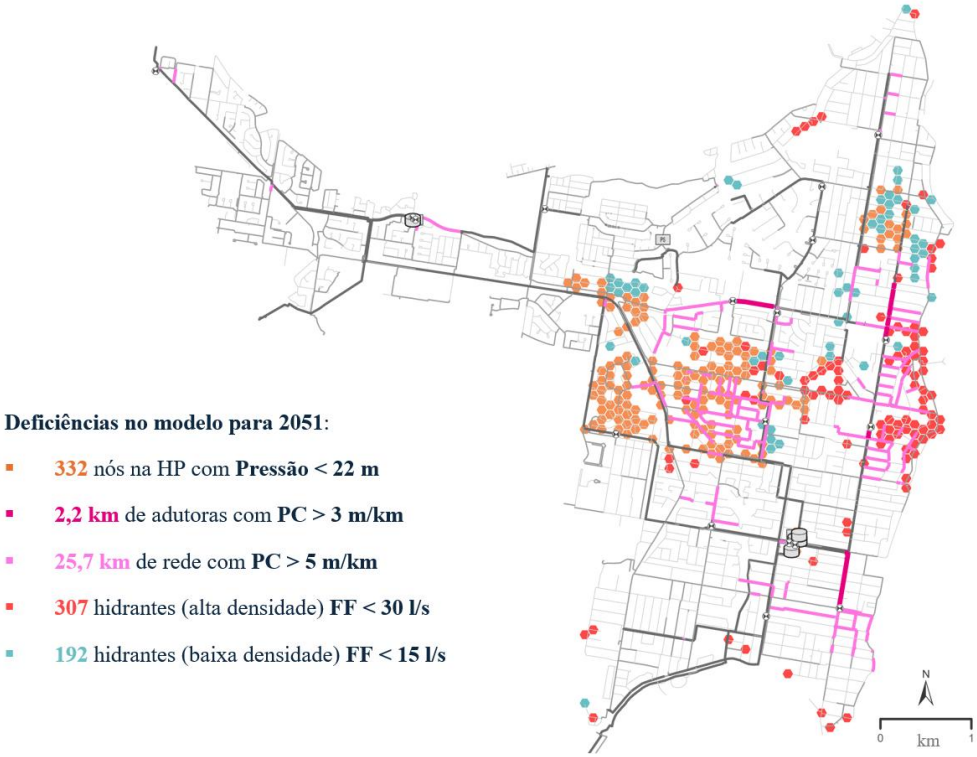
Fonte: elaboração própria a partir de dados do *SEQ WS&S D&C Code*.

Revisão do Modelo Hidráulico nas Condições do Horizonte de Projeto de 2051

O horizonte de planejamento adotado para este estudo foi o ano de 2051, considerado o cenário de demanda futura para análise de restrições de capacidade e dimensionamento das intervenções no sistema. As projeções indicam um crescimento populacional de aproximadamente 28% na região de Redcliffe, passando de cerca de 83.000 para 106.000 habitantes equivalentes entre 2021 e 2051. Além do crescimento demográfico, foram também analisadas as alturas máximas previstas para edificações no plano diretor urbano, uma vez que áreas de alta densidade podem impor demandas pontuais mais elevadas, mesmo que não apresentem deficiências globais de capacidade. Observou-se que essas áreas, embora atendam às demandas hidráulicas em termos de pressão e vazão, frequentemente não cumprem as exigências mínimas de diâmetro para redes de distribuição, conforme estabelecido pelo *Water Services of Australia Code* (versão *SEQ*).

As simulações realizadas para o cenário de 2051, com base no modelo hidráulico fornecido, evidenciaram deficiências significativas no desempenho da rede em comparação ao cenário de 2021. No modelo de 2021, foram identificados 36 pontos de consumo com pressão média de serviço inferior a 22 metros e 14,7 km de adutoras operando com perda de carga superior a 5 m/km. Já no cenário projetado para 2051, o número de pontos com pressão insuficiente aumentou para 332, um crescimento de aproximadamente nove vezes, enquanto a extensão de adutoras com perdas de carga elevadas subiu para 25,7 km, representando um aumento de cerca de 75%. Em situações de combate a incêndio, também se observou uma piora expressiva: o número de hidrantes com deficiência de vazão passou de 254 em 2021 para 499 em 2051, refletindo o impacto do crescimento da demanda sobre a capacidade da rede em manter os níveis mínimos de pressão. A **Figura *5*** apresenta o desempenho hidráulico da rede sob as demandas projetadas para 2051, sem a inclusão de melhorias estruturais.

Figura 5 - Localização das deficiências hidráulicas no modelo da rede de Redcliffe para o cenário de 2051



Fonte: elaboração própria a partir do modelo hidráulico fornecido.

Análise de Sensibilidade do Fator de Atrito nas Tubulações

Embora as diretrizes da região recomendem o uso da fórmula de *Hazen-Williams* para o cálculo das perdas de carga em redes de abastecimento, o modelo hidráulico utilizado neste estudo adotou preferencialmente a equação de *Colebrook-White*, por apresentar maior precisão e capacidade de representar, de forma mais conservadora, os efeitos da deterioração em sistemas envelhecidos. A equação de *Hazen-Williams* considera apenas o diâmetro da tubulação, ignorando variáveis importantes como material, idade e condição física das tubulações.

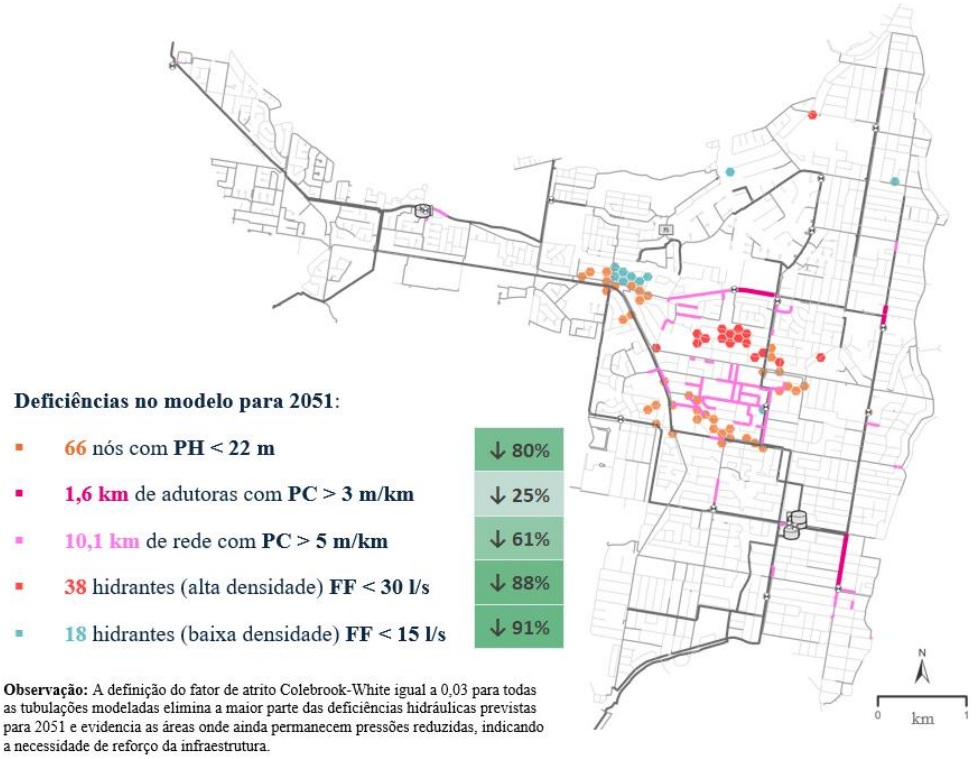
A empresa responsável pelo SDA adotou uma ampla faixa de valores de atrito *CW* no modelo, com base no tipo de material e na idade dos ativos. Destaca-se que cerca de 10,3% da rede, principalmente nas regiões próximas à orla marítima, é composta por tubulações de ferro fundido com mais de 60 anos, às quais foi atribuído um elevado fator de atrito *CW* de 29. Em comparação, o valor médio ponderado de *CW* adotado para o restante da rede foi de aproximadamente 0,27. Isso significa que os trechos de ferro fundido possuem um fator de atrito cerca de 100 vezes maior que os demais, o que explica sua participação desproporcional (~40%) nas falhas por perda de carga e nas deficiências de pressão durante cenários de hora de pico e combate a incêndio.

Para quantificar o impacto dos valores adotados de *CW* no desempenho do sistema, foi realizada uma análise de sensibilidade, comparando o desempenho hidráulico do modelo com o uso dos fatores de atrito definidos pela empresa contra quatro abordagens alternativas:

- Aplicação dos coeficientes de *Hazen-Williams* conforme recomendação do *SEQ WS&S D&C Code* (C=100 para DN ≤ 150 mm; C=110 para DN > 150 mm);
- Consideração de *CW* = 0,6 para tubulações de FoFo, conforme norma australiana *AS 2200-2006*;
- Substituição de todas as tubulações com mais de 60 anos por tubulações novas em PEAD, com *CW* = 0,03;
- Substituição total da rede, assumindo *CW* = 0,03 para as tubulações, representando uma rede nova em PEAD.

A **Figura *6*** apresenta os resultados do modelo com os valores com *CW* uniforme de 0,03, que seria o melhor caso na análise de sensibilidade, destacando as áreas em que o aumento de capacidade ainda se faz necessário para atender à demanda projetada.

Figura 6 - Impacto da redução do fator de atrito CW para 0,03 sobre as deficiências no cenário de 2051



Fonte: elaboração própria a partir do modelo hidráulico fornecido.

Os resultados dessa análise demonstraram que os valores de atrito adotados no modelo afetam significativamente o desempenho hidráulico da rede. Reduções nos valores de *CW* implicaram em uma queda acentuada nas deficiências da rede. Em particular, a adoção de *CW* = 0,03 para toda a rede reduziu as deficiências hidráulicas em mais de 80%, evidenciando que a maior parte dos problemas observados não se deve ao crescimento futuro da demanda, mas sim à degradação física das tubulações existentes.

Os valores de *CW* adotados no modelo de otimização e priorização de intervenções foram os mesmos utilizados pela empresa responsável pelo SDA, com base em critérios de idade e material. Para todas as novas tubulações consideradas nas soluções otimizadas, assumiu-se o uso de PEAD com fator de atrito *CW* = 0,03.

Otimização com Algoritmo Genético Utilizando o Optimizer

A otimização do modelo hidráulico do SDA de Redcliffe foi realizada por meio de um software baseado em computação em nuvem com inteligência computacional, o Optimizer, desenvolvido pela Optimatics (parte da SUEZ). Esse software implementa a metodologia de algoritmos genéticos para a geração de soluções otimizadas em sistemas hidráulicos complexos com objetivos conflitantes. A adoção dessa tecnologia permitiu a avaliação de centenas de milhares de combinações únicas de intervenções de ampliação e renovação de redes, com o objetivo de identificar um portfólio de investimentos custo-efetivo para resolver as deficiências hidráulicas mapeadas. Ao integrar, em uma única análise, melhorias de capacidade e substituição de ativos envelhecidos, a abordagem busca minimizar os custos do ciclo de vida do sistema e propor um programa de obras que aproveite oportunidades de ampliação em trechos já previstos para renovação, elevando o nível de serviço e acomodando o crescimento futuro da demanda.

O processo de otimização envolveu as seguintes etapas metodológicas:

1. Conversão do modelo InfoWater para EPANET
Como o software Optimizer tem a melhor operabilidade com modelos baseados em EPANET. O modelo hidráulico original, desenvolvido na plataforma InfoWater, foi convertido para o formato EPANET. A conversão foi realizada com o uso do software PCSWMM (CHI), e sua qualidade foi verificada por meio da comparação dos resultados de demandas, pressão e vazão em pontos-chave da infraestrutura e como um todo no SDA, sob cenários de demanda de hora de pico e de combate a incêndio. Essa validação verificou que a conversão não comprometeu a integridade hidráulica do modelo original.

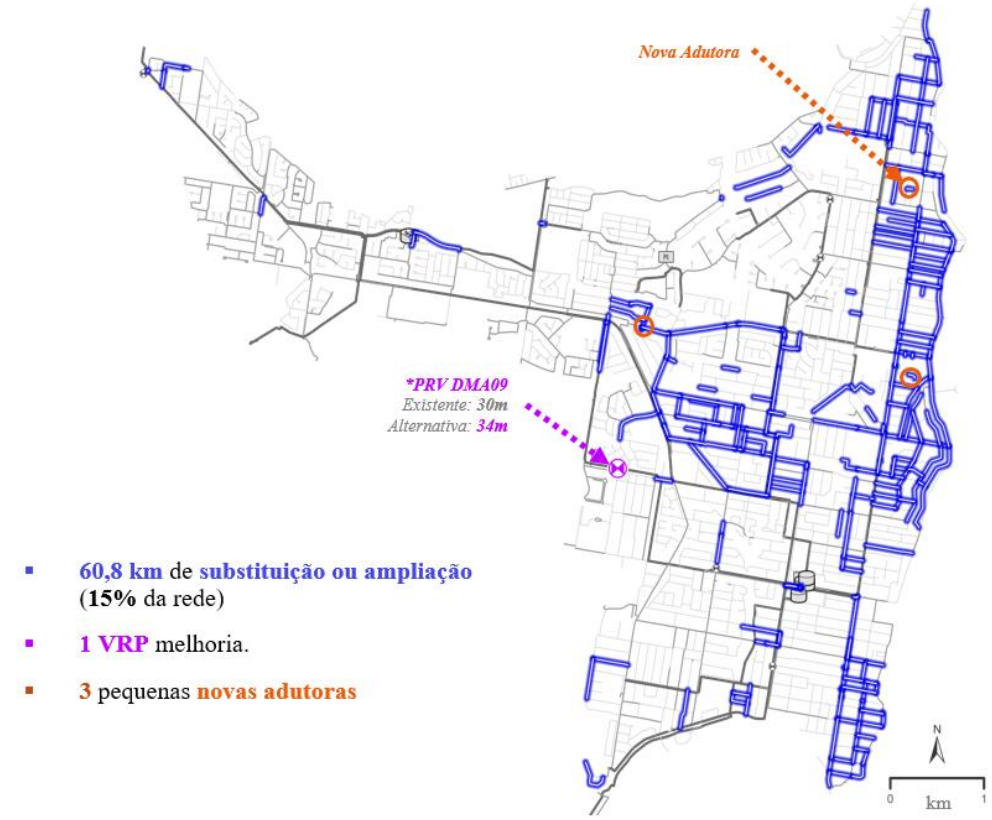
2. Definição das alternativas de intervenção (espaço de busca)
Para permitir que o algoritmo identificasse a combinação ideal entre ampliações de capacidade e renovações de ativos antigos, foi necessário definir, de forma sistemática, o conjunto de alternativas possíveis a serem consideradas no processo de otimização. Quanto maior o escopo de alternativas, maior é o espaço de busca, o tempo de processamento e a demanda computacional. Nesse estudo, as alternativas foram estruturadas a partir de 14,6 km de intervenções originalmente previstas pela empresa responsável pelo SDA, sendo 4,3 km obrigatórios na fase inicial e 10,4 km recomendados no plano diretor de 2021, e expandidas em etapas sucessivas:

- Inicialmente, foram incluídas intervenções para correção de deficiências sob condições de 2051 de hora de pico;
- Em seguida, ampliaram-se as alternativas para abranger deficiências sob condições de combate a incêndio;
- Por fim, foram incorporadas possibilidades de renovação de tubulações com mais de 65 anos, com foco especial em trechos de ferro fundido e cimento amianto.

Com essa abordagem progressiva, o escopo final de alternativas analisadas totalizou cerca de 60,8 km de redes (aproximadamente 15% da extensão total da rede modelada), incluindo ainda três pequenas adutoras e uma melhoria de uma válvula redutora de pressão (VRP). Todas as intervenções foram modeladas considerando a substituição por tubulações de material PE100 PN16 (polietileno de alta densidade), e os diâmetros internos das novas tubulações puderam ser mantidos, renovados com diâmetros equivalentes ou ampliados em até dois ou três incrementos com fator de atrito CW de 0,03, conforme a localização e a criticidade hidráulica do trecho.

Ressalta-se que, embora o plano diretor anterior já contemplasse boa parte das deficiências identificadas à época, novas limitações foram detectadas a partir da atualização do modelo hidráulico e da revisão das projeções de demanda para 2051. A **Figura** *7* apresenta a composição das alternativas consideradas, destacando os trechos previamente previstos no plano de 2021 e os acréscimos introduzidos na análise de otimização.

Figura 7 - Alternativas de soluções consideradas para o SDA de Redcliffe



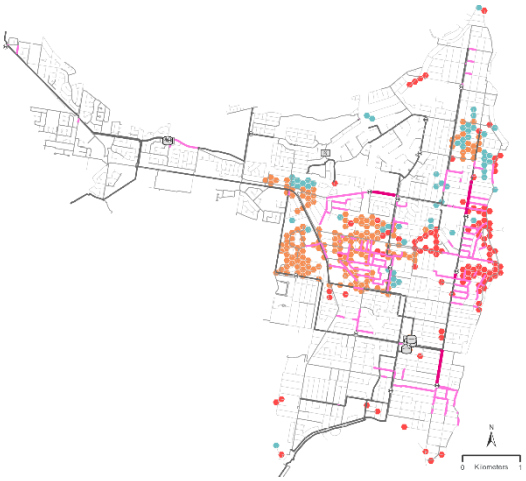
Fonte: elaboração própria a partir do modelo hidráulico fornecido.

A sequência de mapas apresentada na **Figura *8*** ilustra a evolução do desempenho hidráulico do sistema de distribuição de água de Redcliffe sob diferentes cenários de intervenção propostos para o horizonte de 2051. As análises foram conduzidas com base nos critérios de projeto definidos. No cenário base, sem qualquer intervenção, o sistema apresenta um número expressivo de deficiências hidráulicas, com destaque para a presença de diversos nós com pressão inferior a 22 metros, além de uma elevada quantidade de hidrantes com vazão insuficiente, tanto em áreas de alta densidade quanto em áreas de baixa densidade. A rede também apresenta extensos trechos com perdas de carga superiores aos limites admissíveis, indicados pelas linhas magenta e rosa. Essa condição reflete a limitação estrutural da rede existente frente às demandas projetadas para 2051.

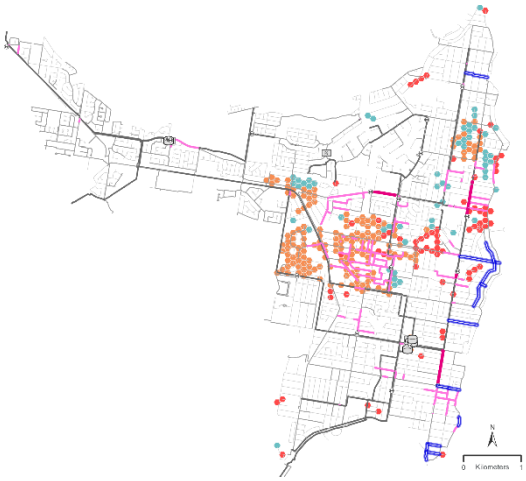
Com a introdução dos 4,3 km de intervenções obrigatórias da fase inicial, observa-se uma leve redução das deficiências em regiões centrais, embora o sistema ainda permaneça longe de atender aos critérios estabelecidos. A inclusão adicional dos 10,4 km previstos no plano diretor de 2021 resulta em melhorias mais perceptíveis na malha, com redução dos pontos críticos de baixa pressão e das perdas excessivas de carga. No entanto, essa solução ainda não é suficiente para eliminar as falhas em regiões de expansão urbana e áreas com tubulações deterioradas. A partir do cenário 4, que incorpora intervenções adicionais focadas em resolver deficiências de pressão durante a hora de pico, os ganhos de desempenho tornam-se mais evidentes. As áreas com nós subpressurizados são significativamente reduzidas, indicando que as intervenções foram eficazes em manter níveis mínimos de pressão em grande parte da rede.

No cenário 5, a estratégia é voltada para o atendimento das condições de combate a incêndio, com foco nos hidrantes que não atingem as vazões mínimas exigidas. Observa-se uma redução expressiva nos pontos vermelhos e verdes, o que demonstra a eficácia da intervenção para a finalidade de segurança operacional. Ainda assim, pequenos agrupamentos de deficiência permanecem em zonas periféricas. Por fim, o cenário 6 concentra-se na renovação das tubulações com mais de 65 anos, priorizando trechos com maior risco de falha estrutural, como aqueles compostos por ferro fundido e cimento amianto.

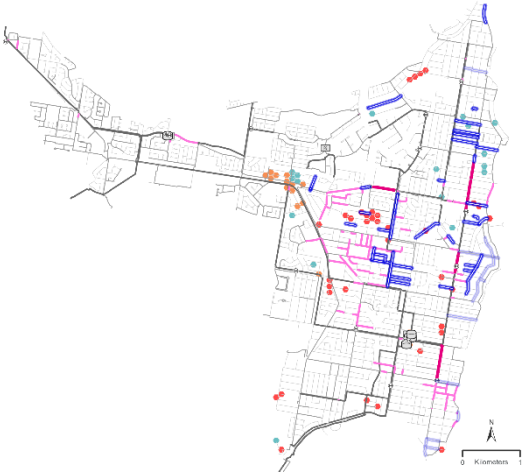
Figura 8 - Evolução das alternativas incorporadas à análise e o impacto progressivo dessas adições no desempenho hidráulico do SDA de Redcliffe



(1) *Cenário de 2051 sem intervenções.*



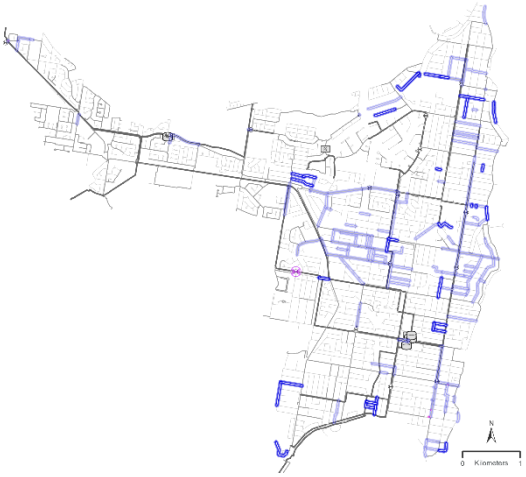
(2) *Cenário de 2051 com intervenção de 4,3 km obrigatórios na fase inicial.*



(3) *Cenário de 2051 com intervenção de 10,4 km previstos no plano diretor.*



(4) *Cenário de 2051 com intervenção para solucionar deficiências de pressão na HP.*



(5) *Cenário de 2051 com intervenção para solucionar deficiências para combate de incêndio.*



(6) *Cenário de 2051 com intervenção para renovar tubulações com ciclo de vida maior que 65 anos.*

Fonte: elaboração própria a partir do modelo hidráulico fornecido.

4. Processo de Otimização no Optimizer

O processo de otimização foi estruturado em duas fases distintas, visando identificar a estratégia mais custo-efetiva para atender à demanda futura da população de Redcliffe e promover a renovação de sua infraestrutura envelhecida. Ao todo, foram avaliadas centenas de milhares de combinações únicas de intervenções, com o objetivo de manter pressões adequadas, perdas de carga dentro dos limites definidos e disponibilidade de vazão para combate a incêndio.

A primeira fase da otimização teve como foco principal encontrar a solução mais custo-efetiva capaz de eliminar todas as deficiências hidráulicas mapeadas, considerando as alternativas previamente definidas de ampliação e renovação da rede. Os resultados obtidos foram comparados com a solução base estabelecida no plano diretor de 2021, bem como com os cenários desenvolvidos na análise de sensibilidade do fator de atrito, proporcionando uma visão abrangente e permitindo validar a consistência do processo e da ferramenta utilizada. Essa fase foi fundamental para embasar tecnicamente a metodologia adotada e orientar os ajustes necessários nas etapas seguintes. Durante essa etapa, foram avaliados aproximadamente 168 mil cenários distintos, com diferentes combinações de intervenções estruturais e operacionais. Adicionalmente, parte das soluções iniciais foi extraída de uma análise multiobjetivo, que envolveu mais de 57 mil simulações hidráulicas, processadas em ambiente de computação em nuvem ao longo de cerca de 10 horas, com uma taxa média de 93 execuções do modelo por minuto.

Na sequência, foi realizada a segunda fase da otimização, incorporando os aprendizados e os resultados da etapa anterior. Nessa nova rodada, a função objetivo foi ajustada para garantir, como critério mínimo, a renovação de todos os 61 km de tubulações previamente identificadas como candidatas à substituição, considerando uma abordagem conservadora de renovação (manutenção dos diâmetros existentes). A partir dessa base mínima de substituições, o algoritmo buscou determinar, de forma otimizada, os trechos que exigiriam aumento de diâmetro para corrigir deficiências hidráulicas persistentes e garantir a adequação do sistema às exigências do cenário de 2051.

5. Pós-Processamento da Otimização

Após a finalização das rodadas de otimização pelo software Optimizer, é possível exportar para o formato EPANET qualquer uma das soluções geradas durante o processo. Normalmente, são selecionadas para exportação as soluções de maior interesse estratégico, como aquelas pertencentes à Fronteira de Pareto na análise multiobjetivo ou as soluções de menor custo resultantes da otimização com objetivo único (*single objective*). As soluções exportadas são então executadas manualmente no modelo hidráulico em EPANET pelo engenheiro responsável pela otimização, com o objetivo de validar os resultados hidráulicos relatados pelo Optimizer. Além da verificação hidráulica, é realizada uma validação independente dos custos de ciclo-de-vida das soluções otimizadas. Para isso, os dados exportados são tratados em ferramentas como Microsoft Excel, onde são aplicadas as mesmas tarifas unitárias fornecidas pela empresa responsável pelo SDA, de forma a conferir se os valores totais estimados de capital coincidem com os resultados apresentados pelo Optimizer. Essa etapa de pós processamento e validação de resultados é fundamental para verificar se as deficiências de pressão, vazão e perda de carga foram efetivamente eliminadas pela solução proposta, com o custo esperado, conforme indicado durante o processo de otimização automatizada.

Após essa validação, a solução é reimportada para o modelo hidráulico original no InfoWater, de modo a assegurar que a proposta também se mantém válida no ambiente nativo da concessionária, considerando suas configurações operacionais, parametrizações específicas e estruturas de dados cadastradas.

Por fim, as soluções selecionadas são tratadas em ambiente GIS, permitindo a visualização espacial das intervenções propostas. Essa análise facilita a conferência da alocação geográfica dos trechos modificados e a verificação de sua aderência às condições do modelo otimizado, garantindo que todas as estruturas representadas no cenário exportado estejam de fato ativas e corretamente configuradas na solução final.

RESULTADOS OBTIDOS

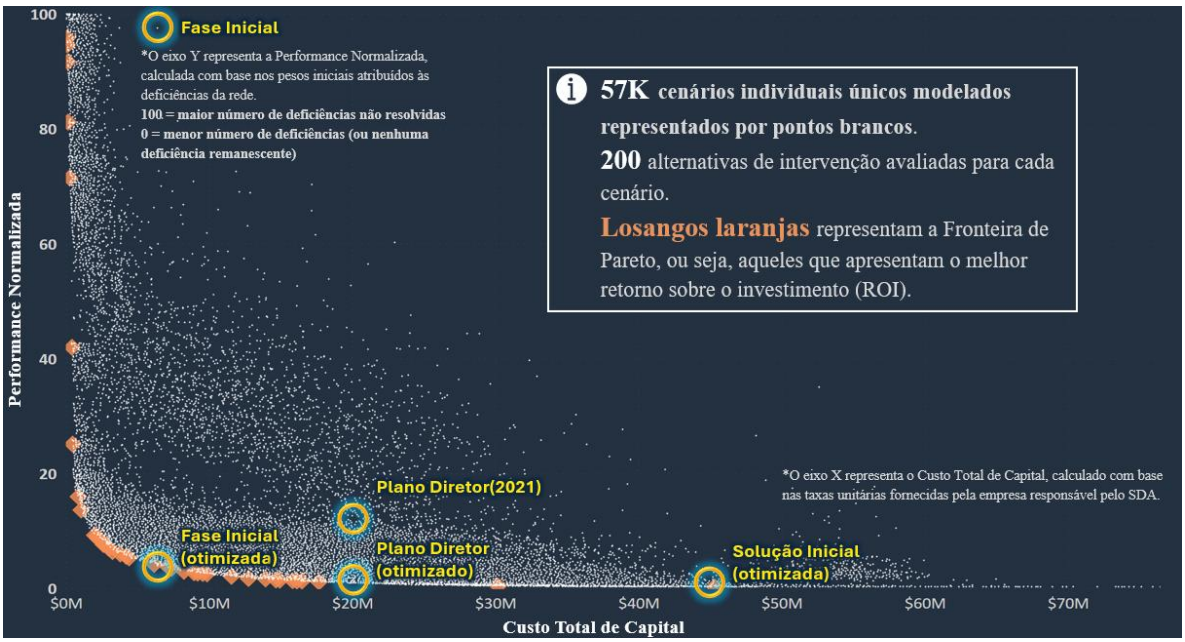
A **Figura 9** apresenta o gráfico da Fronteira de Pareto resultante dessa análise multiobjetivo. Cada ponto na curva representa a configuração de melhorias de rede com a maior performance hidráulica normalizada possível (eixo y) para cada nível de investimento (eixo x). A performance expressa, de forma quantitativa, o grau de atendimento às deficiências identificadas no modelo hidráulico. Por definição:

- uma performance normalizada de 100% indica que nenhuma das deficiências foi resolvida;

- uma performance de 99% significa que aproximadamente 1% das deficiências foi solucionado;
- valores mais próximos de 0% indicam soluções mais eficazes, que eliminaram a maior parte (ou a totalidade) das falhas hidráulicas, mas por um custo mais elevado.

A performance foi calculada com base no número total de nós atendidos que possuíam deficiências de pressão (mínima e máxima em hora de pico, e mínima sob condição de combate a incêndio), além do total de trechos de rede que apresentaram perda de carga acima dos limites estabelecidos. No gráfico, os losangos laranja representam os cenários localizados na Fronteira de Pareto, ou seja, as soluções que oferecem o melhor retorno entre custo e desempenho hidráulico, caracterizando a melhor relação custo-benefício dentro do espaço de busca analisado.

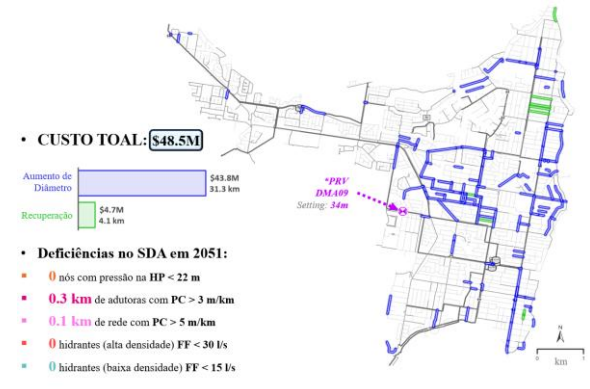
Figura 9 - Fronteira de Pareto com soluções de otimização inicial para intervenção no SDA de Redcliffe



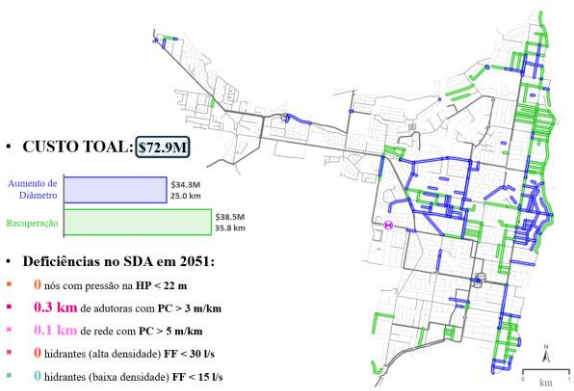
Fonte: elaboração própria.

A **Figura 10** apresenta os dois cenários otimizados selecionados. O cenário (1) mostra a solução mais econômica para eliminar todas as deficiências hidráulicas do sistema em 2051. Já o cenário (2) considera, além da eliminação das deficiências, a renovação das tubulações antigas.

Figura 10 - Soluções iniciais otimizadas



(1) *Solução mais econômica para eliminar as deficiências.*



(2) *Solução mais econômica para eliminar as deficiências e incluindo a renovação das tubulações.*

Fonte: elaboração própria.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A **Figura 9** evidencia os ganhos de eficiência proporcionados pela aplicação de algoritmos genéticos pelo processo de otimização. No primeiro cenário de investimento, correspondente à Fase Inicial de planejamento proposta pela empresa responsável pelo SDA, observa-se que o investimento de $6,6 milhões resultaria na eliminação de apenas cerca de 12% das deficiências do sistema. Com a aplicação da otimização, utilizando exatamente o mesmo valor de investimento, foi possível obter uma solução com desempenho significativamente superior: aproximadamente 79% das deficiências foram resolvidas. Isso representa uma eficiência cerca de 6,5 vezes maior em relação à proposta original, destacando o potencial da metodologia para maximizar os resultados com o mesmo orçamento.

Esse resultado encontra respaldo em uma análise mais ampla realizada com base no plano diretor de 2021. A solução de base, mesmo com um investimento total de $20,1 milhões, reduzia as deficiências em cerca de 85%. Em contrapartida, a versão otimizada, com o mesmo orçamento, foi capaz de atingir uma eficiência 95%, demonstrando maior eficiência hidráulica e custo-benefício. Os resultados da otimização culminaram na definição de um portfólio estratégico de alternativas de soluções, que superaram o plano diretor tanto em eficácia hidráulica quanto em retorno sobre o investimento.

A análise da curva de Pareto mostra ainda que, após o ponto de inflexão, ganhos marginais de desempenho exigem aumentos substanciais no investimento. Para atingir aproximadamente 100% de resolução das deficiências (**Figura *10***), o custo total de capital chega a $48,5 milhões, ou $72,9 milhões caso se inclua a renovação de tubulações antigas. Por outro lado, a mesma análise revela que com apenas $6,6 milhões já é possível resolver cerca de 79% das falhas do sistema, evidenciando um retorno sobre o investimento extremamente elevado nessa faixa de soluções. Esse comportamento da curva demonstra a existência de um ótimo operacional entre $6M e $15M, onde se concentram diversas soluções com alta performance e custo moderado, configurando uma faixa de excelente custo-benefício. Além disso, o gráfico permite uma validação visual da consistência da metodologia, já que as soluções otimizadas ocupam posições na fronteira de Pareto.

CONCLUSÕES

Este estudo evidenciou o potencial transformador da integração entre tecnologias inovadoras de otimização, tecnologias mais frequentemente adotadas no mercado, e a expertise da engenharia no planejamento e gestão de sistemas de abastecimento de água. A utilização de algoritmos genéticos em ambiente de computação em nuvem permitiu transferir o esforço computacional para a tecnologia, liberando o engenheiro para atuar em etapas de maior valor agregado, como a compreensão do problema, a formulação do escopo de soluções e a análise crítica dos resultados. No caso de Redcliffe, o plano diretor anterior serviu como base estratégica, mas foi por meio da abordagem integrada de otimização que se alcançaram soluções significativamente mais eficientes, tanto em desempenho hidráulico quanto em custo total de capital.

Por fim, o conjunto de soluções gerado pelo algoritmo oferece ao gestor uma ferramenta flexível de planejamento, com múltiplas alternativas viáveis para diferentes restrições orçamentárias. A visualização do *trade-off* entre custo e desempenho proporcionou um suporte decisório claro, embasado em critérios técnicos e quantitativos, permitindo uma alocação mais racional dos investimentos e o estabelecimento de estratégias escalonadas de intervenção no sistema.

Para projetos futuros, a abordagem aqui apresentada pode ser replicada em estudos similares, tanto na Austrália quanto em outros contextos mundiais, e principalmente nos SDAs dos municípios brasileiros. Mais do que replicável, o método é adaptável: sempre que for possível quantificar tecnicamente uma deficiência em um modelo hidráulico (e.g. perdas, escassez hídrica, descarbonização etc.) e associá-la a custos de ciclo-de-vida de intervenção, essa situação poderá ser otimizada de forma automatizada. Isso amplia o escopo de aplicação da metodologia, tornando-a uma aliada estratégica para concessionárias que buscam elevar o nível de eficiência, robustez e racionalidade econômica de suas decisões de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAHÃO, N.C., GONSALVES, A.X.M., SHINTO, A.M. *Implantação de procedimento de gestão de qualidade de dados de cadastro técncio na diretoria metropolitana*. Anais do 29º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, Encontro Técnico AESABESP, São Paulo, 2018.

2. ABRAHÃO, N. *Aplicações GIS para empresas de saneamento básico*. 1. ed. São Paulo: ABES, 2020.

3. AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. *Computer modeling of water distribution systems*. 4. ed. Denver, CO: IHS Markit, 2017. (Manual of Water Supply Practices M32).

4. AZEVEDO NETTO, J.M. *Cronologia do abastecimento de água (até 1970)*. Revista DAE, vol 44, n 137, pp 106-111, São Paulo, 1984.

5. BATCHABANI, E., FUAMBA,M. *Optimal tank design in water distribution networks: review of literature and perspectives*. Water Resour Plan Manag 140:136–145, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000256

6. FRANCO, S.C.C.S., TAFARELLO, L., COSTA, C.A., DOMINGUES, B.M., MACEDO, P.H.M., *Integração GeoBIM na SABESP: primeiro cadastro de modelos BIM de Obras Lineares e Localizadas no SIGNOS*. Anais do 34º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, Encontro Técnico AESABESP, São Paulo, 2023.

7. FRANCO, S.C.C.S., CAROLINO, C.R., MACEDO, P.H.M., SILVA, B.M.D., GOMES, B.L., *Cadastro integrado - utilizando soluções Autodesk para Edição das Informações publicadas no ArcGIS*. Anais do 35º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, Encontro Técnico AESABESP, São Paulo, 2024.

8. FRIAS, R.C. *Abastecimento de Água no Rio de Janeiro Joanino*. XIV Simpósio Nacional de Geografia Urbana (SIMPURB), Fortaleza, 2015.

9. GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Mass.

10. GRIGG, N. S. *Water Distribution Systems: Integrated Approaches for Effective Utility Management*. Water, v. 16, n. 4, p. 524, 2024. DOI: 10.3390/w16040524.

11. JESUS, P.H., COSTA, R.B., HENRIQUE, L., NEPOMUCENO, F., ALEXANDRE, F. *Cadastro de equipamentos utilizando o sistema SAP para suporte à gestão de ativos das estações elevatórias de esgoto da região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA MG).* Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, Encontro Técnico AESABESP, São Paulo, 2024.

12. LIMA, S.C., REZENDE, C.R., ZUNIGA, A.A.S.R., LEUENROTH, B.C. *Integração de plataformas SIG com QFIELD para atualização de cadastro técnico de dispositivos operacionais em sistema de abastecimento de água*. Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, Encontro Técnico AESABESP, São Paulo, 2024.

13. MALA-JETMAROVA, H., SULTANOVA, N., SAVIC, D. *Lost in Optimisation of Water Distribution Systems? A Literature Review of System Design.* Water, v. 10, n. 3, p. 307, 2018. DOI: 10.3390/w10030307.

14. MANZI, D. *A hidráulica de todo dia no saneamento*. 1. ed. Curitiba: Appris, 2020.

15. MARINI, G., DI MENNA, F., MAIO, N., FONTANA, N. *Computer-Assisted Optimal Pump-as-Turbine (PAT) Selection for Microhydropower Generation and Pressure Regulation in a Water Distribution Network (WDN).* Water 2023, 15(15), 2807; DOI: 10.3390/w15152807.

16. MAYS, L.W. *Water distribution systems handbook*. McGraw Hill Ed. USA, 2000.

17. METHODS, H.; WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SAVIC, D. A.; GRAYMAN, W.; BECKWITH, S.; KOELLE, E. *Advanced water distribution modeling and management.* Waterbury, CT: Haestad Press, 2020.

18. NICKLOW, J.; REED, P.; SAVIC, D.; DESSALEGNE, T.; HARRELL, L.; CHAN-HILTON, A.; KARAMOUZ, M.; MOGHEIR, Y.; ZECCHIN, A.; ZECHMAN, E. *State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management.* Journal of Water Resources Planning and Management, 136(4), 412–432, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000053.

19. PARVAZE, S., KUMAR, R., KHAN, J. N., AL-ANSARI, N., PARVAZE, S., VISHWAKARMA, D. K., ELVELTAGI, A., KURIQI, A. *Optimization of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms: A Review.* Archives of Computational Methods in Engineering, v. 31, p. 1161–1202, 2024. DOI: 10.1007/s11831-023-09944-7.

20. REDDY, M.J., KUMAR, D.N. *Evolutionary algorithms, swarm intelligence methods and their hybridization for optimal design of water distribution systems: a review*. H2Open Journal, v. 3, n. 1, p. 135–153, 2020. DOI: 10.2166/h2oj.2020.128.

21. SALEHI, M. *Global water shortage and potable water safety: today's concern and tomorrow's crisis.* Environment International, v. 158, p. 106936, 2022. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106936.

22. SANT'ANNA, D.B. *Cidade das águas: usos de rios, córregos, bicas e chafarizes em São Paulo (1822-1901)*. Editora Senac São Paulo, 2019.

23. SIMPSON, A. R.; DANDY, G. C.; MURPHY, L. J. *Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization.* Journal of Water Resources Planning and Management, v. 120, n. 4, p. 423–443, 1994. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(423).

24. TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de água.* 3. ed. São Paulo: ABES, 2006.

25. US EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *EPANET 2.2 Online User's Manual*. 2020. Disponível em: https://www.epa.gov/water-research/epanet . Acessado em Maio de 2025.