

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

OTIMIZAÇÃO DE SETORES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM ALGORITMOS GENÉTICOS: ESTUDO DE CASO EM CHRISTCHURCH, NOVA ZELÂNDIA

Leandro Rinaldo Merli¹ ; Andre George Camaliente²; Lucas Djehdian³;

Julia Matton⁴ & Joel Wilson⁵

Abstract: This paper presents the application of genetic algorithms for the optimization of water distribution systems through the integration of hydraulic modeling and life-cycle cost analyses. The study was applied to the water supply system of Christchurch, New Zealand, considering four different sectorization scenarios in a projected demand scenario for the year 2068. The optimization was conducted based on competing hydraulic and financial criteria, simulating hundreds of thousands of possible solutions to identify the most cost-effective combinations of structural interventions. The strategies developed by the optimization showed similar performance to the manually developed solutions, but for only 43% to 48% of the life-cycle cost. This work also identified recurrent interventions that were cost-effective and hydraulically favorable regardless of the sectorization configuration and other assumptions adopted. The proposed methodology proved to be robust, replicable, and applicable to different urban contexts, including throughout Brazil's concessions.

Resumo: Este artigo apresenta a aplicação de algoritmos genéticos na otimização de sistemas de distribuição de água, por meio da integração com modelos hidráulicos e análise de custo de ciclo de vida. O estudo foi aplicado ao sistema de abastecimento da cidade de Christchurch, na Nova Zelândia, considerando quatro cenários distintos de setorização e projeções de demanda para o horizonte de 2068. A otimização foi conduzida com base em critérios hidráulicos e econômicos, simulando centenas de milhares de soluções possíveis para identificar as combinações mais custo-eficientes de intervenções estruturais. As estratégias adotadas pela otimização demonstraram performance hidráulica equivalente à de soluções produzidas manualmente, mas por 43% a 48% do custo de ciclo-de-vida. Esse trabalho também identificou intervenções que se mostraram vantajosas independentemente da configuração setorial e outras premissas adotadas. A metodologia demonstrou ser robusta, replicável e aplicável a diferentes contextos urbanos, incluindo em concessões do Brasil.

Palavras-Chave – Otimização de sistemas de abastecimento de água, Setorização de redes hidráulicas, Algoritmos genéticos

1) WCS Engineering, Engenheiro Civil e Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Escola Politécnica da USP. Endereço: São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: leandro.merli@wcsengineering.com / leandro.merli@alumni.usp.br.

2) WCS Engineering, Engenheiro Civil pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e MBA em Data Science e Big Data na FIAP. Endereço: São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: andre.camaliente@wcsengineering.com.

3) WCS Engineering, Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia Civil pela University of Illinois Urbana-Champaign. Endereço: Jacksonville, Florida, EUA. E-mail: lucas.djehdian@wcsengineering.com.

4) WCS Engineering, Engenheira Civil pela University of Colorado Boulder e Mestra em Engenharia Civil pela University of Colorado. Endereço: Portland, Oregon, EUA. E-mail: julia.matton@wcsengineering.com.

5) WCS Engineering, Engenheiro Civil pela The University of Queensland. Endereço: Kingscliff, New South Wales, Austrália. E-mail: joel.wilson@wcsengineering.com.

INTRODUÇÃO

Aplicação de Algoritmo Genético para Otimização de Sistemas de Distribuição de Água por meio de Modelos Hidráulicos

A otimização de um sistema de distribuição de água (SDA) tem como objetivo minimizar o uso de recursos e os custos envolvidos, ao mesmo tempo em que maximiza a eficiência operacional e reduz falhas hidráulicas (Parvaze et al., 2023). Projetar SDAs que atendam simultaneamente aos requisitos hidráulicos, normativos e de viabilidade econômica é uma tarefa desafiadora, pois envolve a resolução simultânea de diversas equações hidráulicas não lineares, além da definição otimizada da dimensão, localização e estado operacional de componentes como tubulações, bombas, reservatórios e válvulas (Batchabani & Fuamba, 2014). Essa complexidade aumenta ainda mais quando são considerados múltiplos objetivos de forma simultânea (Mala-Jetmarova et al., 2018).

Em estudos de otimização de SDAs, além do aspecto econômico e do atendimento às normas, têm sido incorporados outros objetivos (Mala-Jetmarova et al., 2018), como a minimização de violações de pressões máximas ou mínimas em diferentes cenários (Tanyimboh & Seyoum, 2020), a redução da intermitência de abastecimento (Solgi et al., 2020), a diminuição de perdas ao longo do sistema (Lijuan et al., 2012), a definição de estratégias de setorização (Di Nardo et al., 2013), a melhoria da qualidade da água (Chahkandi et al., 2025), a mitigação de emissões de gases de efeito estufa (Blinco et al., 2014), ou ainda, a incorporação de incertezas futuras, como variações de demanda, deterioração de estruturas do sistema, crescimento populacional e diferentes fases construtivas ao longo do horizonte de projeto (Mala-Jetmarova et al., 2018).

Tradicionalmente, o projeto e avaliação de SDAs é realizado com base na experiência empírica de engenheiros, por meio da comparação entre um número limitado de alternativas, avaliando-se aspectos como desempenho hidráulico, custo de implantação e operação, e fatores ambientais e sociais. No entanto, tem crescido significativamente o número de estudos voltados à aplicação de técnicas de otimização computacional, que ampliam o espaço de busca de alternativas de forma sistemática (Nicklow et al., 2010; Mala-Jetmarova et al., 2018; Parvaze et al., 2023). A otimização, nesse contexto, constitui uma ferramenta que busca, de forma automatizada, um conjunto de variáveis de decisão que satisfaça restrições operacionais e maximize um ou mais objetivos definidos previamente. Com o avanço da capacidade computacional, tornou-se viável aplicar essas técnicas a problemas de maior escala e complexidade, promovendo soluções mais robustas para desafios diversos em sistemas hídricos (Reddy & Kumar, 2020).

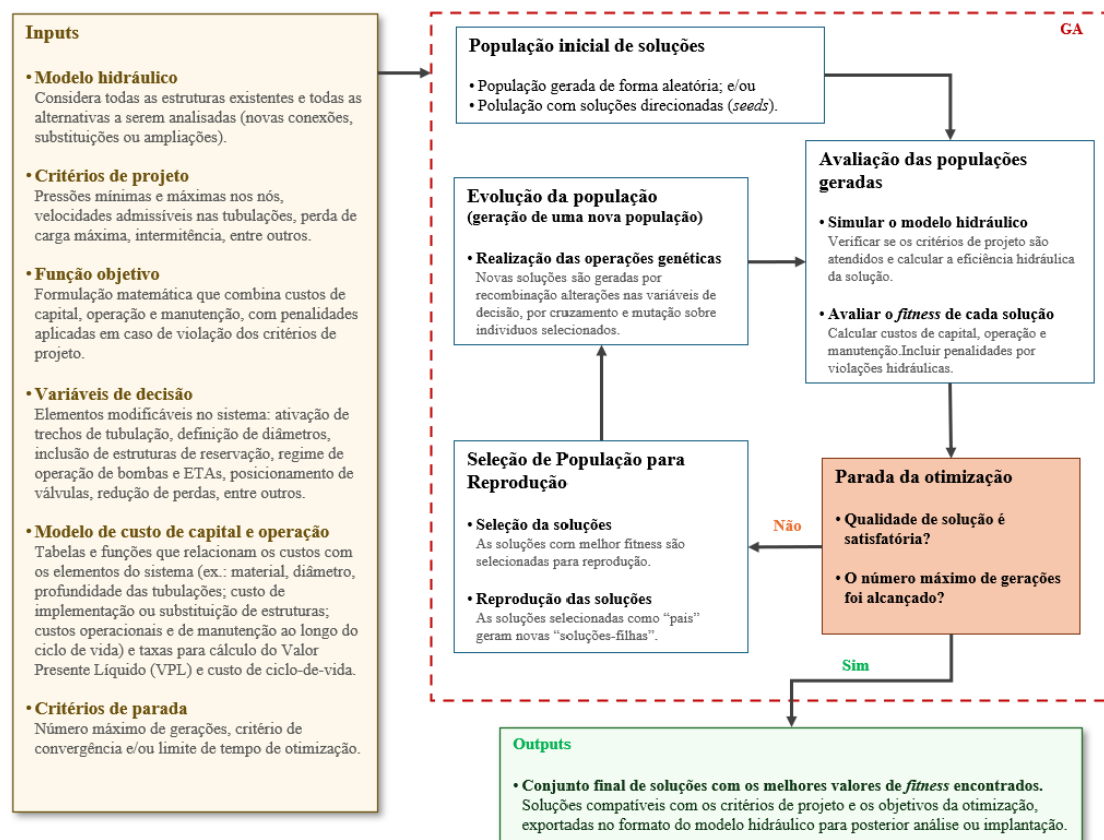
Entre as abordagens disponíveis, destacam-se os algoritmos evolutivos (*Evolutionary Algorithms* – EAs), que ganharam notoriedade nas últimas décadas como métodos promissores para a resolução de problemas de alta complexidade. Esses algoritmos têm sido amplamente utilizados no planejamento e operação de SDAs, na calibração de modelos hidráulicos e na formulação de estratégias de gestão de recursos hídricos (Reddy & Kumar, 2020). Dentre os métodos evolutivos, os algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms* – GAs) se destacam pela ampla aplicação em SDAs (Mala-Jetmarova et al., 2018; Parvaze et al., 2023) e por sua inspiração nos princípios da evolução biológica (Goldberg, 1989). Os algoritmos genéticos são particularmente eficazes para resolver problemas de otimização não linear, como os encontrados no dimensionamento e operação de sistemas de distribuição de água (Batchabani & Fuamba, 2014). Esses algoritmos utilizam conceitos de genética populacional para simular um processo evolutivo de busca por soluções. Operadores como cruzamento, mutação e seleção natural são aplicados iterativamente sobre uma população inicial de soluções candidatas. Essa população pode ser gerada de forma totalmente aleatória, distribuindo-se uniformemente pelo espaço de busca (Parvaze et al., 2023), ou, alternativamente, pode ser parcialmente composta por soluções promissoras previamente conhecidas (*seeds*), com o objetivo de

direcionar a busca inicial. Cada indivíduo representa uma solução potencial, codificada por “genes” que definem os parâmetros do sistema.

Em aplicações voltadas à otimização de modelos hidráulicos de SDAs, esses “genes” representam configurações específicas de parâmetros como: ativação ou desligamento de trechos de tubulação, variação de diâmetro das condutas, posicionamento de válvulas, volume útil de reservatórios, curvas características de bombas, estimativas de perdas, entre outros (Parvaze et al., 2023). Cada indivíduo, portanto, define uma solução completa para o sistema, a qual é convertida em dados de entrada para motores de simulação hidráulica, como o EPANET desenvolvido pela *US Environmental Protection Agency*. A solução é então testada em um cenário definido (por exemplo, crescimento populacional, estresse hídrico, elevação de nível de poluição, mudanças climáticas), e são quantificadas as deficiências hidráulicas do sistema (Shiu et al., 2023, Chahkandi et al., 2025, Parween & Sinha, 2025).

O algoritmo atua como um mecanismo iterativo de geração e aprimoramento de alternativas estruturais e operacionais, buscando atender aos critérios de performance do sistema enquanto otimiza objetivos definidos por um modelo de custo, incluindo capital, operação, manutenção e depreciação de ativos. A partir da população inicial, e posteriormente, a partir das soluções mais eficientes encontradas a cada geração, o algoritmo aprende padrões de custo-benefício, refinando progressivamente a qualidade das soluções encontradas (Savic & Walters, 1997, Bakri et al., 2014, Mala-Jetmarova et al., 2018, Parvaze et al., 2023, Muranaka et al., 2023). O processo de otimização de modelos hidráulicos com algoritmos genéticos, ilustrado na Figura 1, pode envolver ciclos repetitivos de avaliação com centenas de milhares de simulações.

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



Estudo de Caso: Otimização dos Setores do SDA da Cidade de Christchurch, Nova Zelândia

A cidade de Christchurch, localizada na Ilha Sul da Nova Zelândia, é atendida por um sistema de distribuição de água caracterizado por uma topografia variada, alta dependência de poços subterrâneos e uma malha de abastecimento amplamente setorizada. Frente ao crescimento urbano projetado para as próximas décadas, com horizonte de planejamento até o ano de 2068, foi desenvolvido um trabalho de otimização por meio de aplicação de algoritmo genético do sistema de distribuição de água, com o objetivo de determinar um plano de investimento robusto e resiliente, considerando uma gama de alternativas de melhorias estruturais e operacionais compreensiva em diferentes configurações dos setores de abastecimento.

O estudo foi motivado pela identificação de deficiências hidráulicas relevantes no sistema atual, mas especialmente quando projetando condições futuras de demanda previstas para 2068. Simulações indicaram a ocorrência de pressões abaixo do mínimo recomendado em alguns setores, pressões excessivas em outros, além de trechos com perdas de carga específicas superiores aos limites estabelecidos pelas normas técnicas. Tais limitações comprometem o desempenho do sistema e sua resiliência operacional, especialmente diante de cenários de crescimento urbano, aumento da variabilidade climática e exigências de eficiência energética. Neste contexto, o objetivo principal do estudo foi realizar uma otimização por meio de algoritmos genéticos em nível estratégico para o SDA da cidade de Christchurch, considerando diferentes cenários de setorização do abastecimento.

O modelo hidráulico do SDA de Christchurch foi desenvolvido na plataforma InfoWorks WS Pro, da Autodesk. O modelo existente foi configurado com a infraestrutura atual e com a setorização em operação na cidade. A Figura 2 e a Figura 3 apresentam os mapas de performance hidráulica do sistema nessa configuração, evidenciando as principais limitações associadas às pressões mínimas e máximas nas diferentes regiões da malha de distribuição, durante a simulação de tempo estendido para as condições projetadas de demanda para o ano de 2068.

Figura 2 - Mapa de performance do SDA de Christchurch para pressões mínimas em 2068

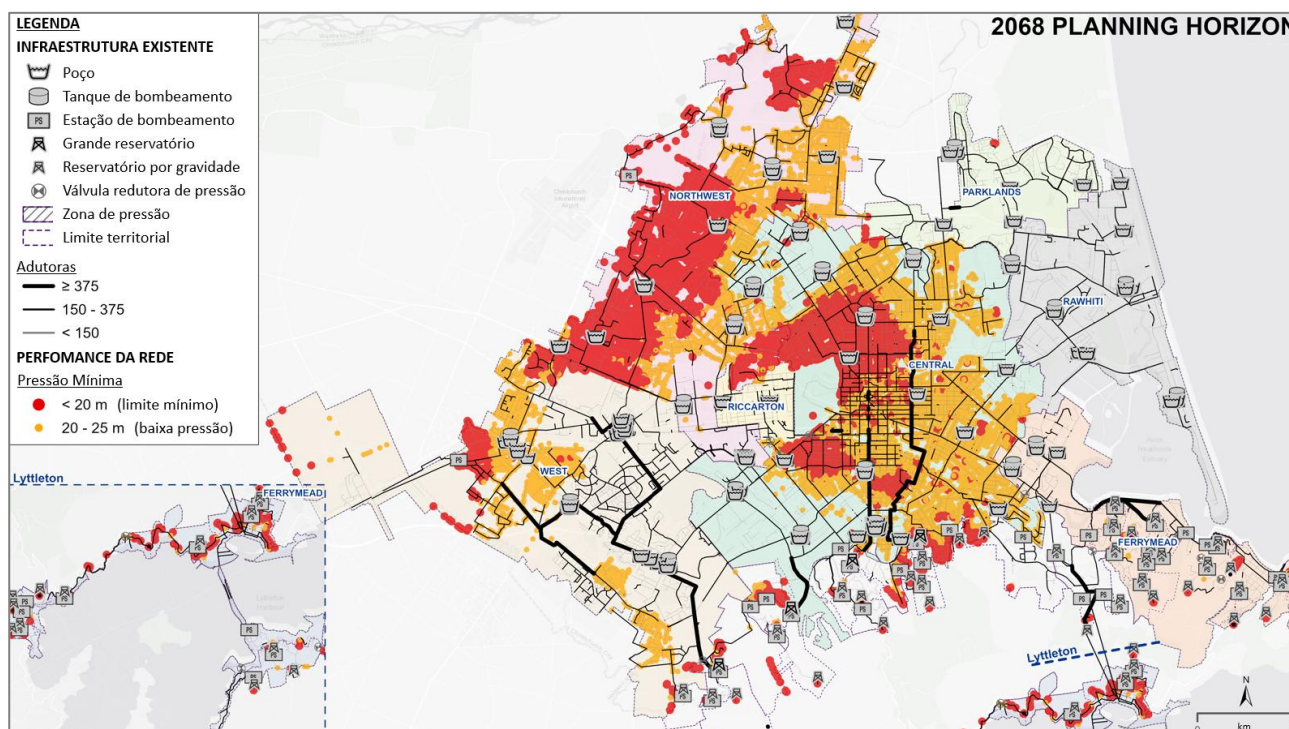
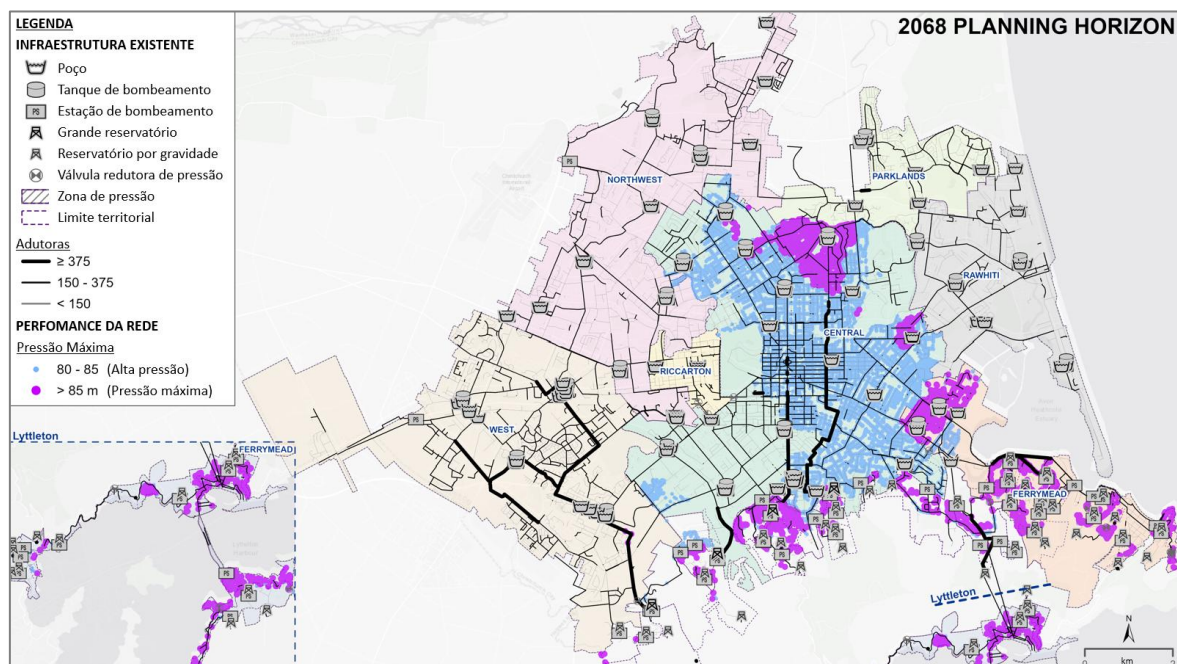


Figura 3 - Mapa de performance do SDA de Christchurch para pressões mínimas em 2068



METODOLOGIA UTILIZADA

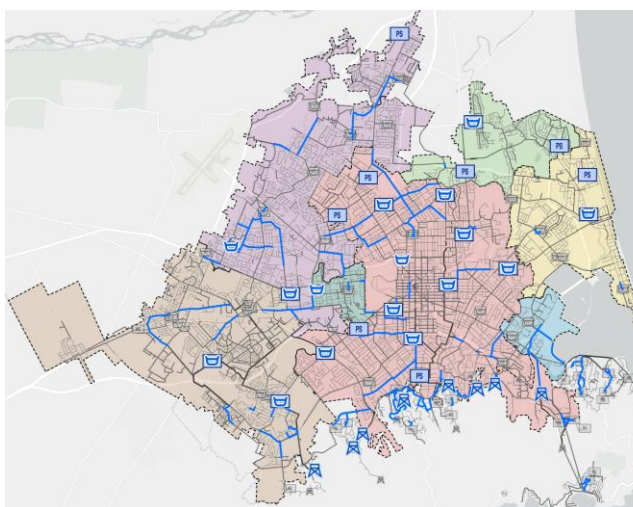
1. Configuração do modelo hidráulico

O modelo do sistema foi desenvolvido na plataforma InfoWorks WS Pro, da Autodesk, com base na infraestrutura existente e na setorização atualmente em operação. O modelo foi calibrado previamente e adaptado para simulações com condições projetadas de demanda para o ano de 2068, incluindo variações diurnas de consumo. A simulação foi realizada em regime de tempo estendido, permitindo a avaliação de pressões mínimas e máximas, níveis de reservatórios e perdas de carga específicas ao longo do tempo. Para a utilização do modelo hidráulico no ambiente de otimização, o modelo originalmente desenvolvido no InfoWorks foi convertido para o formato EPANET por meio do software PCSWMM. Foi conduzido um processo de validação entre os modelos InfoWorks e PCSWMM, mantendo a equivalência dos resultados hidráulicos entre as duas plataformas.

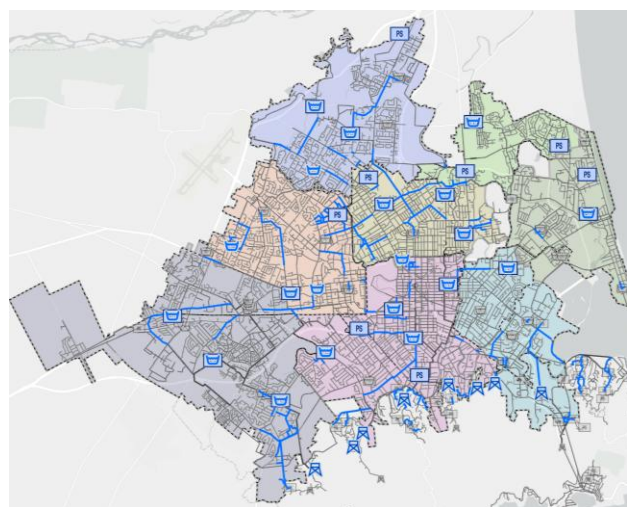
No modelo convertido para EPANET, foram introduzidas uma gama de alternativas de intervenção capazes de solucionar as falhas identificadas no sistema frente às demandas projetadas para o horizonte de 2068, em 4 cenários distintos de setorização (Figura 4). Cada combinação de alternativas na população representa uma solução viável para o sistema, incluindo decisões sobre: (i) inserção ou substituição de trechos de adutoras e redes; (ii) instalação de novos poços e estações de bombeamento; (iii) ampliação ou implantação de reservatórios; e (iv) reconfiguração da operação de válvulas e bombeamentos.

Para cada um desses quatro cenários distintos de setorização, foi inicialmente definida uma solução de referência, denominada solução *baseline*. Essa solução foi elaborada manualmente por engenheiros especialistas, com base em critérios técnicos convencionais e conhecimento prático, buscando atender a os requisitos hidráulicos definidos para o período de projeto. O *baseline* serviu como ponto de partida para o processo de otimização, possibilitando uma comparação direta entre os resultados gerados pelo algoritmo genético e as soluções propostas por métodos tradicionais.

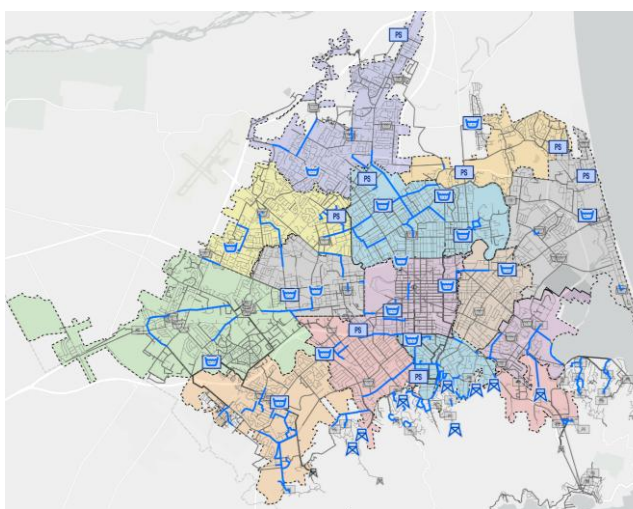
Figura 4 - Alternativas de soluções *baseline* por tipo de cenário de setorização



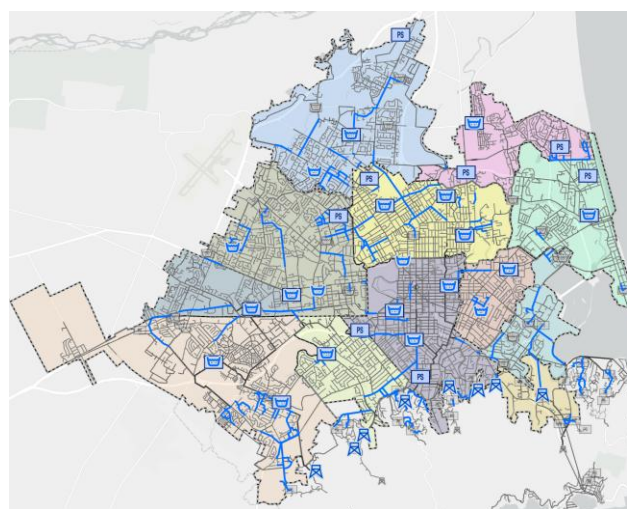
Cenário 1: setorização atual



Cenário 2: proposta de setorização do plano diretor











Cenário 3: proposta 1 de configuração de setores autossuficientes






Cenário 4: proposta 2 de configuração de setores autossuficientes






LEGENDA

INFRAESTRUTURA EXISTENTE

-  Poço
-  Tanque de bombeamento
-  Estação de bombeamento
-  Grande reservatório
-  Reservatório por gravidade
-  Válvula redutora de pressão
-  Zona de pressão
-  Limite territorial

- Adutoras**
-  ≥ 375
 -  150 - 375
 -  < 150

AMPLIAÇÕES DO SISTEMA

-  Novo poço
-  Novo reservatório
-  Aumento de capacidade de bombeamento
-  Poço mais aumento de capacidade de bombeamento
-  Novas tubulações

3. Formulação do problema de otimização

A otimização foi conduzida por meio do software *Optimizer™ WS Pro*, que combina algoritmos genéticos e computação em nuvem para explorar automaticamente milhares de combinações de soluções possíveis. Para cada cenário de setorização, foi criado um arquivo de otimização no qual o modelo EPANET, já configurado com as alternativas de intervenção, foi importado para o *Optimizer*. Nesse ambiente, foi aplicada uma função objetivo voltada à maximização de performance hidráulica e minimização do custo total ao longo do ciclo de vida dos ativos. Essa função matemática considera

os custos de capital, operação, manutenção e reposição, além de penalidades aplicadas automaticamente caso a solução avaliada não atenda aos critérios hidráulicos mínimos estabelecidos (pressões, velocidades e níveis mínimos de reservação). Para isso, foi também incorporado ao ambiente do *Optimizer* um modelo de custos de ciclo-de-vida, considerando com base no valor presente líquido, composto por: (i) valores unitários de tubulações por diâmetro; (ii) custo de reservatórios em função do volume útil; (iii) custo de estações de bombeamento com base na vazão de pico (incluindo custos energéticos); (iv) custo unitário de implantação de novos poços; e (v) variáveis para cálculos de valor presente líquido.

Faz parte ainda da formulação no *Optimizer* a configuração dos parâmetros de projeto a serem considerados para validação ou não do modelo hidráulico, com verificação automática de falhas hidráulicas com base nos critérios estabelecidos, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Critério de projeto considerado na otimização do SDA

Nível de Serviço	Condição	Critério
Pressão de operação na rede	Mínima	Pressão estática mínima de 20 m.
	Máxima	Pressão estática máxima de 80 m.
Pressão de operação na adutora	Mínima	Pressão mínima de fornecimento de 350 kPa – nos pontos de entrega.
	Máxima	Pressão máxima de fornecimento de 550 kPa – nos pontos de entrega.
Velocidade na rede	Máxima	1,5 m/s para cenário normal e 3,0 m/s para cenário emergencial.
Perda de carga nas tubulações	Máxima	Perda de carga máxima de 5 m/km para adutoras de grande porte (\geq DN375) e de 10 m/km para tubulações com DN inferior a 375.
Reservação	Demanda de pico	Manter nível dos reservatórios acima de 50% da capacidade útil.

4. Otimização, avaliação e comparação das soluções

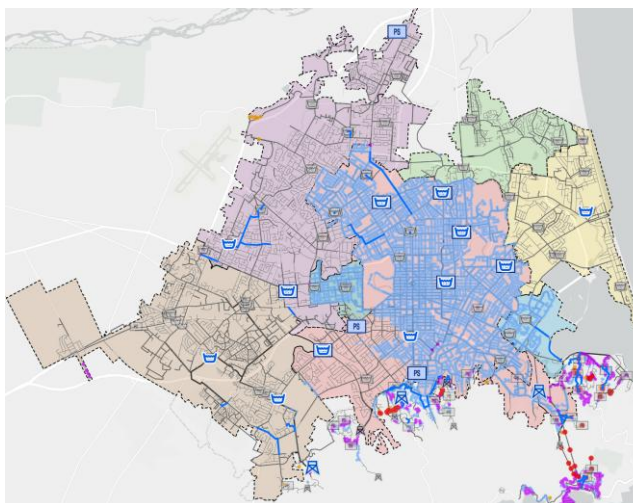
Para cada cenário de setorização definido, foi realizada a otimização do sistema de distribuição de água, com o objetivo de identificar combinação de intervenções estruturais e operacionais com a maior custo-efetividade. A otimização foi conduzida por meio do algoritmo genético implementado no software *Optimizer*, executado em ambiente de computação em nuvem com múltiplos núcleos de processamento paralelos. Para cada cenário, foram geradas aproximadamente 100 mil soluções, explorando de forma ampla o espaço de busca definido pelo modelo de otimização. As soluções otimizadas foram comparadas com as soluções de referência criadas, previamente elaboradas de forma manual com base em critérios técnicos convencionais. A avaliação envolveu tanto aspectos de performance hidráulica, apresentados na Tabela 1, quanto os custos totais estimados ao longo do ciclo de vida dos ativos selecionados.

RESULTADOS OBTIDOS

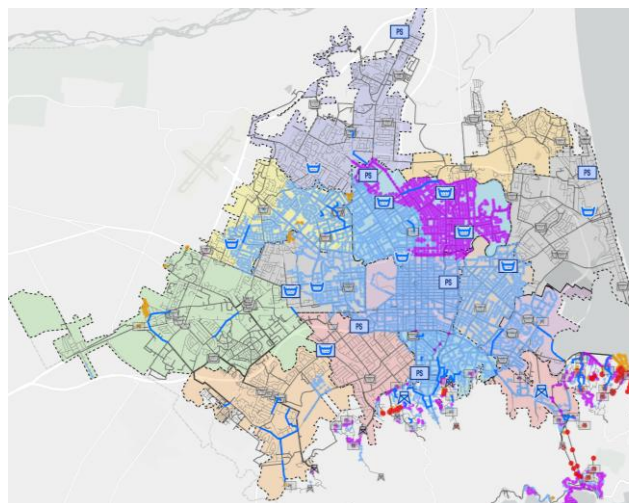
A partir da aplicação da metodologia de otimização descrita, foram geradas soluções específicas para cada um dos quatro cenários de setorização analisados. A Figura 5 apresenta a espacialização das alternativas otimizadas identificadas para cada cenário, incluindo as intervenções propostas no sistema (novos poços, reservatórios, reforços de bombeamento e novas tubulações), bem como a performance hidráulica resultante, com destaque para as regiões com pressões mínimas e máximas fora dos limites recomendados.

Como critério de avaliação global, os custos totais de ciclo de vida das soluções otimizadas foram comparados com os respectivos cenários de referência (*baseline*). A Tabela 4-4 resume os resultados dessa comparação, evidenciando reduções expressivas de custo em todos os cenários analisados, com destaque para os Cenários 1 e 2, que apresentaram os menores valores totais após a otimização.

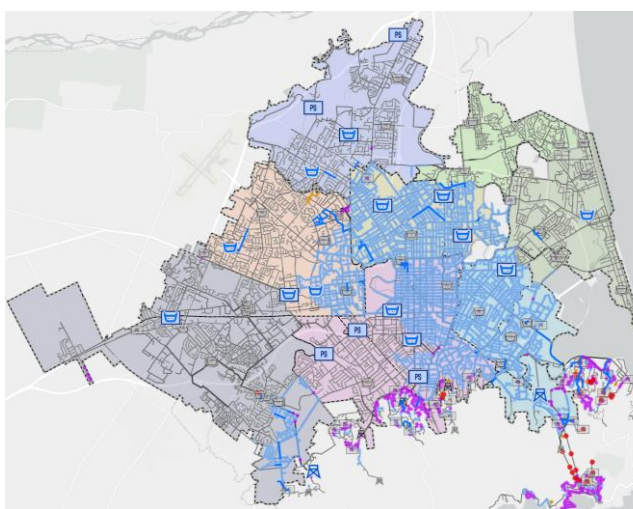
Figura 5 - Soluções selecionadas (e performance hidráulica) para cada um dos quatro cenários de setorização



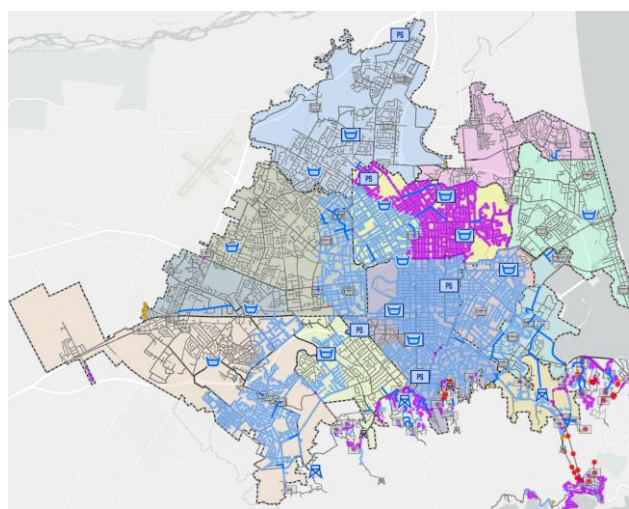
Cenário 1: setorização atual



Cenário 2: proposta de setorização do plano diretor











Cenário 3: proposta 1 de configuração de setores auto-suficientes






Cenário 4: proposta 2 de configuração de setores auto-suficientes

LEGENDA






INFRAESTRUTURA EXISTENTE

-  Poço
-  Tanque de bombeamento
-  Estação de bombeamento
-  Grande reservatório
-  Reservatório por gravidade
-  Válvula redutora de pressão
-  Zona de pressão
-  Limite territorial

Adutoras



-  ≥ 375
-  150 - 375
-  < 150

AMPLIAÇÕES DO SISTEMA

-  Novo poço
-  Novo reservatório
-  Aumento de capacidade de bombeamento
-  Poço mais aumento de capacidade de bombeamento
-  Novas tubulações

PERFORMANCE DA REDE

Pressão Mínima

-  < 20 m (limite mínimo)
-  20 - 25 m (baixa pressão)

Pressão Máxima



-  80 - 85 (Alta pressão)
-  > 85 m (Pressão máxima)

Tabela 2 - Comparação de custo total de ciclo de vida entre solução baseline e otimizada para os cenários de setorização

Solução	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Baseline	(\$ M) 1.083	(\$ M) 964	(\$ M) 1.194	(\$ M) 1.165
Otimizada	(\$ M) 463	(\$ M) 468	(\$ M) 533	(\$ M) 562

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A comparação entre as soluções otimizadas e os cenários de referência (baseline) evidenciou ganhos significativos tanto em performance hidráulica quanto em economia de recursos. Em todos os quatro cenários de setorização analisados, a otimização foi capaz de reduzir o custo total de ciclo de vida do sistema, com economia variando de 43% a 49% em relação ao custo inicial estimado no baseline (Tabela 2). O Cenário 2, correspondente à proposta de setorização do plano diretor, apresentou o menor custo total após a otimização (\$468M), seguido de perto pelo Cenário 1, referente à setorização atual (\$463M). Já os Cenários 3 e 4, que simulam estruturas autossuficientes de abastecimento, demandaram maiores investimentos em reservação e bombeamento, resultando em custos totais mais elevados. Além da análise econômica, a avaliação espacial das soluções revelou padrões importantes. Em todos os cenários otimizados, determinadas intervenções foram selecionadas de forma recorrente, como a instalação de novos poços em regiões de baixa pressão e a ampliação da capacidade de bombeamento em zonas periféricas. Esses padrões sugerem a existência de investimentos prioritários que podem ser considerados robustos, ou seja, vantajosos independentemente da configuração setorial adotada.

CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou o potencial da aplicação de algoritmos genéticos integrados à modelagem hidráulica como ferramenta para apoiar o planejamento estratégico de sistemas de distribuição de água. A partir da simulação de diferentes cenários de setorização para a cidade de Christchurch, Nova Zelândia, foi possível identificar soluções otimizadas que reduzem significativamente os custos totais do sistema e melhoram sua performance hidráulica frente às condições futuras projetadas para 2068. A metodologia aplicada permitiu não apenas avaliar comparativamente diferentes estratégias de setorização, mas também identificar intervenções estruturais recorrentes e de alto impacto, oferecendo subsídios técnicos relevantes para a priorização de investimentos em sistemas complexos. Os resultados indicam que, embora os cenários baseados na estrutura atual e no plano diretor apresentem os melhores desempenhos econômicos, as análises futuras devem considerar também aspectos operacionais, ambientais e de segurança hídrica, especialmente nos cenários autossuficientes.

Dessa forma, a integração entre ferramentas de simulação hidráulica, algoritmos evolutivos e análise econômica de ciclo de vida configura-se como uma abordagem replicável para apoiar a tomada de decisão em projetos de reabilitação e expansão de sistemas de abastecimento de água, tanto em diferentes contextos urbanos ao redor do mundo quanto, especialmente, em aplicações no cenário brasileiro.

REFERÊNCIAS

- BAKRI, B., ARAI, Y., INAKAZU, T., KOIZUMI, A., PALLU, S., YODA, H. *A multi-step genetic algorithm model for ensuring cost-effectiveness and adequate water pressure in a trunk/limb mains pipe system*. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 2025. DOI: 10.2166/aqua.2014.191.
- 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
- BLINCO, L.J., SIMPSON, A.R., LAMBERT, M.F., AURICHT, C.A., HURR, N.E., TIGGEMANN, S.M., MARCHI, A. *Genetic Algorithm Optimization of Operational Costs and Greenhouse Gas Emissions for Water Distribution Systems*. 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.246.

- CHAHKANDI, B., NAMIN, M.M., GHEIBI, M., DHOSKA, K., MOEZZI, R., FATHOLLAHI-FARD, A.M. *Intelligent chlorination in water distribution networks: Integrating genetic algorithm and EPANET fusion*. Kuwait Journal of Science 52, 2025. DOI: 10.1016/j.kjs.2025.100425.
- DI NARDO, A., DI NATALE, M., SANTONASTASO, G.F., TZATCHKOV, ALCOCER-YAMANAKA, V.H. *Water network sectorization based on a genetic algorithm and minimum dissipated power paths*. Water Supply, 2013. DOI: 10.2166/ws.2013.059.
- GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Mass.
- LIJUAN, W., HONGWAEI, Z., HUI, J. *A Leak Detection Method Based on EPANET and Genetic Algorithm in Water Distribution Systems*. Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-03718-4_57.
- 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.
- MURANAKA, R.S., PADOVANI, L.G., SOARES, A.K. Dimensionamento de Redes de Distribuição de Água Utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivos. Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, SE, 2023.
- 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.
- 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.
- PARWEEN, S., SINHA, R.C. *An Integrated Model for Water Resource Allocation, Distribution and Management: A Genetic Algorithm-Based Optimisation Model*. Water Resources Management, 2025. DOI: 10.1007/s11269-025-04217-3.
- 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.
- SAVIC, D.A., WALTERS, G.A. *Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:2(67).
- SHIU, C., CHUNG, C., CHIANG, T. *Enhancing the EPANET Hydraulic Model through Genetic Algorithm Optimization of Pipe Roughness Coefficients*. Water Resources Management, 2024. DOI: 10.1007/s11269-023-03672-0.
- SOLGI, M., BOZORG-HADDAD, O., LOÁICIGA, H.A. *Multi-objective optimization model for operation of intermittent water distribution networks*. IWA Publishing Water Supply, 2020. DOI: 10.2166/ws.2020.159.
- TANYIMBOH, T.T., SEYOUM, A.G. *Design optimization of water distribution networks: real-world case study with penalty-free multi-objective genetic algorithm using pressure-driven simulation*. Water SA, 2020. DOI: 10.17159/wsa/2020.v46.i4.8657.