OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO E PRIORIZAÇÃO DE CAPITAL POR MEIO DE ALGORITMO GENÉTICO APLICADO EM MODELO DE HIDRÁULICO: ESTUDO DE CASO DA CIDADE DE DEARBORN (EUA)

RESUMO

Este estudo apresenta a aplicação de algoritmos genéticos na otimização estrutural de um sistema de esgotamento sanitário urbano, com foco na mitigação de extravasamentos e priorização de investimentos. Utilizando o software Optimizer™, foram avaliadas diversas combinações de intervenções estruturais no sistema da cidade de Dearborn, nos Estados Unidos, incluindo separação pluvial, implantação de redes por gravidade,tanques de detenção e estações elevatórias com tratamento. O modelo hidráulico, baseado em simulações no PCSWMM, foi utilizado para analisar o desempenho do sistema frente a diferentes cenários críticos, com destaque para chuva de projeto com tempo de retorno de 25 anos acrescido de 30% de volume, incorporando efeitos das mudanças climáticas. A otimização foi formulada com base em funções objetivo que integraram custos de ciclo de vida e penalidades hidráulicas, permitindo a construção de uma fronteira de Pareto entre custo e desempenho. Os resultados demonstraram que a solução com foco em separação de águas pluviais apresentou o menor custo total de ciclo de vida e maior efetividade hidráulica. A metodologia é replicável em contextos brasileiros, podendo ser aplicada tanto em projetos de reabilitação quanto na concepção de novos sistemas de esgoto.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização de SES, Priorização de Capital, Algoritmo Genético

INTRODUÇÃO

Otimização de Sistemas de Esgotamento Sanitário por meio de Algoritmo Genético

Sistemas de esgotamento sanitário (SES) urbanos precisam ser projetados para atender a variações significativas de carga hidráulica ao longo do tempo, resultantes de fatores como crescimento populacional, mudanças no uso do solo e eventos extremos de precipitação. Em especial, os sistemas combinados, que transportam simultaneamente esgoto doméstico e águas pluviais, são ainda mais desafiadores de operar e manter. Esses sistemas devem garantir a capacidade de condução adequada, minimizar extravasamentos e manter o desempenho com o menor custo possível, o que representa uma tarefa complexa, principalmente quando sujeitos a carregamentos dinâmicos como chuvas intensas ou liberações rápidas de águas de reservatórios urbanos (Reddy & Kumar, 2020).

A ocorrência de extravasamentos em sistemas de esgoto, tanto do tipo sanitário (no inglês *Sanitary Sewer Overflow* - SSO) quanto combinado (no inglês *Combined Sewer Overflow* - CSO), constitui uma das principais preocupações ambientais e sanitárias associadas aos sistemas urbanos. Esses eventos são caracterizados pela liberação direta e não intencional de esgoto não tratado no meio ambiente, resultando em riscos significativos à saúde pública, degradação da qualidade dos corpos hídricos e prejuízos econômicos diretos às cidades. As principais causas dos SSOs incluem a infiltração de águas pluviais nos coletores sanitários, falhas operacionais em estações elevatórias, obstruções e subdimensionamentos da rede, ou mesmo o colapso estrutural de componentes do sistema (Owolabi, 2021; Assaf *et al*., 2024).

Frente à intensificação desses desafios, tem crescido o interesse por estratégias avançadas de mitigação de extravasamentos, como o uso de estruturas verdes, planejamento integrado e técnicas de controle inteligente (*smart control*). Dentre essas abordagens, os métodos de controle inteligente têm se destacado por sua efetividade técnico-econômica, especialmente quando integrados a modelos hidráulicos e algoritmos de otimização. No entanto, o uso de métodos preditivos tradicionais baseados em simulações numéricas detalhadas pode resultar em altos custos computacionais, tornando sua aplicação pouco eficiente em redes reais de alta complexidade (Zeda *et al*., 2024).

Nesse cenário, os algoritmos evolutivos (*Evolutionary Algorithms* – EAs) surgem como uma alternativa promissora, permitindo a formulação de estratégias de planejamento e operação mais eficazes e automatizadas para redes de esgoto. Esses algoritmos têm sido amplamente utilizados na engenharia de recursos hídricos, com

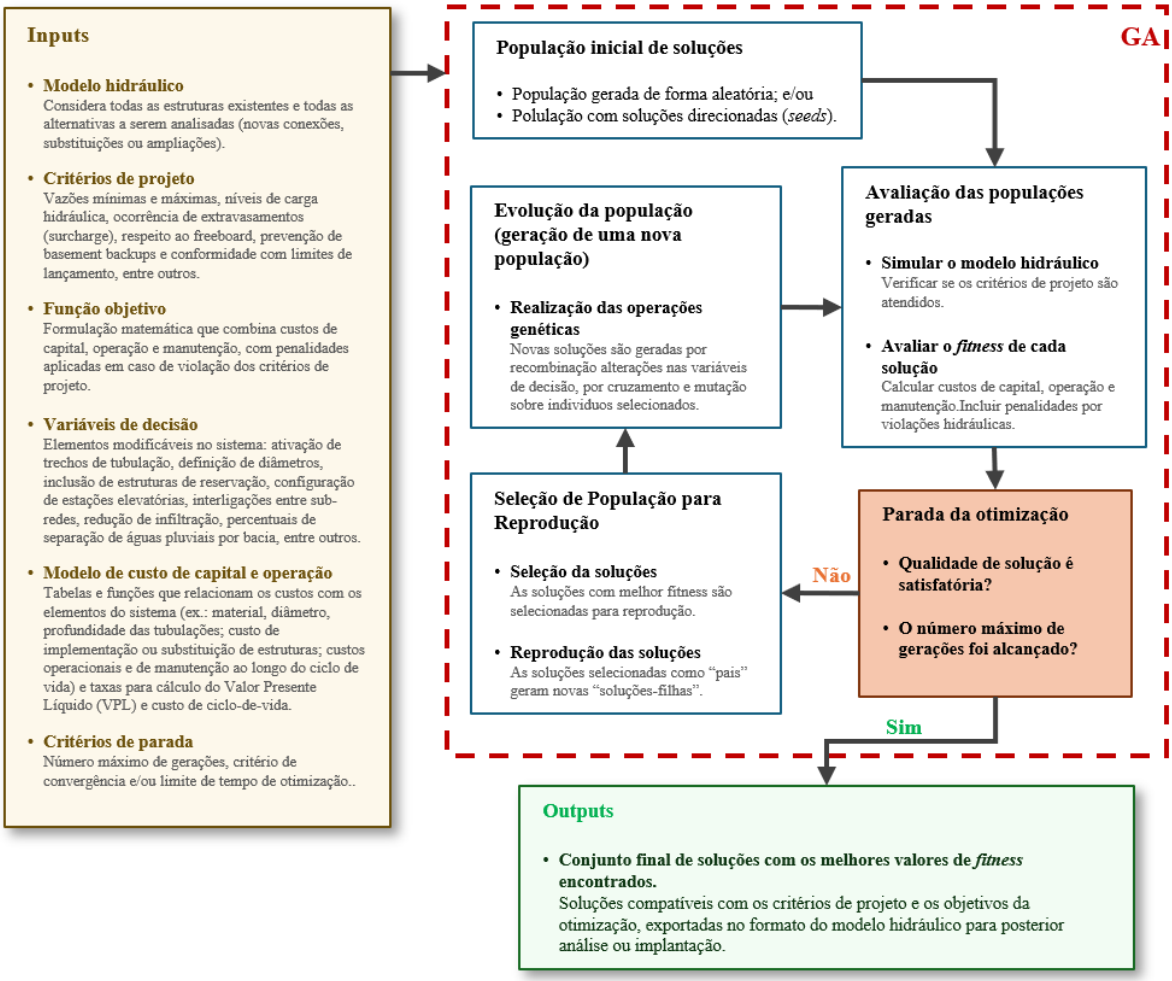
aplicações que incluem o dimensionamento de redes, calibração de modelos e otimização operacional de sistemas (*Reddy & Kumar, 2020*). Dentre os EAs, os algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms* – GAs) destacam-se por sua robustez, adaptabilidade e capacidade de lidar com múltiplos objetivos e restrições interdependentes. Sua aplicação em projetos de drenagem urbana e redes de esgoto tem sido documentada por diversos autores, com contribuições relevantes para o projeto ótimo de sistemas combinados e separados (Walters & Lohbeck, 1993; Walters & Smith, 1995; Liang *et al*., 2004; Afshar *et al*., 2006; Guo *et al*., 2006).

Inspirados nos mecanismos de evolução biológica, os GAs operam por meio de operadores como cruzamento, mutação e seleção natural, aplicados iterativamente sobre uma população de soluções candidatas. Cada indivíduo representa uma configuração completa do sistema, com "genes" que codificam variáveis como a seleção de sub-bacias a serem separadas, a presença de tubulações ou estruturas auxiliares, ou mesmo a ativação de dispositivos de controle hidráulico. A cada iteração do algoritmo, as soluções candidatas são avaliadas com base em uma função objetivo, que representa os critérios de desempenho definidos para o problema. Essa função pode combinar múltiplos indicadores, como custo total do ciclo de vida, volume de extravasamentos, entre outros parâmetros hidráulicos relevantes. Para que o processo evolutivo ocorra, os valores calculados pela função objetivo são convertidos em valores de *fitness*, que expressam a aptidão relativa de cada indivíduo na população. Em geral, quanto menor o custo e maiores os benefícios hidráulicos, maior o fitness da solução (Simpson *et al*., 1994; Nicklow *et al*., 2010).Esse processo se repete até que seja atingido um critério de parada previamente definido, como um número máximo de gerações, um tempo de execução-limite ou a estabilização dos resultados (Reddy & Kumar, 2020) como é ilustrado na **Figura 1**.

Essa lógica de seleção e recombinação simula o princípio darwinista da “sobrevivência dos mais aptos” e mostra-se especialmente vantajosa em problemas com múltiplas variáveis interdependentes e comportamentos não lineares, como os encontrados em redes de esgotamento sanitário. A aplicação de algoritmos genéticos permite explorar uma ampla gama de configurações do sistema, considerando simultaneamente aspectos técnicos — como *surcharge*, situação em que o nível de água no interior da tubulação excede sua capacidade plena, operando sob pressão e podendo causar extravasamentos por poços de visita; e violações do critério de *freeboard*, que ocorrem quando a linha piezométrica se aproxima excessivamente da superfície do solo, reduzindo a margem de segurança contra extravasamentos — além de aspectos econômicos, como os custos de implantação, operação e manutenção, mesmo em sistemas urbanos complexos.

O processo de otimização pode envolver milhares, ou até centenas de milhares, de avaliações. Cada alternativa gerada é testada diretamente em um modelo hidráulico, geralmente baseado no EPA-SWMM ou suas extensões, como o PCSWMM. O objetivo é encontrar soluções que atendam aos critérios definidos na função objetivo, maximizando o desempenho hidráulico ao menor custo possível.

Figura 1 - Fluxograma do Processo de Otimização Hidráulica com Algoritmos Genéticos aplicados a SES



Fonte: elaboração própria.

A definição adequada do critério de parada é essencial. Quando se utiliza um número muito pequeno de gerações, há o risco de o algoritmo encerrar prematuramente a busca em soluções subótimas (ótimos locais), enquanto um número excessivo pode resultar em tempo computacional elevado, sem ganhos significativos adicionais. Em aplicações reais, os valores comumente utilizados variam de 20.000 a 100.000 gerações por rodada de otimização, dependendo da complexidade do sistema modelado.

Uma estratégia amplamente utilizada para melhorar o desempenho do algoritmo é a otimização sequencial em múltiplas rodadas. Nesse formato, a primeira rodada é composta por soluções aleatórias e/ou dirigidas (as chamadas seeds), que já atendem parcialmente aos critérios de projeto. As melhores soluções obtidas são então utilizadas como seeds para a rodada seguinte, promovendo uma evolução mais eficiente e guiada do processo. Essa abordagem é particularmente útil em problemas de grande escala, como os que envolvem a priorização de intervenções em redes de esgoto de áreas urbanas densamente ocupadas.

A otimização sequencial também permite a realização de rodadas temáticas, em que diferentes objetivos são priorizados separadamente. Por exemplo, uma rodada pode ser dedicada à ampliação de capacidade por gravidade, outra à implantação de unidades de reservação ou tratamento, e outra à separação de águas pluviais em bacias mistas. Posteriormente, uma rodada final abrangente pode ser executada combinando as melhores alternativas das etapas anteriores, resultando em uma solução integrada e mais robusta.

Além das questões conceituais, é importante considerar o custo computacional. Como cada indivíduo precisa ser testado diretamente no simulador hidráulico, o tempo total de execução pode ser significativo. Em simulações mais extensas, como períodos de 72 horas com detalhamento de eventos extremos, o tempo por

rodada pode ultrapassar centenas de horas. Para contornar esse problema, é comum utilizar ambientes de computação em nuvem com múltiplos núcleos em paralelo, o que pode reduzir o tempo de execução para algumas horas, embora represente um custo adicional para o projeto.

No caso dos sistemas de esgotamento sanitário, essa abordagem permite não apenas explorar soluções otimizadas sob múltiplos critérios, mas também fornece uma base técnica sólida para a priorização de investimentos estruturais, seleção de alternativas de controle de extravasamentos e definição de pacotes de obras escaláveis e adaptativos,conforme exigido pelas condições hidráulicas e financeiras de cada município (Parvaze *et al*., 2023; *Reddy & Kumar*, 2020).

Estudo de Caso – Otimização do SES da cidade de Dearborn, Estados Unidos

O estudo de caso apresentado neste trabalho refere-se à cidade de Dearborn, localizada no estado de Michigan, Estados Unidos, no Condado de Wayne (**Figura 2**). Trata-se de um subúrbio interno da cidade de Detroit, fazendo divisa com esta a oeste e ao sul, a aproximadamente 11,3 km do centro da cidade de Detroit. A região é atravessada pelo Rio Rouge, que percorre Dearborn em direção sudeste e deságua no Rio Detroit. Segundo dados do United States Census Bureau referentes ao ano de 2024, Dearborn possui uma população estimada de 106.377 habitantes.

Figura 2 - Localização geográfica da cidade de Dearborn, Michigan, Estados Unidos, e seus limites urbanos



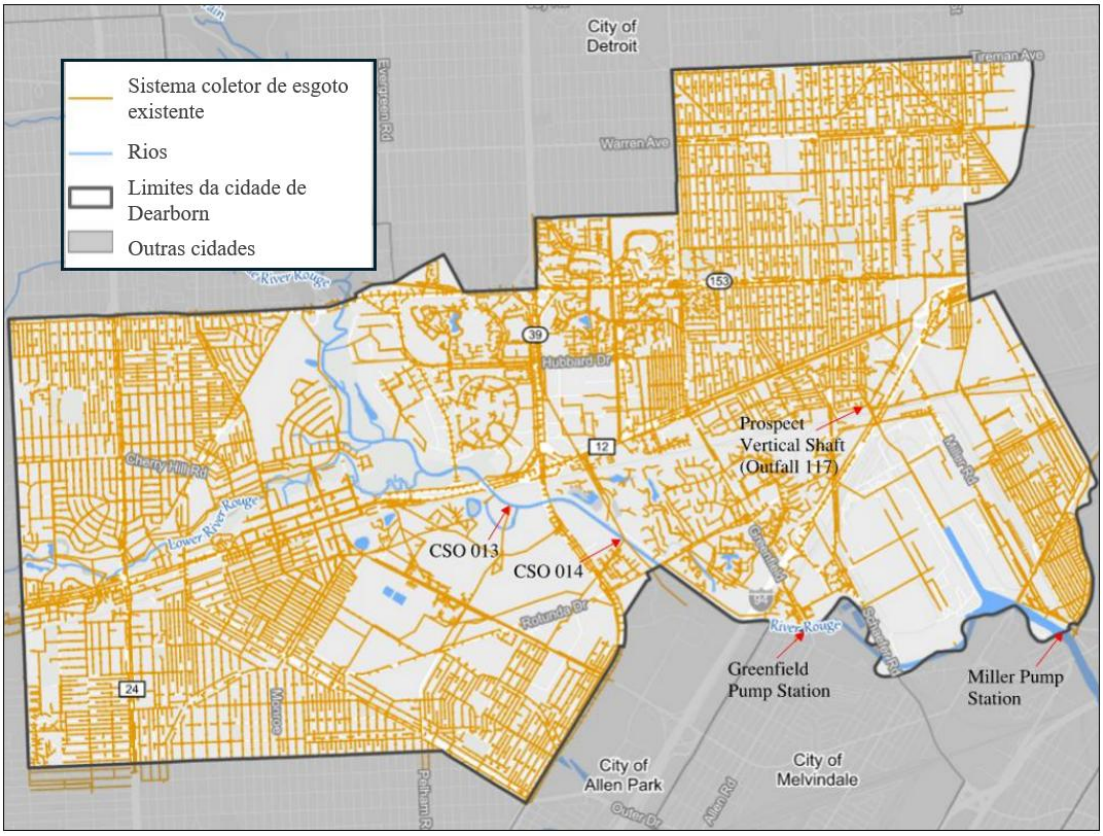
Fonte: Imagens do Google Earth (2024).

A maior parte do sistema de esgotamento sanitário da cidade de Dearborn foi construída com configuração de sistema de esgotamento combinado, ou seja, utilizando tubulações únicas para coleta conjunta de esgoto sanitário e águas pluviais. Esse tipo de sistema foi amplamente adotado até a década de 1960, quando o governo federal dos Estados Unidos passou a proibir o lançamento de esgoto bruto em corpos hídricos, impulsionando mudanças normativas. Com a promulgação da Lei Federal da Água Limpa (*Clean Water Act*), o Estado de Michigan passou a incorporar exigências de controle de Extravasamentos do Sistema Combinado (do inglês *Combined Sewer Overflows* – CSOs) como condição para emissão das licenças ambientais chamadas de *National Pollutant Discharge Elimination System* (NPDES).

Atualmente, a área de cobertura do sistema coletor de Dearborn é composta por zonas com esgotamento totalmente separado (esgoto sanitário e drenagem pluvial independentes), zonas com sistema de esgotamento combinado tradicional, e também áreas com configuração híbrida, onde trechos de redes pluviais operam em

conjunto com redes combinadas. O esgoto coletado (seja ele combinado ou sanitário) é destinado à Estação de Recuperação de Recursos Hídricos (do inglês *Water Resource Recovery Facility* – WRRF) da *Great Lakes Water Authority* (GLWA WRRF), enquanto as águas pluviais das redes separadas são descarregadas diretamente nos ramos principal e inferior do Rio Rouge. A **Figura 3** apresenta um mapa esquemático do sistema coletor existente na cidade e destaca os principais pontos de extravasamento do sistema combinado (CSO 013 e CSO 014), as estações elevatórias Greenfield e Miller, e o eixo do Rio Rouge que atravessa o município.

Figura 3 - Mapa do sistema coletor de esgoto da cidade de Dearborn



Fonte: Imagem adaptada do mapa fornecido pela cidade de Dearborn (2024).

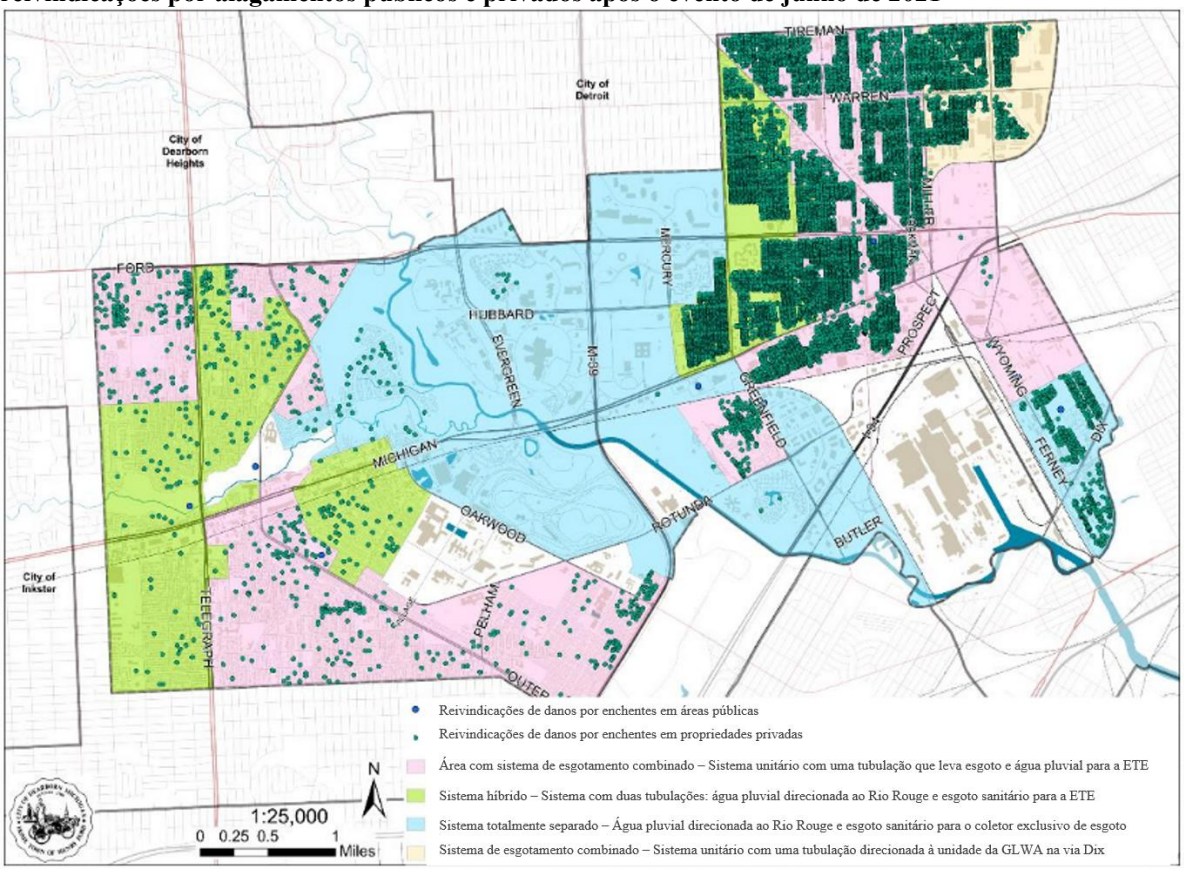
O aumento na frequência de eventos extremos de precipitação, com intensidade elevada em curtos períodos de tempo, tem intensificado as ocorrências de alagamentos urbanos e inundações em residências no município de Dearborn, despertando a necessidade de identificação de alternativas estruturais e operacionais para mitigação desses impactos. Em 11 de agosto de 2014, um evento de chuva estimado em 5,6 polegadas (aproximadamente 142 mm) resultou em alagamentos generalizados e retorno de esgoto para dentro das edificações, afetando cerca de 10 mil residências.

Nos Estados Unidos, é comum que as residências contem com níveis abaixo do nível da rua, os chamados porões (*basements*). Por esse motivo, além do desempenho convencional do sistema de esgotamento sanitário, os projetos hidráulicos também consideram como critério de dimensionamento o limite de *surcharge*, ou seja, o nível de carga hidráulica na tubulação. Quando esse nível ultrapassa a cota dos porões, o sistema entra em regime de extravasamento interno, ocasionando o retorno do esgoto para dentro das edificações, caracterizando os *basement backups*.

Nos anos seguintes, a cidade enfrentou três novos eventos críticos, registrados em 25-26 de junho, 16 de julho e 24 de julho de 2021. O evento de 25-26 de junho se destacou pela intensidade, com precipitação acumulada de aproximadamente 6,8 polegadas (cerca de 173 mm) em apenas 7 horas, provocando inundações severas e *basement backups* em mais de 20 mil residências. A **Figura 4** apresenta o mapa de registros de inundações em porões reportados após o evento de junho de 2021. Cabe destacar que, mesmo diante dessas condições extremas,

o sistema de esgotamento separado da cidade demonstrou desempenho satisfatório, mantendo sua operação dentro dos limites esperados.

Figura 4 - Tipologia dos sistemas de esgotamento sanitário na cidade de Dearborn e distribuição das reivindicações por alagamentos públicos e privados após o evento de junho de 2021



Fonte: Imagem adaptada do mapa fornecido pela cidade de Dearborn (2024).

Com o crescimento populacional da cidade de Dearborn e das áreas urbanizadas do entorno, aliado ao aumento da intensidade dos eventos de precipitação extrema, o sistema coletor existente passou a apresentar capacidade insuficiente para conduzir os volumes gerados durante eventos de chuva intensa. Diversos coletores tronco do sistema atual, incluindo o interceptor principal do sistema de esgotamento combinado, encontram-se subdimensionados para os fluxos gerados nessas condições críticas.

Como primeiro passo para a definição da melhor estratégia de proteção da população frente a futuros eventos de inundação, a prefeitura de Dearborn contratou o desenvolvimento de um modelo hidráulico do sistema de esgotamento sanitário. Esse modelo foi utilizado para avaliar o desempenho da infraestrutura existente frente aos eventos ocorridos em 2021. A modelagem permitiu identificar os extravasamentos nas saídas autorizadas do sistema de esgotamento combinado (CSO 013 e CSO 014), bem como os extravasamentos internos que resultaram em *basement backups*. A **Tabela 1** apresenta os volumes simulados de extravasamento do sistema combinado para cada um dos principais eventos de 2021, além da estimativa de volume total anual de extravasamentos. Esses valores foram obtidos com base na calibração do modelo hidráulico, em dados de medidores de vazão instalados no sistema e em séries históricas de precipitação anual.

Tabela 1 - Volumes simulados de extravasamento do sistema combinado (CSOs) durante eventos críticos em 2021 em milhões da galões americanos (MG) e em m³

Evento	CSO 013		CS0 014		CSOs em porões	
	MG	m³	MG	m³	MG	m³
25-26 Junho de 2021	0.1	378	0.2	757	48.5	183.961
16 de Julho de 2021	57.2	216.477	42.9	162.222	206.4	781.537

24 de Julho de. 2021	27.3	103.323	24.1	91.236	109.2	413.586
Estimativa anual	485.8	1.839.612	412.3	1.560.251	1,115.0	4.218.332

Fonte: elaboração própria a partir do modelo hidráulico, software PCSWMM (2024).

A modelagem do sistema de esgotamento sanitário indicou que as causas dos alagamentos e dos extravasamentos do sistema combinado em Dearborn são múltiplas e inter-relacionadas:

- A porção leste da cidade foi projetada com base em normas da década de 1920 para sistemas de esgotamento combinado, dimensionadas para escoar precipitações equivalentes a um evento com tempo de retorno de 5 anos e duração de 24 horas, ou seja, aproximadamente 71 mm (2,8 polegadas) em 24 horas.
- O crescimento populacional e o aumento na intensidade das chuvas superaram a capacidade hidráulica do sistema existente.
- Em áreas com sistema separado, os pontos de descarga de águas pluviais estão localizados em cotas altimétricas inferiores à atual elevação do Rio Rouge, dificultando a saída dos fluxos durante eventos chuvosos e provocando acúmulo e retrocesso de vazões.
- Por fim, o esgoto sanitário e os efluentes do sistema de esgotamento combinado são encaminhados para tratamento na unidade da *Great Lakes Water Authority* (GLWA). No entanto, o limite de vazão permitido nesse sistema receptor é significativamente inferior ao volume gerado durante eventos de tempo úmido. Atualmente, o sistema da GLWA não possui capacidade para receber vazões adicionais oriundas do sistema de Dearborn, restringindo, assim, a possibilidade de mitigação via aumento da capacidade de transporte do sistema existente.

Diante da limitação imposta à jusante do sistema, a principal alternativa viável para mitigação dos alagamentos passa a ser a realização de projetos de separação de esgotos e implantação de interceptores pluviais, com o objetivo de remover os volumes de águas pluviais do sistema combinado. Ao priorizar intervenções estruturais voltadas à separação de esgoto em vez de soluções voltadas exclusivamente ao tratamento dos CSOs após sua ocorrência, a cidade reduz significativamente os episódios de *basement backups*, bem como os extravasamentos nos pontos CSO 013 e CSO 014.

OBJETIVOS

Objetivos Gerais

O objetivo deste estudo foi avaliar as recorrentes ocorrências de extravazamento na cidade de Dearborn e propor alternativas de controle que permitam mitigar esses eventos por meio de um plano de intervenções priorizado, fundamentado em modelagem hidráulica e técnicas de otimização com múltiplos critérios de desempenho e custo.

Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho hidráulico do sistema de esgotamento sanitário de Dearborn frente aos principais eventos críticos de 2021, por meio do modelos hidrológicos e hidráulicos fornecidos pela cidade de Dearborn.
- Identificar as causas principais dos CSOs, considerando fatores como capacidade insuficiente das redes, subdimensionamento histórico e limitações hidráulicas nos pontos de descarga.
- Simular diferentes alternativas de controle estrutural, incluindo separação de esgoto pluvial, implantação de interceptores, reservatórios de detenção, túneis de armazenamento, estações elevatórias com tratamento, conexões cruzadas e infraestrutura verde.
- Avaliar o impacto dessas alternativas sob diferentes níveis de serviço, com destaque para o cenário de projeto com tempo de retorno de 25 anos acrescido de 30% no volume de escoamento, como forma de incorporar os efeitos das mudanças climáticas.
- Aplicar técnicas de otimização baseadas em algoritmos genéticos para selecionar soluções custo-efetivas, por meio da análise de múltiplos cenários e definição de uma fronteira de Pareto entre custo e desempenho.
- Priorizar as intervenções com base em critérios técnicos, operacionais e econômicos, propondo um plano de investimentos escalonado que maximize a mitigação de alagamentos e extravasamentos com base em metas realistas de curto e médio prazo.

METODOLOGIA UTILIZADA

Definição dos Critérios de Projetos

Os critérios de projeto adotados neste estudo foram definidos com o objetivo de estabelecer níveis de desempenho hidráulico e de serviço capazes de orientar o desenvolvimento e a avaliação das alternativas de intervenção. Esses critérios foram elaborados com base em diretrizes da Prefeitura de Dearborn e da consultoria OHM, considerando os impactos recentes de eventos extremos de precipitação, cuja frequência e intensidade têm se intensificado em decorrência das mudanças climáticas.

O evento de projeto adotado foi definido como o cenário de tempo de retorno de 25 anos acrescido de 30% no volume de escoamento gerado. Esse acréscimo visa acomodar os efeitos esperados das mudanças climáticas sobre os padrões de precipitação. Adicionalmente, foi realizada uma análise de sensibilidade com base em diferentes eventos críticos (1, 2, 5, 10 e 25 anos), com o objetivo de avaliar a priorização das ações identificadas na solução otimizada com base na recorrência dos eventos climáticos.

Os principais critérios considerados no dimensionamento das soluções foram:

- Prevenção de extravazamento em poços de visita (*manhole flooding):* definidos como extravasamentos localizados em PVs provocados por sobrecarga hidráulica (*surcharge*) durante eventos de chuva intensa. Este tipo de extravasamento é considerado um precursor dos CSOs e contribui diretamente para inundações localizadas e *basement backups*.
- Redução dos Extravasamentos do Sistema Combinado CSOs: a mitigação dos lançamentos indevidos de esgoto combinado em corpos hídricos receptores foi adotada como diretriz central na formulação das alternativas.
- Respeito à cota de segurança (*freeboard*): foi estabelecido que a linha de carga hidráulica (HGL) não deve ultrapassar 2,4 metros (equivalente a 8 pés) abaixo da cota da superfície durante o evento de projeto. Esse valor corresponde à profundidade média de porões residenciais, sendo, portanto, um critério direto de prevenção de *basement backups*.

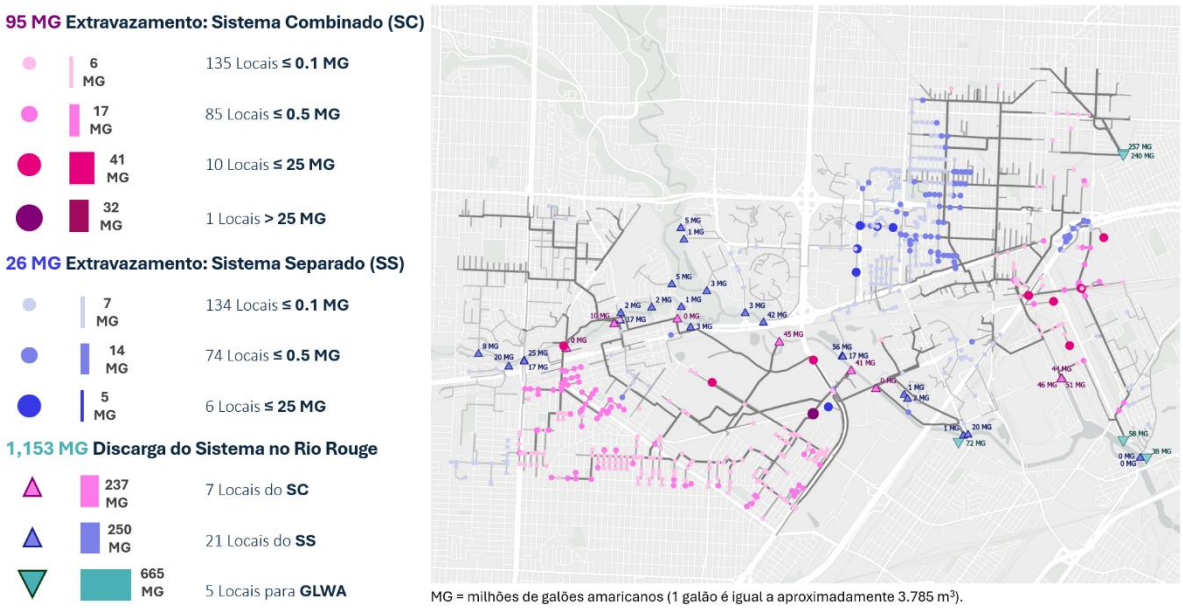
Revisão do Modelo Hidráulico na Condição do Período de Retorno de 25 anos Considerando Mudanças Climáticas

O modelo hidráulico utilizado neste estudo foi fornecido pela cidade de Dearborn já em formato compatível com o *software* PCSWMM, representando a configuração atualizada do sistema de esgotamento sanitário, incluindo áreas com sistema combinado, redes separadas e setores híbridos. Esse modelo foi utilizado como base para simular o desempenho do sistema frente a diferentes cenários de tempo de retorno, com destaque para a condição crítica associada ao evento de 25 anos acrescido de 30% de volume, incorporando os efeitos esperados das mudanças climáticas.

Historicamente, os critérios de projeto adotados por municípios norte-americanos costumavam se basear em eventos com tempo de retorno de 10 anos e duração de 24 horas. No entanto, diante do aumento na frequência e severidade dos eventos de tempo úmido observados, especialmente os registrados em 2021, a cidade de Dearborn adotou uma postura proativa, passando a considerar cenários mais severos como referência para a avaliação de alternativas estruturais. Essa abordagem permitiu analisar não apenas os impactos hidráulicos decorrentes de eventos extremos, mas também as diferenças de custo entre as alternativas, além de verificar se distintas combinações de tecnologias de controle seriam necessárias para atender aos níveis de serviço definidos sob diferentes chuvas de projeto.

A **Figura 5** apresenta o desempenho do sistema para o cenário de evento de 10 anos, evidenciando cerca de 95 milhões de galões (aproximadamente 360 mil m³) de extravasamentos do sistema de esgotamento combinado em mais de 240 locais distintos, incluindo volumes associados a *basement backups*. Adicionalmente, o sistema de drenagem pluvial separado apresentou cerca de 26 milhões de galões (aproximadamente 98 mil m³) de extravasamentos em aproximadamente 210 pontos da rede. Somando-se os volumes descarregados pelos sistemas combinado, separado e pelas conexões com o sistema da GLWA, o total de escoamento gerado durante o evento superou 1,1 bilhão de galões (mais de 4,1 milhões de m³).

Figura 5 - Desempenho do sistema de esgotamento sanitário da cidade de Dearborn para chuva com período de retorno de 10 anos

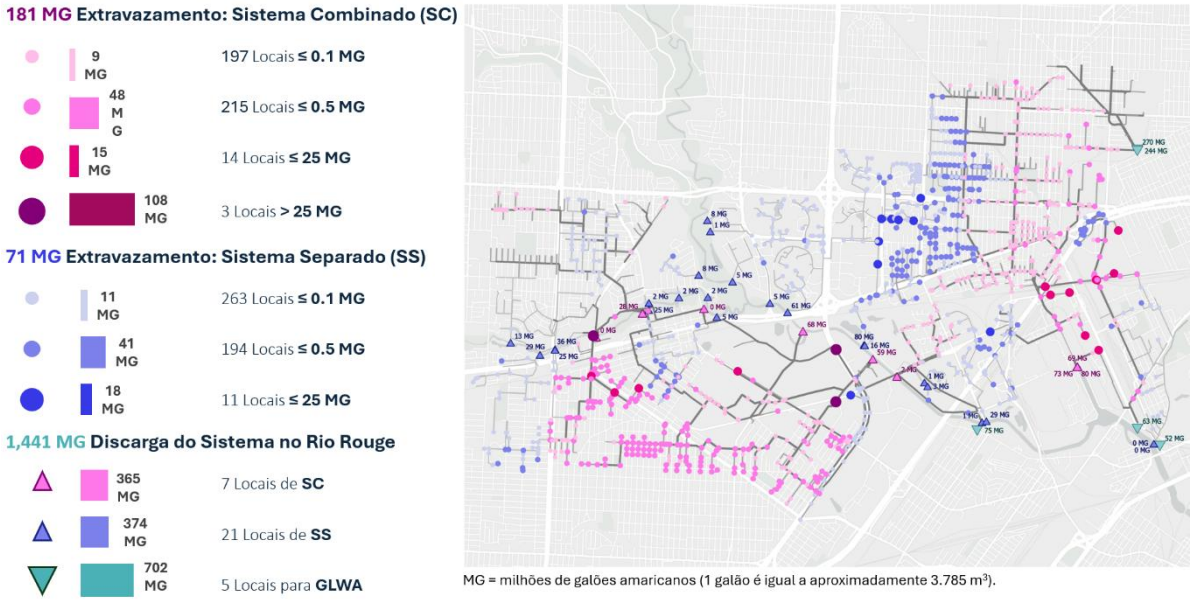


Fonte: elaboração própria, softwares ArcGIS e PCSWMM (2024).

A **Figura 6** apresenta os resultados da simulação para o cenário de evento de 25 anos acrescido de 30% de volume, adotado como evento de projeto de referência neste estudo. Nesse cenário, o modelo identificou aproximadamente 181 milhões de galões (cerca de 685 mil m³) de extravasamentos do sistema de esgotamento combinado, distribuídos em cerca de 430 pontos da rede, incluindo volumes associados a alagamentos em porões (basement backups). O sistema de drenagem pluvial separada também apresentou extravasamento de aproximadamente 71 milhões de galões (cerca de 269 mil m³) em cerca de 460 locais distintos. Ao considerar o

total de escoamento esgotado durante o evento, somando as contribuições do sistema de esgotamento combinado, do sistema separado e dos lançamentos direcionados à infraestrutura da GLWA, o volume total ultrapassa 1,4 bilhão de galões, o que equivale a mais de 5,3 milhões de metros cúbicos.

Figura 6 - Desempenho do sistema de esgotamento sanitário da cidade de Dearborn para o evento de 25 anos acrescido de 30% de volume



Fonte: elaboração própria, softwares: ArcGIS e PCSWMM (2024).

Otimização com Algortimo Genético Utilizando o Optimizer

1. <u>Definição das alternativas de intervenção (espaço de busca)</u>

Com base no modelo hidráulico fornecido e nos critérios de projeto estabelecidos, foram definidas diversas alternativas estruturais com o objetivo de aumentar a capacidade do sistema combinado e mitigar os impactos hidráulicos associados ao evento de projeto. Essas alternativas contemplam tanto o sistema de esgotamento combinado quanto as redes separadas e híbridas da cidade, e foram parametrizadas para permitir sua análise e combinação durante o processo de otimização.

As tecnologias de controle analisadas podem ser agrupadas nas seguintes categorias (**Figura 7**):

- Estações elevatórias com tratamento preliminar (8 alternativas): consistem em sistemas de bombeamento com desague no Rio Rogue, equipados com unidades de gradeamento e desinfecção, com tempos de contato entre 5 e 10 minutos, em conformidade com os padrões típicos de tratamento de CSOs na bacia do Rio Rouge. Cabe destacar que, devido à falha estrutural dos poços (*caissons*) existentes, essa tecnologia foi excluída de algumas análises de viabilidade.
- Soluções de reservação (22 alternativas): abrangem principalmente tanques de detenção de diferentes portes. Em alguns casos, a adoção de reservatórios de maior capacidade requer a implementação de poços de queda (*drop shafts*) e túneis de armazenamento.
- Redes de esgoto por gravidade (36,2 milhas / cerca de 58 km): envolvem a implantação de coletores de gravidade e túneis de condução para ampliação da capacidade de escoamento em trechos estratégicos. As soluções de maior diâmetro exigem escavação em profundidade reduzida (*shallow tunnels*).
- Conexões cruzadas (17 alternativas): representam interligações entre trechos distintos da rede, viabilizando o redirecionamento de vazões para zonas com capacidade ociosa.
- Separação de águas pluviais (91 sub-bacias): considerou-se a separação parcial ou total de esgoto pluvial em sub-bacias com sistema combinado. Foram simulados graus crescentes de separação (25%, 50%, 75% e 100%), permitindo analisar o efeito incremental da remoção de águas pluviais do sistema de esgotamento sanitário. A separação de águas pluviais foi formulada a partir de custos conservadores praticados na construção de sistemas de drenagem pluvial separadores em Dearborn e demais localidades próximas.

Figura 7 - Localização e tipologia das alternativas estruturais consideradas no modelo hidráulico para o processo de otimização



Fonte: elaboração própria, softwares: ArcGIS e PCSWMM (2024).

É importante destacar que as alternativas descritas representam o conjunto completo de possibilidades estruturais inseridas no modelo hidráulico para viabilizar o processo de otimização. Isso não implica que todas as intervenções serão necessariamente adotadas no plano final. O algoritmo de otimização tem como objetivo identificar, entre as múltiplas combinações possíveis, quais alternativas devem ser implementadas, e em que extensão, de modo a alcançar os objetivos de desempenho hidráulico com o menor custo possível. Dessa forma, o processo permite excluir intervenções redundantes ou desnecessárias, promovendo uma alocação racional dos investimentos com base na relação custo-benefício de cada cenário.

2. Processo de Otimização no Optimizer

O processo de otimização foi realizado utilizando o software Optimizer™, que aplica algoritmos genéticos para avaliar automaticamente milhares de combinações de intervenções estruturais no sistema de esgotamento. Essa abordagem permite a identificação de soluções que equilibram desempenho hidráulico e custo de implantação, oferecendo um portfólio otimizado de projetos com base em critérios objetivos previamente definidos.

Para a formulação do problema de otimização, foram configuradas funções objetivo compostas, considerando tanto os custos associados à implantação das infraestruturas (como separação de redes, novas elevatórias, túneis e reservatórios), quanto penalidades vinculadas ao desempenho hidráulico do sistema (como extravasamentos, inundações em poços de visita e trechos super- ou subdimensionados). Cada tipo de alternativa estrutural foi vinculado a um custo estimado com base em unidades de medida padronizadas, e as penalidades de desempenho foram convertidas em valores monetários para permitir a comparação entre diferentes soluções em uma mesma métrica.

Foram executadas otimizações com três configurações principais:

- **Objetivo único**, combinando os custos totais de infraestrutura e as penalidades hidráulicas em uma única função objetivo para identificar a solução de menor custo total.
- **Otimização multiobjetivo (nível de serviço)**, considerando separadamente os custos de capital e as penalidades de desempenho, permitindo a construção de uma fronteira de Pareto entre custo e eficiência hidráulica.
- **Otimização multiobjetivo por tipo de solução**, distinguindo os investimentos em melhorias no sistema de esgoto (como túneis e elevatórias) daqueles voltados à separação pluvial, possibilitando avaliar a contribuição relativa de cada tipo de intervenção no desempenho geral do sistema.

Nenhum limite máximo foi imposto às funções objetivo, permitindo que o algoritmo explorasse livremente o espaço de busca. As soluções foram avaliadas com base em critérios de minimização de custo e maximização

do desempenho, sendo as melhores combinações selecionadas para posterior análise hidráulica detalhada e verificação de viabilidade prática.

Para garantir que o processo de otimização refletisse adequadamente os custos reais de implementação, operação e manutenção das alternativas estruturais, foi incorporado ao modelo do Optimizer um modelo de custos de ciclo de vida, desenvolvido em conjunto com a equipe técnica da cidade de Dearborn. Esse modelo considerou um horizonte de 50 anos e incluiu os custos de capital (*Capital Expenditure* - CAPEX), os custos operacionais e de manutenção (O&M), bem como os custos de substituição ao fim da vida útil das estruturas.

Os valores foram expressos em valor presente, utilizando fatores multiplicadores acordados com base em práticas de engenharia econômica. As categorias de custo incluíram: redes de esgoto por gravidade (com diferentes faixas de profundidade), túneis de condução (profundidade superior a 7,6 m), tanques de detenção, estações elevatórias com sistemas de gradeamento e desinfecção, além dos custos associados à separação de águas pluviais. As fórmulas empregadas no cálculo consideraram:

- um fator de valor presente (*Present Value Multiplier* – PVM),
- um multiplicador de custo de substituição (*Replacement Cost Multiplier* – REP),
- e a equivalência dos custos anuais de O&M convertidos em valor presente (O&M PV).

Dessa forma, o custo total de cada solução alternativa foi obtido pela soma dos componentes CAPEX, O&M PV e REP PV, garantindo uma análise abrangente e financeiramente realista das intervenções propostas ao longo de todo o seu ciclo de vida útil.

3. Pós-Processamento da Otimização

Após a conclusão das rodadas de otimização no software Optimizer, as soluções de maior interesse, como aquelas pertencentes à fronteira de Pareto ou que apresentaram o menor custo total para diferentes níveis de desempenho hidráulico, foram selecionadas para análise detalhada. Essas soluções foram exportadas diretamente no formato compatível com o PCSWMM, mantendo a estrutura original do modelo hidráulico fornecido pela cidade de Dearborn.

Em seguida, as soluções foram executadas manualmente no ambiente PCSWMM pelo engenheiro responsável, com o objetivo de validar os resultados hidráulicos reportados durante o processo automatizado de otimização. Essa etapa permitiu confirmar, com maior granularidade, o atendimento aos critérios de projeto, como redução de *basement backups*, mitigação de extravasamentos do sistema combinado (CSOs) e respeito aos limites de carga hidráulica nos poços de visita.

Além da validação hidráulica, foi realizada a verificação independente dos custos de ciclo de vida associados a cada cenário otimizado. Para isso, os dados de intervenção (tipo, extensão, localização e dimensão das estruturas) foram tratados em planilhas eletrônicas, nas quais se aplicaram as tarifas unitárias previamente acordadas com a cidade de Dearborn. Essa análise teve como objetivo confirmar se os valores totais estimados de CAPEX, O&M e substituição coincidiam com os relatados pelo modelo de otimização.

As soluções validadas foram então integradas a ambiente GIS, o que permitiu a visualização espacial das intervenções propostas, facilitando a revisão da alocação geográfica de cada elemento e a verificação de sua coerência com as condições operacionais e estruturais do sistema. Esse mapeamento espacial é essencial para garantir a compatibilidade da solução otimizada com a realidade urbana e com o cronograma de execução dos projetos previstos.

4.Priorização de Bacias de Esgostamento para Separação das Águas Pluviais do Sistema de Esgoto

Como parte das estratégias avaliadas para a mitigação de extravasamentos do sistema combinado, uma das principais intervenções estruturais consideradas foi a separação das águas pluviais das redes de esgotamento sanitário em bacias de drenagem com sistema de esgotamento combinado ou híbrido. Essa abordagem tem como objetivo reduzir a sobrecarga hidráulica nas tubulações existentes durante eventos de tempo úmido, minimizando o risco de basement backups e extravasamentos.

A definição das bacias prioritárias para separação foi realizada com base em múltiplos critérios técnicos e operacionais, considerando:

- Histórico de alagamentos e extravasamentos registrados em cada sub-bacia, com base em dados de eventos críticos (como os de 2021);

- Localização relativa das bacias dentro do sistema, especialmente aquelas situadas a montante de pontos críticos ou próximas às saídas CSO 013 e CSO 014;
- Viabilidade técnica de implantação, incluindo a presença de redes pluviais paralelas ou capacidade de encaminhamento para pontos de lançamento no Rio Rouge;
- Capacidade ociosa em setores adjacentes, que poderiam receber parte das vazões após a separação;
- Custo estimado por hectare separado, com base nas tarifas unitárias aplicadas no modelo econômico.

Cada bacia foi avaliada individualmente no modelo de otimização, sendo atribuídas percentagens crescentes de separação (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) como alternativas possíveis. O algoritmo de otimização, ao testar diferentes combinações entre as bacias, identificou aquelas cuja separação trazia maior ganho hidráulico por unidade de custo, permitindo assim a priorização baseada em custo-benefício.

As bacias selecionadas para os primeiros pacotes de intervenção foram aquelas que apresentaram maior contribuição para a redução de CSOs com menor investimento relativo, sendo posteriormente validadas no modelo hidráulico e integradas ao plano de curto e médio prazo do município. As análises de sensibilidade realizadas para eventos chuvosos mais recorrentes (período de retorno de 1, 2, 5, 10 e 25 anos) foram utilizadas para confirmar e refinar as bacias prioritárias para os primeiros pacotes de intervenção, priorizando também as bacias cujas intervenções reduzissem CSOs e *basement backups* nas chuvas mais recorrentes.

RESULTADOS OBTIDOS

Resultados da Otimização do Sistema de Esgotamento para Mitigação de Extravazamento

A aplicação do processo de otimização permitiu identificar um conjunto amplo de alternativas compostas por diferentes combinações de intervenções estruturais, incluindo redes de esgoto por gravidade, conexões cruzadas, reservatórios de detenção (tanques ou túneis), estações elevatórias com tratamento preliminar (gradeamento e desinfecção) e separação de águas pluviais. Para cada cenário gerado, foram incorporados os custos associados à operação, manutenção e substituição dos ativos ao longo do tempo, possibilitando o cálculo do custo total de ciclo de vida das soluções.

A **Figura 8** apresenta os custos estimados, em milhões de dólares americanos, para as soluções preliminares otimizadas identificadas para o cenário de projeto com tempo de retorno de 25 anos acrescido de 30% de volume. Com o objetivo de estudar diferentes estratégias de atendimento, foram realizadas otimizações restringindo as alternativas em cinco cenários distintos. Para cada cenário, foi obtida uma solução otimizada:

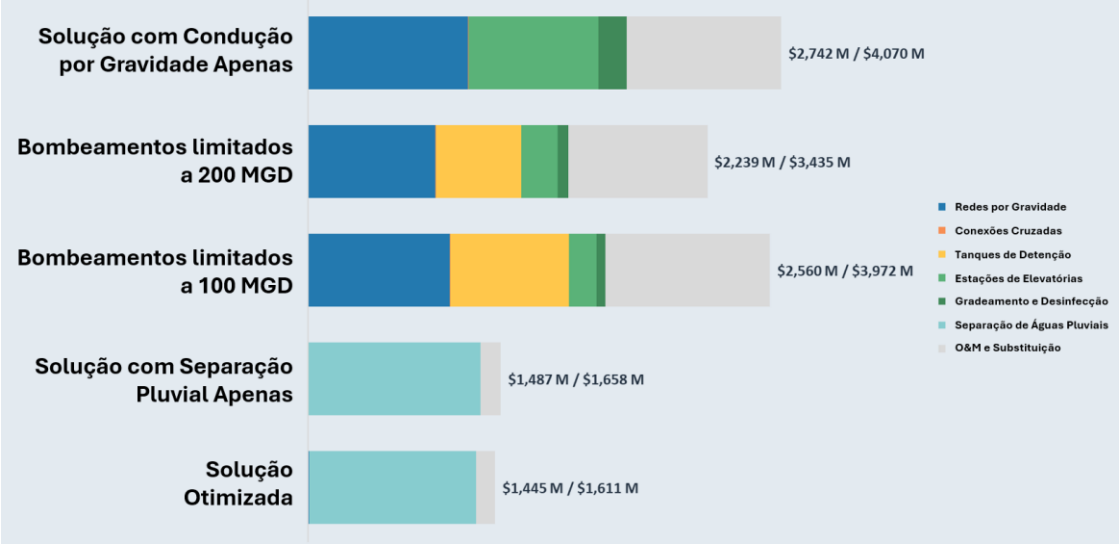
- Soluções baseadas apenas em condução por gravidade (**Figura 9**), com ampliação da capacidade de escoamento por meio de redes e túneis;
- Soluções com reservação e tratamento (**Figura 10**), associadas a estações elevatórias para desague no rio Rogue com capacidade limitada a 200 milhões de galões americanos por dia (MGD);
- Soluções similares ao grupo anterior (**Figura 11**), mas com capacidade de bombeamento limitada a 100 MGD, reduzindo o porte das estações, o impacto em áreas urbanas densas e a vazão bombeada ao rio Rogue;
- Soluções baseadas exclusivamente em separação de águas pluviais (**Figura 12**), com remoção de contribuição pluvial em bacias selecionadas;
- Soluções considerando todas as alternativas elaboradas, sem limitações (**Figura 13**).

A diversidade das soluções reflete a flexibilidade do modelo de otimização, permitindo que diferentes caminhos técnicos sejam avaliados conforme as restrições orçamentárias e operacionais do município. Observa-se que os resultados preliminares da otimização indicaram que a solução baseada na separação do sistema de esgotamento combinado para um sistema separador absoluto apresenta maior viabilidade econômica quando comparada às alternativas que envolvem a implementação de novas estruturas no sistema existente, tanto em termos de investimento inicial (CAPEX) quanto, sobretudo, nos custos de operação, manutenção e substituição.

Neste cenário, a solução identificada como otimizada para o sistema de esgotamento da cidade de Dearborn foi composta majoritariamente por intervenções de separação de águas pluviais, complementadas pela implantação de aproximadamente 1,6 km de novas tubulações de esgoto por gravidade, distribuídas em quatro pequenos trechos estratégicos. Diferentemente de outras alternativas analisadas, esta solução não contempla a construção de tanques de detenção ou estações elevatórias, o que contribui significativamente para a redução dos custos de capital e operação.

O processo de otimização foi conduzido dentro desse escopo de alternativas, avaliando as combinações mais eficientes de sub-bacias onde a separação parcial ou total da contribuição pluvial poderia proporcionar os maiores ganhos hidráulicos com o menor custo. O cenário final identificado pelo algoritmo representa, dentro da formulação do problema, a melhor alternativa identificada, considerando intervenções de baixa complexidade e alta efetividade, com desempenho satisfatório na mitigação de CSOs e ocorrências de *basement backups*. Esta configuração também se destacou por apresentar o menor custo total de ciclo de vida entre todas as opções avaliadas.

Figura 8 - Comparação das soluções preliminares otimizadas para o evento de projeto (25 anos + 30%), segundo composição estrutural e custo total do ciclo de vida



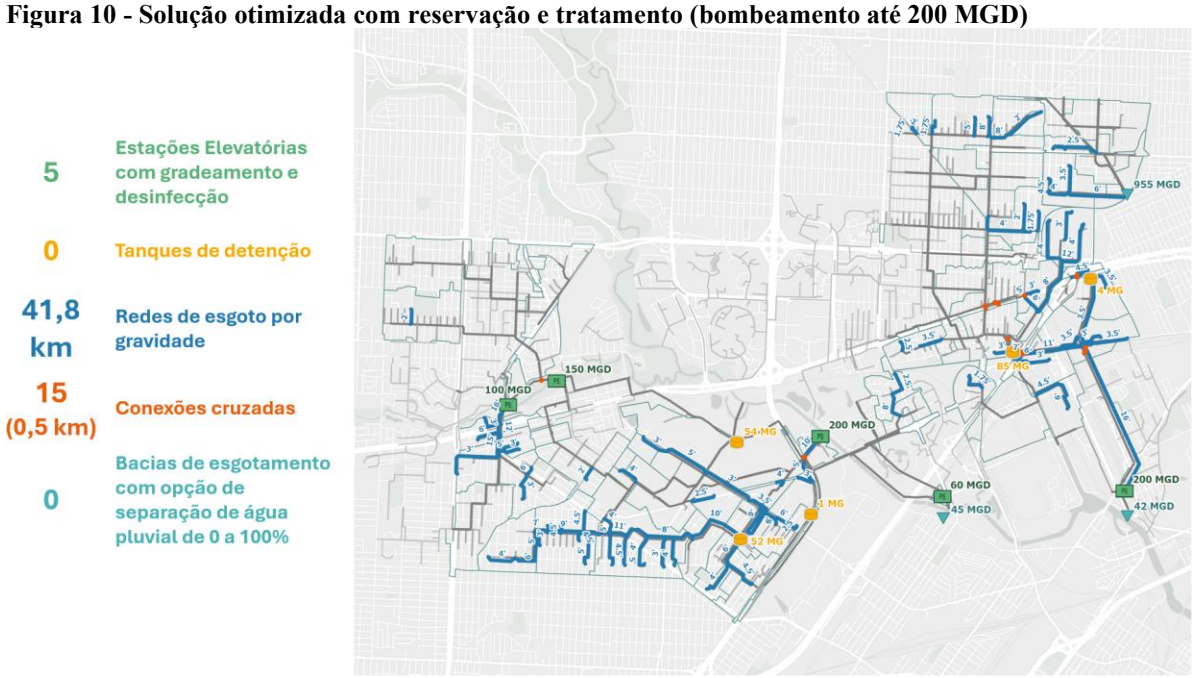
Fonte: elaboração própria (2024).

Figura 9 - Solução otimizada com condução por gravidade apenas



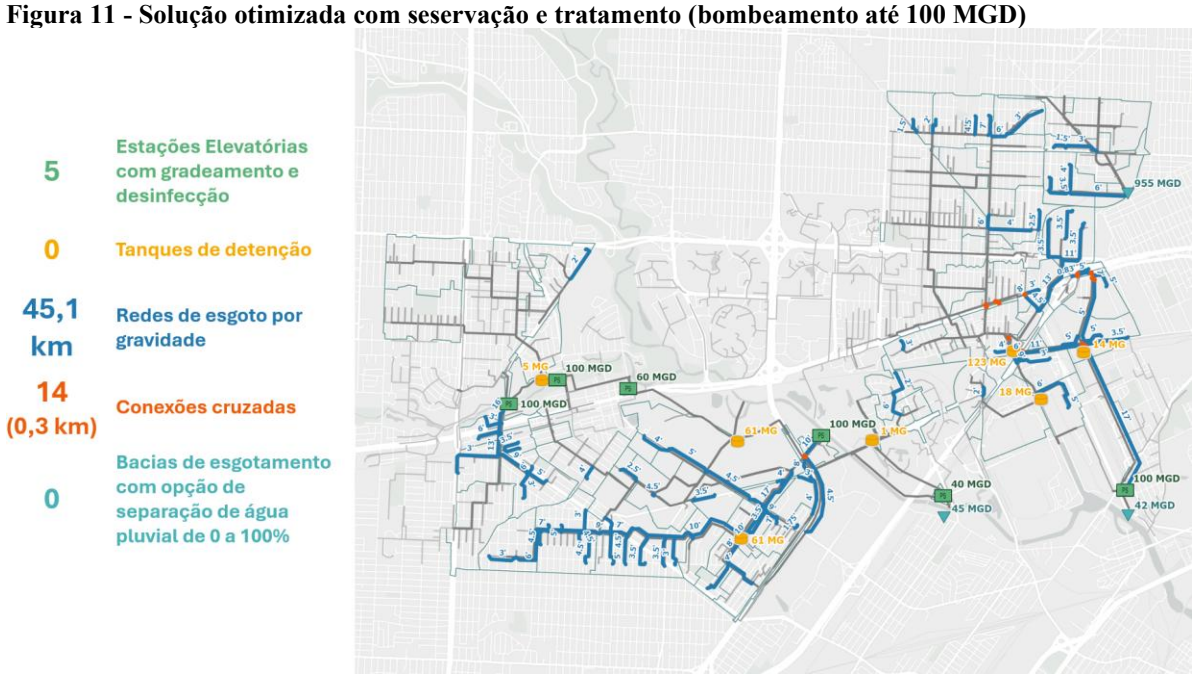
Fonte: elaboração própria, softwares: ArcGIS e PCSWMM (2024)..

Figura 10 - Solução otimizada com reservação e tratamento (bombeamento até 200 MGD)



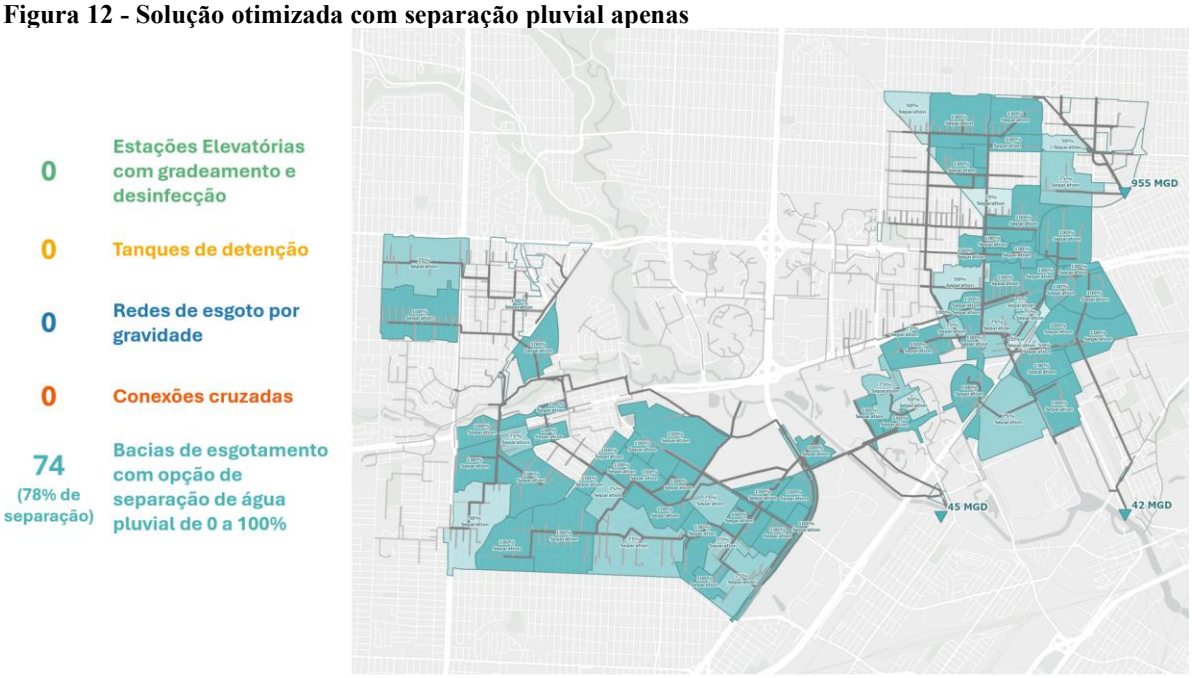
Fonte: elaboração própria, softwares: ArcGIS e PCSWMM (2024)..

Figura 11 - Solução otimizada com seservação e tratamento (bombeamento até 100 MGD)



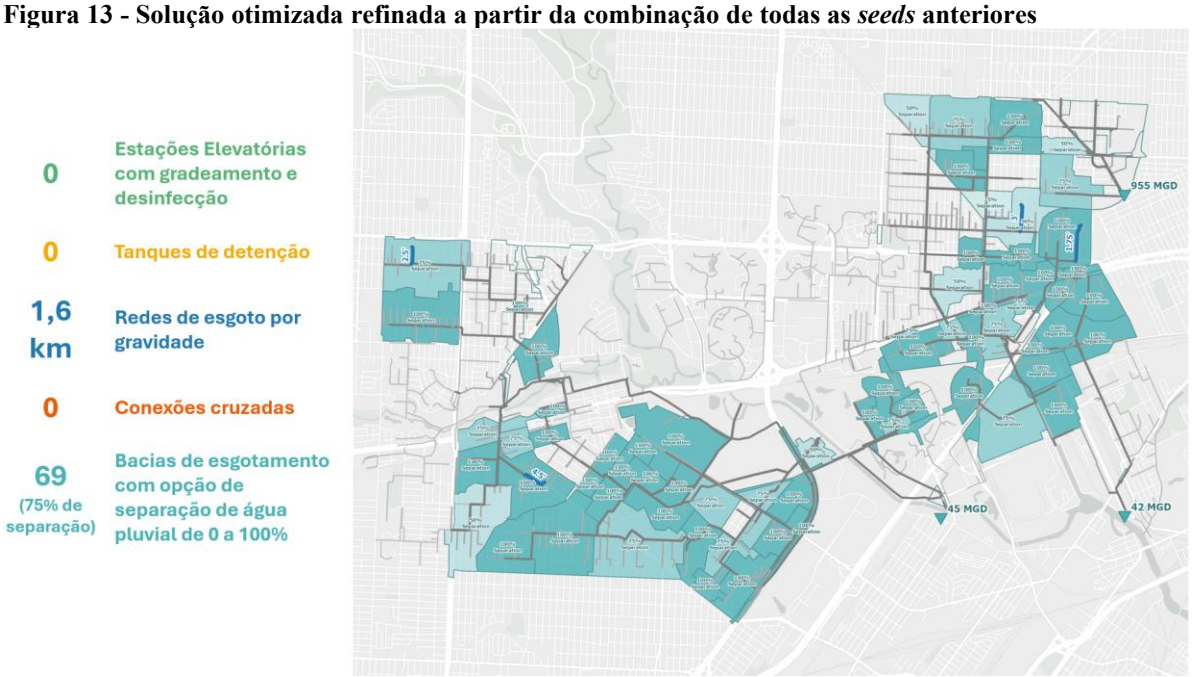
Fonte: elaboração própria, softwares: ArcGIS e PCSWMM (2024)..

Figura 12 - Solução otimizada com separação pluvial apenas



Fonte: elaboração própria, softwares: ArcGIS e PCSWMM (2024)..

Figura 13 - Solução otimizada refinada a partir da combinação de todas as *seeds* anteriores



Fonte: elaboração própria, softwares: ArcGIS e PCSWMM (2024)..

Priorização da Solução Otimizada Refinada

Neste estudo de caso, a solução otimizada tendeu a selecionar majoritariamente a separação da água pluvial do sistema combinado. Por se tratar de um estudo a nível conceitual, a solução finalmente implementada deverá passar ainda por refinamentos, estudos de viabilidade e projetos a nível executivo. Devido à baixa representatividade das intervenções estruturais selecionadas na solução otimizada e às incertezas inerentes da estimativa de custos deste nível de projeto, considera-se que a solução que considera apenas a separação de água pluvial (sem novas redes por gravidade, **Figura 12**), é tão custo-efetiva quanto a solução otimizada (**Figura 13**). Portnato, a solução que contempla apenas separação de água pluvial foi selecionada para que fosse realizada a priorização dos investimentos.

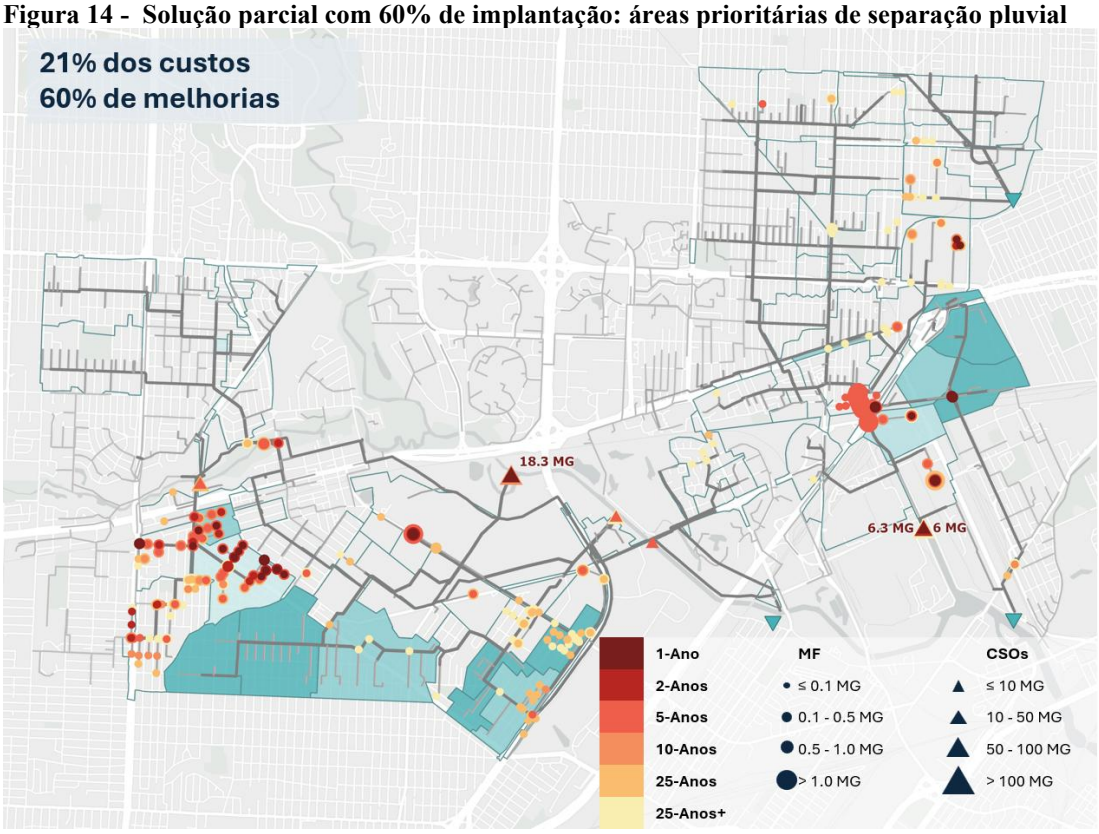
Com base nos resultados da solução otimizada refinada, foi possível estabelecer uma sequência de priorização das intervenções que equilibra o ganho de desempenho hidráulico com os investimentos necessários ao longo do tempo. O modelo Optimizer foi utilizado para simular diferentes estágios de implantação da solução final, permitindo comparar o desempenho progressivo do sistema frente ao custo incremental das obras. As figuras a seguir apresentam o desempenho do sistema existente para diferentes percentuais de investimentos, evidenciando deficiências como extravasamentos em poços de visita (*manhole flooding - MF),* violações da linha piezométrica (*freeboard - FB*) e ocorrência de CSOs para diferentes tempos de retorno.

Na sequência, a **Figura 14** ilustra um cenário intermediário de intervenção, correspondente a aproximadamente 21% da solução final implementada, priorizando as sub-bacias com maior histórico de falhas hidráulicas, localizadas principalmente nas regiões leste e sudoeste da cidade. A escolha dessas áreas iniciais está alinhada com registros históricos de alagamentos durante eventos extremos. Neste cenário, embora ainda haja deficiências remanescentes, observa-se uma melhora significativa no desempenho do sistema com um custo de implantação substancialmente inferior ao da solução completa. Destaca-se, ainda, a eliminação dos extravazamentos nos eventos chuvosos mais recorrentes nas regiões contempladas.

A **Figura 15** apresenta o cenário final da solução otimizada, com todas as intervenções implementadas, resultando em eliminação total das deficiências hidráulicas mapeadas no evento de projeto. As áreas com separação de esgoto pluvial são identificadas segundo os percentuais de separação adotados em cada sub-bacia. A análise demonstra que não é necessário separar 100% da área do sistema combinado para atingir os critérios de desempenho, o que reforça a efetividade da estratégia otimizada.

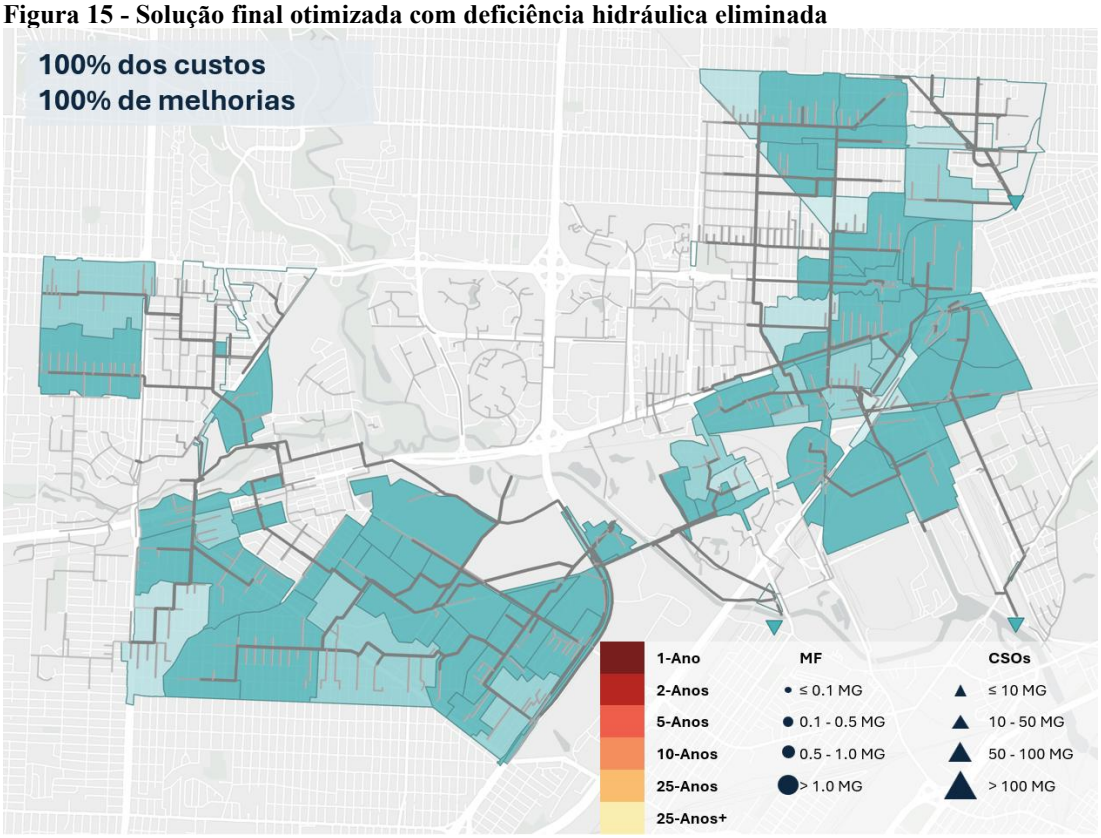
A relação entre custo e desempenho ao longo das etapas de implantação é ilustrada na **Figura 16**, por meio do gráfico de deficiência hidráulica residual versus investimento acumulado. Essa ferramenta permite avaliar o ponto ótimo de intervenção, onde o ganho marginal de desempenho deixa de justificar o aumento de custo, oferecendo uma base técnica para escalonamento dos projetos no tempo.

Figura 14 - Solução parcial com 60% de implantação: áreas prioritárias de separação pluvial



Fonte: elaboração própria, softwares: ArcGIS e PCSWMM (2024)..

Figura 15 - Solução final otimizada com deficiência hidráulica eliminada



Fonte: elaboração própria, softwares: ArcGIS e PCSWMM (2024)..

Figura 16 - Curva da priorização de investimentos - Análise do nível de serviço considerando chuva de projeto de 25 anos mais questões climáticas



Fonte: elaboração própria (2024).

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A alternativa otimizada com foco na separação de águas pluviais se destacou como a solução de menor custo total de ciclo de vida dentre todas as opções avaliadas para o cenário de projeto com tempo de retorno de 25 anos acrescido de 30% de volume. Essa configuração foi composta por intervenções de separação em sub-bacias prioritárias, sem necessidade de implantação de grandes estruturas como túneis ou estações elevatórias, o que contribuiu significativamente para a sua viabilidade técnica e econômica.

A análise dos resultados otimizados permitiu identificar, com base em critérios objetivos, as áreas mais críticas do sistema e o conjunto de intervenções mais eficazes para atender aos objetivos de desempenho hidráulico. A possibilidade de simular diferentes estágios de implantação (por exemplo, 60% e 100% da solução) também viabilizou a construção de um plano de ações escalonado, que considera a relação custo-benefício incremental e orienta a priorização dos investimentos.

Além disso, o uso do modelo de otimização possibilita que, conforme os projetos avancem para fases de detalhamento, as premissas de custo, parâmetros hidráulicos e restrições de projeto possam ser atualizados. Isso viabiliza a adoção de uma abordagem de gestão adaptativa, em que novas informações, como revisões de custo, monitoramentos em campo ou mudanças nas condições urbanas, são incorporadas ao processo decisório, garantindo maior efetividade e flexibilidade na implementação das etapas subsequentes.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo demonstrou o potencial do uso de algoritmos genéticos aplicados à otimização de sistemas de esgotamento sanitário, por meio do software Optimizer, como uma ferramenta estratégica para apoiar a tomada de decisão em contextos complexos de infraestrutura urbana. A aplicação da metodologia ao sistema da cidade de Dearborn permitiu a identificação de soluções estruturais altamente custo-efetivas, com desempenho hidráulico satisfatório e viabilidade técnica para implantação em curto e médio prazo.

O diferencial da abordagem está na capacidade de avaliar, de forma automatizada, milhares de combinações possíveis de intervenções, considerando múltiplos critérios técnicos, econômicos e operacionais. Essa lógica de busca inteligente orientada por algoritmos genéticos permite explorar amplamente o espaço de soluções, revelando alternativas não óbvias que atendem simultaneamente aos objetivos de desempenho e restrições de custo. Além disso, a construção de fronteiras de Pareto oferece uma base sólida para comparar soluções com diferentes níveis de investimento e efetividade hidráulica, auxiliando a priorização de projetos em cenários com limitações orçamentárias.

A metodologia apresentada é plenamente replicável para outros sistemas de esgotamento sanitário, inclusive em contextos brasileiros, onde os desafios relacionados à sobrecarga hidráulica, alagamentos urbanos e extravasamentos em redes combinadas são recorrentes. A flexibilidade do modelo permite sua aplicação tanto em sistemas existentes, como ferramenta de reabilitação, redimensionamento ou mitigação de falhas, quanto na fase de concepção de novos sistemas, orientando o dimensionamento ótimo das infraestruturas desde o início do planejamento.

Além disso, a abordagem pode ser estendida a outros tipos de problemas típicos de sistemas de esgoto, como a localização ótima de estações elevatórias, definição de rotas de interceptores, análise de soluções descentralizadas, ou até mesmo integração com estratégias de drenagem urbana sustentável e infraestrutura verde.

No cenário atual, em que a eficiência no uso de recursos públicos e a resiliência dos sistemas urbanos são cada vez mais exigidas, a incorporação de ferramentas de otimização baseadas em inteligência artificial, representa um avanço significativo no planejamento e na gestão de sistemas de saneamento. Sua aplicação sistemática pode contribuir para a universalização do serviço, a redução de impactos ambientais e a melhoria da qualidade de vida das populações urbanas, especialmente em áreas mais vulneráveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AFSHAR, M. H., AFSHAR, A., MARINO, M. A., DARBANDI, A. A. 2006 *Hydrograph-based storm sewer design optimization by genetic algorithm*. Canadian Journal of Civil Engineering 33 (3), 319–325.

2. ASSAF, M.N., MANENTI, S., CREACO, E., GIUDICIANNI, C., TAMELLINI, L., TODESCHINI, S. *New optimization strategies for SWMM modeling of stormwater quality applications in urban area*. Journal of Environmental Management, Volume 361, 2024. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121244.

3. GUO, Y., WALTERS, G. A., KHU, S. T., KEEDWELL, E. 2006 *Optimal design of sewer networks using hybrid cellular automata and genetic algorithm*. Proceedings of the 5th IWA WorldWater Congress, London. IWA Publishing, London.

4. LIANG, L. Y., THOMPSON, R. G., YOUNG, D. M. 2004 *Optimising the design of sewer networks using genetic algorithms and Tabu search*. Engineering, Construction, and Architectural Management 11 (2), 101–112. DOI: 10.1108/09699980410527849.

5. 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.

6. OWOLABI, T.A., MOHANDES, S.R., ZAYED, T. *Investigating the impact of sewer overflow on the environment: A comprehensive literature review paper*. Journal of Environmental Management, Volume 301, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113810.

7. 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.

8. 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.

9. 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).

10. UNITED STATES CENSUS BUREAU. *QuickFacts: Dearborn city, Michigan*. Disponível em: https://www.census.gov/quickfacts/fact/table/dearborncitymichigan/PST045224. Acesso em: Maio de. 2025.

11. WALTERS, G. A., LOHBECK, T. 1993 *Optimal layout of tree networks using genetic algorithms*. Engineering Optimization 22 (1), 27–48.

12. WALTERS, G. A., SMITH, D. K. 1995 *Evolutionary design algorithm for optimal layout of tree networks*. Engineering Optimization 24 (4), 261–281.

13. ZEDA, Y., SAADATI, Y., LEON, A.S., AMINI, M.H., BIAN, L. *Forecasting and optimization for minimizing combined sewer overflows using Machine learning frameworks and its inversion techniques*. Journal of Hydrology, Volume 628, 2024. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130515.