

OTIMIZAÇÃO DE INVESTIMENTOS EM GESTÃO DE ATIVOS DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO O ÍNDICE DE VALOR DA INFRAESTRUTURA

OPTIMIZATION OF INVESTMENTS IN ASSET MANAGEMENT OF WATER SUPPLY SYSTEMS USING THE INFRASTRUCTURE VALUE INDEX

[10.29073/rae.v1i1.647](#)

Receção: 21/06/2022 Aprovação: 10/09/2022 Publicação: 07/01/2023

Hermilio Carneiro Vilarinho Fernandes ^a, Flávia Barbosa ^b, Henriqueta Nóvoa ^c, Jaime Gabriel Silva ^d, Ana S. Camanho ^e

^a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; hermilio.vilarinho@gmail.com; ^b Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; flavia.barbosa@inesctec.pt; ^c Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; hnovoa@fe.up.pt; ^d ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto; jgs@isep.ipp.pt; e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; acamanho@fe.up.pt

RESUMO

A área de conhecimento associada à gestão de ativos potencia a extração de valor de ativos físicos, incorporando uma abordagem integrada que envolve riscos, custos e desempenho. Este trabalho propõe uma abordagem direcionada para selecionar projetos de investimento em infraestruturas no âmbito da gestão de ativos. A métrica padrão utilizada para a seleção de projetos em ativos múltiplos é o Índice de Valor da Infraestrutura (IVI), que tem sido utilizado para caracterizar ativos do setor da água em diversos países. Este trabalho desenvolveu dois modelos de programação linear inteira mista. O primeiro modelo de otimização trata de um problema de alocação de orçamento de capital selecionando projetos de investimento com vista à maximização da condição dos ativos. O segundo modelo de otimização trata de um problema de planeamento de orçamento, visando a minimizar o capital necessário para manter os ativos nas condições desejadas. A aplicação dos modelos é ilustrada por um estudo de caso de uma empresa que opera no setor da água em Portugal, nomeadamente, em uma estação elevatória de um sistema de abastecimento. Os resultados obtidos nos diferentes cenários analisados são discutidos com vista a apoiar o desenho de políticas de gestão de ativos mais eficientes.

Palavras-Chave: Gestão De Ativos, Planeamento de Investimentos, Seleção de Projetos, Indicador de Desempenho, Otimização

ABSTRACT

The field of asset management provides a coordinated effort to extract value from physical assets, incorporating an integrated approach to deal with risks, costs and performance. This paper proposes an oriented approach to selecting infrastructure investment projects in an asset management framework. The standard metric used for project selection with multiple assets is the Infrastructure Value Index (IVI), which has been used to characterize water sector assets in several countries. Two mixed-integer linear programming models are developed in this paper. The first optimization model deals with a capital budget allocation problem that intends to select investment projects that maximize assets' condition. The second optimization model deals with a budget planning problem aiming at minimizing the capital required to maintain the assets in the desired condition. The application of the models is illustrated by a case study of a company operating in the water sector in Portugal, namely in a pumping station from a water supply system. The results obtained in the different scenarios analysed are discussed with a view to supporting the design of more efficient asset management policies.

Keywords: Asset Management, Investments Planning, Projects Selection, Performance Indicator, Optimization

1. INTRODUÇÃO

A área de gestão de ativos adota um conceito holístico relacionado com os ativos de infraestruturas, abrangendo estratégia,

segurança, meio ambiente, custo, risco e ciclo de vida. A norma internacional ISO 55000 enfatiza a relevância das decisões de investimento entre os principais desafios das

estratégias de gestão de ativos (ISO, 2014). A forma mais eficaz de investir o orçamento disponível representa uma tarefa crítica para os gestores, motivando o desenvolvimento de ferramentas de decisão para orientar essas escolhas. De forma geral, os problemas de seleção de investimentos em gestão de ativos são classificados de duas formas: alocação de orçamento e planejamento de orçamento. No problema de alocação de orçamento, há um montante de capital disponível para investimento e pretende-se decidir a melhor forma de selecionar os projetos até o limite do capital. Já no problema de planejamento de orçamento, pretende-se atingir uma determinada condição de preservação para os ativos e identificar o capital mínimo necessário para tal (France-Mensah & O'Brien, 2018; Gao et al., 2012).

Este trabalho propõe desenvolver modelos de programação matemática para a seleção de projetos de investimento em sistemas de múltiplos ativos. Um estudo de caso baseado em dados de uma empresa de abastecimento de água do mundo real é discutido. O Índice de Valor da Infraestrutura (IVI), um indicador desenvolvido no setor da água em Portugal que traduz o grau de envelhecimento da infraestrutura (Alegre, 2008), é empregado na formulação dos modelos. Embora o IVI tenha sido proposto para abordar o planejamento de investimentos, este trabalho de investigação é pioneiro na integração do IVI num modelo de otimização para selecionar um portfólio de projetos eficiente num contexto de gestão de ativos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os sistemas de abastecimento de água são projetados para longas vidas funcionais e sofrem deterioração de componentes durante a sua vida útil, o que pode causar interrupções de serviço, exigindo reabilitação contínua (Mazumder et al., 2018). Essas infraestruturas representam exemplos típicos de redes formadas por múltiplos ativos que necessitam de investimentos de capital significativos para manter o seu desempenho e qualidade de serviço nos níveis requeridos. Os projetos de investimento em sistemas de água são justificados por necessidades de expansão, adaptação a novas exigências por parte dos

consumidores ou da legislação, ou obsolescência de materiais e tecnologias, além da deterioração causada pelo envelhecimento das infraestruturas. Dessa forma, os investimentos em sistemas de água devem ser contínuos, ao longo de todo o ciclo de vida dos ativos.

A maioria das empresas define uma vez por ano um orçamento para projetos de investimento em bens de capital, denominados frequentemente de CAPEX, do inglês “capital expenditure”, e há normalmente mais projetos potenciais a serem implementados do que o capital disponível permite. Esses projetos competem por recursos escassos, tais como pessoas, tempo e financiamentos, pelo que é normalmente necessário um processo de avaliação para definir um plano de projetos CAPEX a serem implementados. A carteira de projetos de uma empresa é normalmente escolhida a partir de um conjunto de potenciais candidatos a projetos, de acordo com seus objetivos e restrições de orçamento e demais recursos (Tavana et al., 2015).

As avaliações de projetos são tradicionalmente realizadas através da aplicação de uma análise do fluxo de caixa descontado, que envolve medidas como o payback, a taxa interna de retorno e o valor presente líquido (VPL). No entanto, segundo Yeo & Qiu (2003), estas abordagens não refletem a realidade dinâmica das empresas. Os estudantes de finanças e gestão aprendem que o VPL deve orientar a seleção de projetos. Na prática, contudo, o processo de tomada de decisão inclui várias variáveis. Os métodos económico-financeiros comuns para seleção de projetos requerem a estimativa de custos e resultados financeiros ou lucros para o projeto em consideração. A avaliação dos custos do projeto pode ser uma tarefa árdua e demorada, especialmente nas suas fases iniciais e as avaliações dos lucros podem ser ainda mais difíceis. O problema é que os projetos que envolvem infraestruturas apoiam indiretamente vários esforços para produzir lucros, mas raramente geram receitas diretas para uma empresa. Portanto, a estimativa dos custos do projeto pode ser quantificável, enquanto o retorno de caixa esperado é muitas vezes imprevisível (Gurgur & Morley, 2008).

Em geral, modelos de decisão mais estruturados para a seleção de investimentos podem apoiar melhor a estratégia da organização ao mesmo tempo que consideram os objetivos, benefícios e restrições locais (Koppinen & Rosqvist, 2010).

Modelos de decisão planejados para seleção de projetos têm sido usados frequentemente na gestão de ativos. O processo de seleção nesse caso torna-se mais preciso, transparente e menos sujeito a conflitos entre as partes interessadas (Kabir et al., 2014). Os modelos matemáticos de otimização têm-se tornado cada vez mais populares em gestão de ativos, podendo lidar com um grande volume de dados de ativos e resolver problemas complexos (Chen & Bai, 2019). A aplicação mais comum desses métodos a infraestruturas de sistemas de água é a seleção de condutas a substituir através da aplicação de métodos heurísticos, tais como algoritmos genéticos (Dandy & Engelhardt, 2001; Dridi et al., 2008; Shin et al., 2016).

Em sistemas formados por múltiplos tipos de ativos, como é o caso dos sistemas de água, o desenvolvimento de modelos de otimização apresenta uma dificuldade adicional pois exige o uso de uma métrica comum para avaliação dos diversos ativos. O Índice de Valor da Infraestruturas (IVI), desenvolvido no setor de águas em Portugal, tem essa característica de poder ser aplicado a variados tipos de ativos. Esse indicador tem sido discutido mundialmente como uma ferramenta para caracterizar infraestruturas de serviços de água e abordar o planejamento de investimentos para mitigar riscos (Alegre, 2008; Alegre & Covas, 2010; Amaral et al., 2016; Vieira, Almeida, et al., 2020; Vieira, Cabral, et al., 2020).

A formulação básica do IVI é expressa como a razão entre o valor atual de uma infraestrutura e seu custo de substituição. O custo de substituição de um ativo é usualmente considerado como o custo que seria pago por um ativo moderno com as mesmas funcionalidades. Já o valor atual de um ativo pode ser estimado como o produto entre a sua vida residual e a sua depreciação. A depreciação do ativo, nesse caso, pode ser estimada de forma linear como a razão entre o

custo de substituição e a vida total útil do ativo. Se considerarmos uma infraestrutura constituída por vários ativos, o valor atual e o custo de substituição da infraestrutura são obtidos, respetivamente, pela soma dos valores atuais e custos de substituição dos ativos que a compõe. Dessa forma, o IVI da infraestrutura em um período t pode ser obtido pela expressão (1), onde VR_{it} representa a vida residual do ativo i , VU_{it} representa sua vida útil e CS_i representa seu custo de substituição. O Valor N indica o número de ativos que compõem a infraestrutura (Alegre, 2008; Alegre & Covas, 2010).

$$IVI_t = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{VR_{it}}{VU_{it}} \times CS_i}{\sum_{i=1}^N CS_i}$$

O IVI varia de 0 a 1, ou 0% a 100%, onde valores mais elevados significam que a infraestrutura está bem preservada, uma vez que o seu valor atual deve estar próximo do custo esperado de uma infraestrutura moderna equivalente. Por outro lado, a infraestrutura provavelmente está deteriorada se o IVI for baixo, uma vez que, nesse caso, o seu valor atual é pequeno em comparação com o seu custo de substituição. De acordo com Alegre et al. (2014), o IVI de infraestruturas bem conservadas deveria ser de cerca de 50% (40-60%). Os valores mais elevados de IVI estão associados a infraestruturas jovens ou infraestruturas mais antigas recentemente sujeitas a expansão ou reabilitação, e os valores mais baixos resultam de reduzida manutenção ou renovação. Nesse sentido, a aplicação de investimentos de capital a ativos pode aumentar o IVI, e a maximização dos valores do IVI pode ser considerada um objetivo consistente para a gestão de ativos. No entanto, no caso de não haver reabilitação de ativos, o valor atual da infraestrutura diminui com o tempo devido ao envelhecimento, resultando numa queda do IVI. Devem ainda ser evitados investimentos que tornem o IVI demasiadamente alto, para que a prioridade no uso dos recursos seja direcionada para infraestruturas mais depreciadas. Além disso, o IVI demasiado alto deve ser evitado para evitar concentração de investimentos em períodos de tempo curtos. Caso os investimentos se concentrem em períodos muito curtos, e os ativos tiverem a mesma vida

útil expectável, eles também terão de ser substituídos numa janela temporal curta. Desta forma, decidir onde e quando investir para atingir níveis elevados ou aceitáveis de IVI representa um problema de gestão relevante.

Novas formulações para o IVI de longo prazo, considerando o efeito dos investimentos de capital, foram propostas por Vieira, Cabral, et al. (2020), mas a seleção de portfólios ótimos de projetos não foi explorada. A estimação da forma como os projetos de capital impactam as condições dos ativos no setor da água é um tema raramente discutido na literatura. O IVI é uma métrica que pode apoiar a atribuição de prioridades de investimento, uma vez que os projetos de infraestrutura são frequentemente realizados para prolongar a vida útil dos ativos, modificando o IVI. Além disso, como a formulação IVI requer apenas a estimativa da vida útil dos ativos e custos de reposição, ela pode ser aplicada a uma ampla gama de classes de ativos em diferentes setores.

O IVI é uma métrica simples e de fácil comunicação, porém não leva em conta outros aspetos úteis na seleção de projetos, como a condição funcional do ativo, o seu estado estrutural, o desempenho hidráulico, ambiental ou de satisfação do cliente. No entanto, apesar dessas limitações, o IVI tem potencial para identificar investimentos de forma global e generalizada, fornecendo orientações para os gestores que podem ser complementadas por análises mais detalhadas.

3. METODOLOGIA E MÉTODOS

3.1 QUESTÕES DE PESQUISA

A metodologia utilizada neste estudo de caso envolve o desenvolvimento de dois modelos de otimização que são concebidos para responder às questões de pesquisa seguintes:

Q1 - Como determinar um plano de projetos de investimentos em ativos para maximizar o IVI global de uma infraestrutura considerando o montante de capital disponível?

Q2 - Como definir um plano de investimento para manter o IVI de uma infraestrutura dentro dos limites recomendados durante todo o período, minimizando o montante de capital

necessário para os projetos de investimento em ativos?

A questão de pesquisa Q1 representa um problema de alocação de orçamento, enquanto a questão de pesquisa Q2 caracteriza um problema de planeamento de orçamento.

3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O IVI, CONSIDERANDO A EXECUÇÃO DE PROJETOS

Para desenvolver os modelos de otimização, é necessário expressar o IVI durante o tempo previsto para a execução do plano de projetos, tendo em conta os efeitos que as execuções dos projetos de investimento causam sobre o valor do indicador. Para isso deve-se estimar que aumento de vida residual (Δ_{ip}) pode ser esperado em um ativo i após a execução de um projeto de investimento p .

Em seguida, expressões para a vida residual e vida útil dos ativos para todos os anos são desenvolvidas considerando o efeito dos aumentos de vida residual e, consequentemente, dos aumentos de vida útil. As expressões (2) e (3) revelam a vida residual de um ativo e sua vida útil respetivamente. Nessas expressões são introduzidas as variáveis binárias x_{ipt} , que podem assumir o valor 1, se o projeto p do ativo i é selecionado para o ano t , ou o valor 0 em caso contrário. Considera-se, nesse caso, que as vidas residuais de cada ativo no ano presente (VR_{i0}) são conhecidas, assim como a idade dos ativos no mesmo ano (age_{i0}).

$$VR_{it} = VR_{i0} - t + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^P \Delta_{ip} x_{ipt} \quad (2)$$

$$VU_{it} = VR_{i0} + age_{i0} + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^P \Delta_{ip} x_{ipt} \quad (3)$$

Para calcular o IVI de um ativo individualmente, a expressão (1) pode ser simplificada para (4), considerando $N=1$.

$$IVI_i = \frac{VR_{it}}{VU_{it}} = \frac{VR_{i0} - t + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^P \Delta_{ip} x_{ipt}}{VR_{i0} + age_{i0} + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^P \Delta_{ip} x_{ipt}} \quad (4)$$

Substituindo a razão entre VR_{it} e VU_{it} na expressão (1), chegamos à formulação do IVI, indicada em (5), de uma infraestrutura composta de múltiplos (N) ativos em função da execução de projetos de investimentos, representada pelas variáveis binárias x_{ipt} .

$$IVI_t = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{VR_{i0} - t + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^P \Delta_{ip} x_{ipt}}{VR_{i0} + age_{i0} + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^P \Delta_{ip} x_{ipt}} \times CS_i}{\sum_{i=1}^N CS_i} \quad (5)$$

A partir desta equação principal é possível desenvolver modelos de otimização, que, neste caso, envolvem variáveis inteiras e não-inteiras, sendo, portanto, caracterizados como modelos de programação linear inteira mista.

3.3. MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA ALOCAÇÃO DE ORÇAMENTO: MAXIMIZAÇÃO DO IVI

O modelo de otimização para alocação de orçamento (modelo 1) tem por objetivo maximizar a soma dos valores de IVI anuais para a infraestrutura para todos os anos do plano de investimentos. Esse objetivo é, assim, expresso pela soma dos valores da expressão (5) para todos os anos previstos no plano de investimentos.

As variáveis de decisão do modelo são as variáveis binárias x_{ipt} . Elas determinam, após encontrada a solução ótima, que projetos p serão executados em cada ativo i e em cada período t .

São adicionadas restrições ao modelo para assegurar que os resultados estejam de acordo com os objetivos pretendidos. No caso do modelo 1, a principal restrição deve limitar o investimento total utilizado nos projetos à disponibilidade de capital da empresa. Dessa forma, para cada projeto candidato, deve ser estimado o capital necessário para sua execução ($CapEx_{ip}$). A restrição de disponibilidade de capital é expressa em (6), onde OT indica o orçamento total disponível na empresa.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P CapEx_{ip} \times x_{ipt} \leq OT \quad (6)$$

Restrições adicionais são também incluídas para assegurar que cada projeto seja executado apenas uma vez em todo o período, para balancear o capital investido ao longo do período e para estabelecer um limite superior do IVI em todos os anos. Uma restrição específica é incluída para permitir que um projeto possa incluir múltiplos ativos. A formulação completa do modelo 1 é exibida no Anexo A.1.

3.4. MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA PLANEAMENTO DE ORÇAMENTO: MINIMIZAÇÃO DOS INVESTIMENTOS NECESSÁRIOS

No modelo de otimização para planeamento de orçamento (modelo 2), o objetivo é minimizar a soma dos investimentos anuais em ativos no período considerado. A função objetivo, nesse caso, envolve a minimização da soma do capital utilizado em projetos de investimento em todos os anos, indicada em (7).

$$CapEx^{TOTAL} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P CapEx_{ip} \times x_{ipt} \quad (7)$$

Nesse caso, as principais restrições devem limitar o IVI à faixa de valores desejada. São então adicionadas ao modelo duas restrições a partir da expressão (5), estabelecendo os limites inferior (LI) e superior (LS) do IVI em todos os anos.

$$IVI_t \geq LI \quad (8)$$

$$IVI_t \leq LS \quad (9)$$

A própria expressão (5) deve ser incluída como uma restrição, e além disso, restrições adicionais limitam a execução de um projeto em apenas uma vez e estabelecem a possibilidade de um projeto incluir múltiplos ativos. A formulação completa do modelo 2 é exibida no Anexo A.2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo de caso considerado envolve a Estação de Bombeamento Jovim, composta

de 21 ativos, pertencente à companhia Águas do Douro e Paiva (AdDP), responsável pela extração, tratamento e abastecimento na região do Porto em Portugal. A estrutura de classificação de ativos da empresa inclui no caso da Estação de Bombeamento Jovim, ativos como, por exemplo, grupos de bombagem, tanques de armazenamento, painéis elétricos, grupos geradores e salas elétricas,

Considera-se que a companhia possui uma verba de 665.000€ para investir em ativos nessa infraestrutura nos próximos 5 anos. Para esse período de 5 anos, considerando a condição atual e a vida residual dos ativos, a empresa tem condições de estabelecer uma lista de possíveis projetos que podem ser selecionados para execução. No estudo de caso considerado, a empresa pré-selecionou 42 projetos potenciais, ou ideias de projetos, para seleção e execução durante o período considerado. Para o modelo de otimização 2, considera-se que a empresa deseja que o IVI da infraestrutura permaneça entre 40% e 60% durante todos os anos do período indicado. A partir do grupo pré-escolhido de 42 projetos, os modelos de otimização 1 e 2 apresentam como resultado um subgrupo de projetos selecionados para execução no período considerado. Essa seleção representa a condição ótima que permite que a empresa atinja os objetivos dos modelos 1 e 2. Certamente, após esse período de 5 anos, novos investimentos terão que ocorrer para manter o IVI nos níveis desejados e, o método de seleção desses novos projetos pode ser realizado novamente, tendo em conta a condição atualizada e mais precisa dos ativos. São estimadas para cada ativo a vida residual (VRi0) e a vida útil (VUi0) no ano que precede o plano de investimentos (ano zero), além da idade dos ativos no mesmo ano (agei0). A vida útil (VUi0) dos ativos foi definida a partir das recomendações da entidade reguladora para o setor da água em Portugal, a Entidade

Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos (ERSAR) (Alegre & Covas, 2010). As vidas residuais dos ativos foram definidas, considerando o estado de conservação e a idade dos ativos a partir de procedimentos internos da empresa.

Entre os 42 possíveis projetos de investimentos em ativos, foram incluídos dois candidatos à execução em cada um dos 21 ativos da Estação de Bombeamento Jovim. Para todos os projetos é estimado quanto seria a extensão da vida residual do ativo correspondente após a execução do projeto (Δ_{ip}) e o custo do projeto (CapExip).

Ambos os modelos foram resolvidos utilizando o software IBM ILOG CPLEX versão 20.1.0.0.

Como resultado, o modelo de otimização para alocação de orçamento (modelo 1) gera um plano otimizado que inclui 23 projetos selecionados, do total de 42 projetos potenciais, e representa o portfólio que maximiza o IVI da infraestrutura durante o período de planeamento utilizando o capital disponível. O plano apresenta uma forma eficiente de aplicação do capital, com o objetivo de elevar o IVI da infraestrutura.

Um total de 15 projetos selecionados a partir dos 42 projetos foram incluídos no plano gerado no modelo de otimização para planeamento de orçamento (modelo 2). De acordo com este plano, é possível estimar o capital mínimo necessário para manter o IVI da infraestrutura dentro dos limites desejados, acima de 40% e abaixo de 60%, ao longo de todo o horizonte de planeamento. Os resultados do plano gerado no modelo para planeamento de orçamento mostram que é possível economizar 26,5% do capital disponível e ainda manter o IVI global dentro da faixa desejada. O número de projetos selecionados para cada ano e o orçamento resultante estão detalhados na Tabela 1.

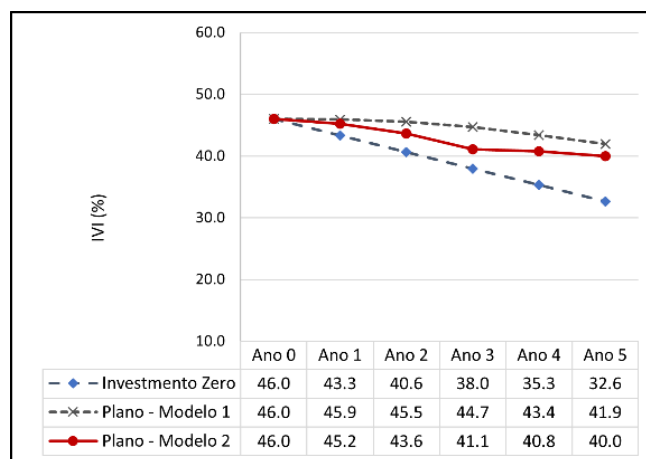
Tabela 1 – Planos de Projetos gerados pelos modelos de otimização

Plano Ótimo para alocação de orçamento (Modelo 1)			Plano Ótimo para planejamento de orçamento (Modelo 2)	
Ano	Projetos (No.)	Orçamento (€)	Projetos (No.)	Orçamento (€)
t_1	6	193.594	6	150.531
t_2	3	157.863	4	72.000
t_3	6	126.531	0	0
t_4	3	103.062	3	158.925
t_5	5	82.701	2	107.063
Total	23	663.751	15	488.519

Os projetos selecionados indicados na Tabela 1 resultam dos modelos de otimização 1 e 2 e representam as condições ótimas em que os objetivos de cada um dos modelos são atingidos e todas as restrições consideradas são satisfeitas. Isso significa que a escolha de planos de projetos diferentes dos listados na Tabela 1 resultariam em níveis de IVI mais baixos no modelo 1 e orçamento total mais alto no modelo 2.

Os valores de IVI anuais para a infraestrutura geral são apresentados na Figura 1, que compara os resultados dos planos gerados

pelos dois modelos de otimização e inclui ainda uma condição em que nenhum investimento é realizado ao longo de todo o período de 5 anos. O gráfico da Figura 1 mostra que os investimentos são cruciais para manter o IVI em níveis aceitáveis. Se nenhum investimento for realizado, a deterioração dos ativos reduzirá o IVI. Pode-se notar também que o plano gerado pelo modelo para alocação de orçamento (modelo 1), com maior quantidade de capital investido em projetos de ativos, consegue manter o IVI em patamares superiores ao plano resultante do modelo para planejamento de orçamento (modelo 2).

Figura 1 - IVI global em cenários diversos


5. CONCLUSÕES

Este trabalho forneceu uma nova abordagem para selecionar iniciativas de investimento de capital para a gestão de ativos em sistemas de múltiplos ativos, usando o Índice de Valor de Infraestruturas.

Estudos anteriores avaliaram o efeito de projetos de investimento no Índice de Valor de Infraestruturas, mas não consideraram a possibilidade de melhorá-lo por meio de uma

melhor alocação de capital. Essa metodologia pode ser generalizada para outros setores onde as ferramentas de tomada de decisão são importantes para apoiar a gestão de ativos.

Desenvolvimentos futuros podem considerar novos objetivos de otimização além dos refletidos nos modelos atuais, além de uma análise mais abrangente dos riscos para os

ativos, sem estar limitada aos riscos inerentes à deterioração das infraestruturas.

REFERÊNCIAS

- Alegre, H. (2008). Gestão patrimonial de infraestruturas de abastecimento de água e de drenagem e tratamento de águas residuais. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Alegre, H., & Covas, D. (2010). Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água. Uma abordagem centrada na reabilitação. *Série Guias Técnicos No 16*, 510. https://poseur.portugal2020.pt/media/4039/guia_tecnico_16.pdf
- Alegre, H., Vitorino, D., & Coelho, S. (2014). Infrastructure value index: A powerful modelling tool for combined long-term planning of linear and vertical assets. *Procedia Engineering*, 89, 1428–1436. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.469>
- Amaral, R., Alegre, H., & Matos, J. S. (2016). A service-oriented approach to assessing the infrastructure value index. *Water Science and Technology*, 74(2), 542–548. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.250>
- Chen, L., & Bai, Q. (2019). Optimization in decision making in infrastructure asset management: A review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/app9071380>
- Dandy, G. C., & Engelhardt, M. O. (2001). Optimal scheduling of water pipe replacement using genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(4), 214–223.
- Dridi, L., Parizeau, M., Mailhot, A., & Villeneuve, J. P. (2008). Using evolutionary optimization techniques for scheduling water pipe renewal considering a short planning horizon. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(8), 625–635. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00564.x>
- France-Mensah, J., & O'Brien, W. J. (2018). Budget Allocation Models for Pavement Maintenance and Rehabilitation: Comparative Case Study. *Journal of Management in Engineering*, 34(2), 05018002. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000599](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000599)
- Gao, L., Xie, C., Zhang, Z., & Waller, S. T. (2012). Network-Level Road Pavement Maintenance and Rehabilitation Scheduling for Optimal Performance Improvement and Budget Utilization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(4), 278–287. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2011.00733.x>
- Gurgur, C. Z., & Morley, C. T. (2008). Lockheed Martin Space Systems Company optimizes infrastructure project-portfolio selection. *Interfaces*, 38(4), 251–262. <https://doi.org/10.1287/inte.1080.0378>
- ISO. (2014). ISO 55000:2014 . Asset management — Overview, principles and terminology. In *International Organization for Standardization (Vol. 1, Issue March, p. 25)*.
- Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2014). A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. In *Structure and Infrastructure Engineering (Vol. 10, Issue 9, pp. 1176–1210)*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.795978>
- Koppinen, T., & Rosqvist, T. (2010). Dynamic Project Portfolio Selection in infrastructure sector. *Engineering Asset Management Review*, 1, 311–326. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-178-3_16
- Mazumder, R. K., Salman, A. M., Li, Y., & Yu, X. (2018). Performance Evaluation of Water Distribution Systems and Asset Management. *Journal of Infrastructure Systems*, 24(3), 24. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000426](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000426)
- Shin, H., Joo, C., & Koo, J. (2016). Optimal Rehabilitation Model for Water Pipeline Systems with Genetic Algorithm. *Procedia Engineering*, 154, 384–390. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.497>
- Tavana, M., Keramatpour, M., Santos-arteaga, F. J., & Ghorbaniane, E. (2015). A fuzzy hybrid project portfolio selection method using Data Envelopment Analysis , TOPSIS and Integer

Programming. 42, 8432–8444.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.06.057>

Vieira, J., Almeida, N., Silva, J. G., Castro, C., Lima, B., & Trindade, M. (2020). Using Indicators to Deal with Uncertainty in the Capital Renewals Planning of an Industrial Water Supply System: Testing the Infrastructure Value Index. In *Engineering Assets and Public Infrastructures in the Age of Digitalization* (Vol. 2, pp. 226–237). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-48021-9_26

Vieira, J., Cabral, M., Almeida, N., Silva, J. G., & Covas, D. (2020). Novel methodology for efficiency-based long-term investment planning in water infrastructures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(12), 1654–1668.

<https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1722715>

Yeo, K. T., & Qiu, F. (2003). The value of management flexibility-a real option approach to investment evaluation. *International Journal of Project Management*, 21(4), 243–250.
[https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00025-X)

ANEXOS

Anexo A.1. Modelo de Otimização para alocação de orçamento (modelo 1): Formulação

Maximizar $\sum_{t=1}^T IVI_t$

Sujeita a:

$$IVI_t = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{VR_{i0} - t + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^P \Delta_{ip} x_{ipt}}{VR_{i0} + age_{i0} + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^P \Delta_{ip} x_{ipt}} \times CS_i}{\sum_{i=1}^N CS_i}, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\}, \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P CapEx_{ip} \times x_{ipt} \leq OT$$

$$\sum_{t=1}^T x_{ipt}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \forall p \in \{1, 2, \dots, P\}$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P CapEx_{ip} \times x_{ip(t+1)} \leq (1+\alpha) \times \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P CapEx_{ip} \times x_{ipt}, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T-1\}$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P CapEx_{ip} \times x_{ip(t+1)} \geq (1-\alpha) \times \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P CapEx_{ip} \times x_{ipt}, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T-1\}$$

$$IVI_t \leq LS, \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

$$\sum_{i,p \in C_k} x_{ipt} \geq |C_k| - M \times (1 - w_{kt}), \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

$$\sum_{i,p \in C_k} x_{ipt} \leq M \times w_{kt}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

Obs.: Além das variáveis já introduzidas no texto, aparecem na formulação do Modelo, as seguintes variáveis:

α , percentual de variação de gastos de capital entre dois períodos consecutivos. Usado para balancear o fluxo de capital no plano de projetos.

C_k , conjunto de projetos que devem ser executados e gerenciados como um projeto único, logo as variáveis x_{ipt} relacionadas a esses projetos devem ser todas as iguais a 1 ou todas iguais a 0, significando que ou os projetos são selecionados juntos ou não são selecionados.

w_{kt} , variável binária auxiliar que indica que o conjunto C_k foi selecionado se é igual a 1 ou não foi selecionado, se é igual a 0.

M , número inteiro de grande magnitude.

Anexo A.2. Modelo de Otimização para planejamento de orçamento (modelo 2): Formulação

$$\text{Minimizar } CapEx^{TOTAL} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P CapEx_{ip} \times x_{ipt}$$

Sujeita a:

$$IVI_t = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{VR_{i0} - t + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^P \Delta_{ip} x_{ipt}}{VR_{i0} + age_{i0} + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^P \Delta_{ip} x_{ipt}} \times CS_i}{\sum_{i=1}^N CS_i}, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\}, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

$$\sum_{t=1}^T x_{ipt}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\}$$

$$IVI_t \leq LS, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

$$IVI_t \geq LI, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

$$\sum_{i,p \in C_k} x_{ipt} \geq |C_k| - M \times (1 - w_{kt}), \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

$$\sum_{i,p \in C_k} x_{ipt} \leq M \times w_{kt}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

Obs.: Além das variáveis já introduzidas no texto, aparecem na formulação do Modelo, as seguintes variáveis:

C_k , conjunto de projetos que devem ser executados e gerenciados como um projeto único, logo as variáveis x_{ipt} relacionadas a esses projetos devem ser todas as iguais a 1 ou todas iguais a 0, significando que ou os projetos são selecionados juntos ou não são selecionados.

w_{kt} , variável binária auxiliar que indica que o conjunto C_k foi selecionado se é igual a 1 ou não foi selecionado, se é igual a 0.

M , número inteiro de grande magnitude.

PROCEDIMENTOS ÉTICOS

Conflito de interesses: nada a declarar. **Financiamento:** nada a declarar. **Revisão por pares:** Dupla revisão anônima por pares.



Todo o conteúdo da [Revista de Ativos de Engenharia](#) é licenciado sob **Creative Commons**, a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.