

Modelo de otimização aplicado ao plano de investimentos de um sistema de abastecimento de água

Mariana Ramos Silvério Casalta

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Flávia Barbosa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2021-06-28

À minha tia, à Catarina

Resumo

A Águas do Douro e Paiva, S.A. (AdDP) é um sistema multimunicipal responsável pela captação, tratamento e abastecimento de água do sul do Grande Porto.

Esta organização é constituída por infraestruturas de grandes dimensões, onde foi necessário realizar avultados investimentos para a sua construção. No entanto, com o passar do tempo e com o seu uso regular, estas começam a apresentar sinais de envelhecimento. Desta forma, torna-se necessário realizar investimentos de reabilitação, substituição e modernização, a fim de proporcionar um serviço de qualidade aos seus clientes.

Neste sentido, é crucial tomar decisões fundamentadas no momento da concretização, ou não, dos investimentos em prol de uma adequada gestão de ativos. Por conseguinte, o objetivo deste trabalho é criar uma ferramenta de otimização aplicada ao plano de investimentos da AdDP, através de um modelo de programação linear binário, com o intuito de avaliar todas as propostas de investimento com critérios claros e a vários níveis, nomeadamente: estratégico, técnico, económico, político, social e ambiental.

Numa primeira abordagem, será analisado o plano de investimentos atual da AdDP, onde se divide os investimentos em dois grandes grupos: investimentos tecnológicos e investimentos em ativos, pertencentes a um dos cinco grupos de infraestruturas da AdDP: estações elevatórias, estações de tratamento de água, condutas, reservatórios e captações.

O modelo de otimização proposto tem como principal objetivo maximizar a criação de valor para a empresa, indicando quais os investimentos que devem ser realizados no horizonte de planeamento considerado e qual o momento mais adequado para os concretizar. O horizonte de planeamento dos investimentos adotado será de cinco anos, ou seja, de 2022 a 2026.

Cada proposta de investimento está associada a um ativo e apresenta uma determinada classificação do valor que irá criar para a empresa com a sua realização. Esta classificação do valor tem igualmente em consideração o estado atual do ativo, bem como as vantagens que pode motivar com a sua concretização. Para além disso, esta metodologia considera diversas restrições que visam ir ao encontro da missão da AdDP, quer a nível económico, como funcional. Adicionalmente, será tido em conta os investimentos de carácter obrigatório, ou seja, que constituem uma obrigação legal para a empresa ou devido ao seu contrato de concessão.

A metodologia de otimização desenvolvida será implementada com recurso ao software CPLEX, e verificar-se-á que cumpre com o principal objetivo, isto é, maximiza o plano de investimentos da empresa. Através da implementação deste modelo, será verificada uma redução considerável do orçamento necessário, para criar o mesmo valor que o plano de investimentos atual da AdDP cria, caso seja cumprido.

Além do mais, será analisada a influência que este modelo apresenta face aos dois grupos de investimentos individualmente, ou seja, ao conjunto de investimentos em ativos e ao conjunto de investimentos tecnológicos. Adicionalmente, consoante o conjunto de dados em questão, serão considerados diferentes cenários a fim de analisar a sensibilidade deste modelo.

Optimization model applied to the investment plan of a water supply system

Abstract

Águas do Douro e Paiva, S.A. (AdDP) is a multi-municipal system responsible for collecting, treating, and supplying water in southern Greater Porto.

This organization consists of large-scale infrastructure, where it was necessary to make extensive investments for its construction. However, as time goes by and with regular use, they begin to show signs of aging. In this way, it becomes necessary to make investments in rehabilitation, replacement and modernization, to provide a quality service to its clients.

In this sense, it is crucial to make informed decisions when making investments in favor of adequate asset management. Therefore, this work aims to create an optimization tool applied to AdDP's investment plan, through a linear programming model, in order to evaluate all investment proposals with clear criteria and at various levels, including: strategic, technical, economic, political, social, and environmental.

In a first approach, AdDP's current investment plan will be analyzed. The investments are divided into two large groups: technological investments and investments in assets, belonging to one of AdDP's five infrastructure groups: pumping stations, water treatment stations, pipelines, reservoirs, and catchments.

The main goal of the proposed optimization model is to maximize value creation for the company, indicating which investments should be made in the planning horizon considered and the most appropriate moment to make them. The investment planning horizon adopted will be five years, from 2022 to 2026.

Each investment proposal is associated with an asset and presents a particular classification of the value it will create for the organization with its realization. This value classification also considers the current state of the asset and the advantages that it can motivate with its materialization. Besides this, this methodology considers several restrictions that aim to meet AdDP's mission, both economically and functionally. Additionally, mandatory investments will be taken into account, i.e., those that are a legal obligation for the company or due to its concession contract.

The optimization methodology developed will be implemented using the CPLEX software, and it will be verified that it meets the main objective, i.e., maximizes the company's investment plan. A meaningful reduction in the budget needed to create the same value that AdDP's current investment plan creates if adhered to will be verified by executing this model.

Furthermore, the influence of this model will be analyzed for the two groups of investments individually, that is, the set of asset investments and the set of technology investments. Additionally, depending on the dataset in question, different scenarios will be considered to analyze the sensitivity of this model.

Agradecimentos

Desde já quero deixar uma palavra de apreço a todos os colaboradores da entidade Águas do Douro e Paiva por toda a generosidade e agradecer pela oportunidade que me foi proporcionada.

A elaboração deste trabalho nunca teria sido possível sem o apoio assíduo e incondicional da professora Flávia Barbosa. Agradeço pelo seu voto de confiança, dedicação e por todas as suas orientações que foram cruciais ao longo de todo o projeto.

A execução deste trabalho só foi conseguida com todo o apoio prestado pela Engenheira Lúcia Ramos, pela forma como me integrou na empresa, por toda a sua disponibilidade, pela partilha constante de conhecimentos e pela autonomia que sempre me concedeu no desenvolvimento deste projeto.

Agradeço também ao Engenheiro Gabriel Silva e ao Engenheiro José Rego Costa por todas as suas contribuições que gentilmente partilharam comigo e pela constante disponibilidade em ajudar.

Não posso deixar de agradecer a toda a minha família, principalmente aos meus pais e às minhas irmãs, pelo apoio incondicional e por estarem sempre presentes em todas as fases da minha vida.

Por último, quero deixar um agradecimento muito especial a todos os meus amigos que me acompanharam ao longo destes cinco anos. Por todos os momentos de lazer, pelo apoio e compreensão constante nos momentos mais difíceis, obrigada por terem feito esta caminhada sempre ao meu lado, por me proporcionarem tantos momentos de felicidade e por me ajudarem a tornar numa pessoa cada vez melhor.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Apresentação da Águas do Douro e Paiva, S.A.....	1
1.2	Enquadramento do projeto e motivação	2
1.3	Objetivos do projeto	3
1.4	Método seguido no projeto.....	3
1.5	Estrutura da dissertação	4
2	Enquadramento teórico	5
2.1	Sistema de abastecimento de água	5
2.2	Gestão de ativos	7
2.3	Investimentos	10
2.3.1	Métodos de gestão dos investimentos.....	11
2.4	Modelo de programação linear.....	13
3	Apresentação e contextualização do problema	15
3.1	Estrutura organizacional.....	15
3.2	Direção de Gestão de Ativos e Engenharia	16
3.3	Caracterização do planeamento atual dos investimentos	17
3.3.1	Inspeções	18
3.4	Caso de estudo	19
4	Metodologia.....	21
4.1	Caracterização do valor dos investimentos em ativos	21
4.1.1	Risco.....	22
4.1.2	Vida útil remanescente	23
4.1.3	Histórico de avarias	25
4.1.4	Vantagens.....	25
4.2	Caracterização do valor dos investimentos tecnológicos	26
4.3	Modelo de programação linear binário	27
4.4	Resolução do modelo proposto.....	30
5	Análise dos resultados	31
5.1	Plano de investimentos atual da AdDP	31
5.2	Modelo de otimização	32
5.2.1	Conjunto dos investimentos em ativos e dos investimentos tecnológicos.....	33
5.2.2	Conjunto dos investimentos em ativos.....	36
5.2.3	Conjunto dos investimentos tecnológicos	39
5.3	Síntese dos resultados.....	40
6	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.....	43
	Referências	46
	ANEXO A: Critérios utilizados para determinar o nível de risco das infraestruturas	48

Siglas

AdDP	Águas do Douro e Paiva, S.A.
AdP	Águas de Portugal, S.A.
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
ALARP	<i>As Low As Reasonably Practicable</i>
CBA	<i>Cost-Benefit Analysis</i>
DAF	Direção Administrativa e Financeira
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DMU	<i>Decision-making unit</i>
EE	Estação Elevatória
EPAL	Empresa Portuguesa das Águas Livres
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
ETA	Estação de Tratamento de Águas
EVEF	Estudo de Viabilidade Económica e Financeira
EXP	Direção de Exploração
GA	Departamento de Gestão de Ativos
GAE	Direção de Gestão de Ativos e Engenharia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IVI	<i>Infrastructure Value Index</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MAUT	<i>Multiattribute Utility Theory</i>
MCDA	<i>Multi-criteria decision analysis</i>
NP	Norma Portuguesa
RFA	Relatório e Ficha de Avaliação
SIG	Sistema de Informação Geográfica
STI	Sistemas e Tecnologias de Informação

Índice de Figuras

Figura 1 - Mapa do sistema de abastecimento de água da AdDP	2
Figura 2 - Fases do sistema de abastecimento de água	5
Figura 3 - Captação superficial da ETA de Lever da AdDP	6
Figura 4 - Estação elevatória de Jovim da AdDP	7
Figura 5 - Equilíbrio entre risco, custo e desempenho	8
Figura 6 - Ciclo de vida dos ativos	8
Figura 7 – Relação entre níveis de planeamento, responsáveis e período correspondente	10
Figura 8 - Princípio ALARP	12
Figura 9 - Estrutura organizacional da AdDP	16
Figura 10 - Processos realizados pelo departamento de GAE da AdDP	17
Figura 11 - Escala da classificação do desempenho do ativo	19
Figura 12 - Distribuição anual dos investimentos em ativos e tecnológicos, de acordo com o plano atual da AdDP	20
Figura 13 - Critérios que determinam a classificação do valor dos investimentos em ativos e respetivas ponderações	22
Figura 14 - Matriz de risco adotada para a classificação do risco dos ativos	23
Figura 15 - Critérios que determinam a classificação do valor dos investimentos tecnológicos e respetivas ponderações	26
Figura 16 - Interface do software CPLEX	30
Figura 17 - Valor criado em cada ano do horizonte de planeamento do plano de investimentos atual da AdDP, para cada um dos conjuntos de dados	32
Figura 18 - Relação entre o valor criado para a empresa, devido à realização do conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i), e o orçamento disponível	33
Figura 19 - Resultados da otimização desenvolvida face ao plano atual da AdDP, relativamente ao conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i)	34
Figura 20 - Diferença, expressa em anos, dos resultados obtidos através do modelo de otimização e do plano atual da AdDP, para a totalidade do orçamento P	34
Figura 21 - Diferença, expressa em anos, dos resultados obtidos através do modelo de otimização e do plano atual da AdDP, para 76.6% do orçamento P	35
Figura 22 - Relação entre o valor criado para a empresa, devido à realização do conjunto de investimentos em ativos (ii), e o orçamento disponível	36
Figura 23 - Resultados da otimização desenvolvida face ao plano atual da AdDP, relativamente ao conjunto de investimentos em ativos (ii)	36
Figura 24 - Risco médio anual dos investimentos em ativos ainda não realizados até ao fim de cada ano	38
Figura 25 - Desempenho médio anual dos investimentos em ativos ainda não realizados até ao fim de cada ano	38
Figura 26 - Relação entre o valor criado para a empresa, devido à realização do conjunto de investimentos tecnológicos (iii), e o orçamento disponível	39

Figura 27 - Relação entre o valor criado para a empresa, devido à realização do conjunto de investimentos tecnológicos (iii), e o orçamento disponível, para um menor intervalo de orçamento...	40
Figura 28 - Resultados da otimização desenvolvida face ao plano atual da AdDP, relativamente ao conjunto de investimentos tecnológicos (iii)	40
Figura 29 – Valor criado em cada ano do horizonte de planeamento do modelo de otimização relativamente ao estudo I, para cada um dos conjuntos de dados.....	42

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Distribuição do orçamento pelos setores da AdDP, de acordo com o seu plano atual.....	19
Tabela 2 - Vida útil técnica recomendada para os componentes de um sistema de abastecimento de água, expressa em anos	24
Tabela 3 - Valor criado nos próximos cinco anos por cada um dos conjuntos de dados, segundo o plano de investimentos atual da AdDP	32
Tabela 4 - Resultados obtidos para o conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i)	41
Tabela 5 - Resultados obtidos para o conjunto de investimentos em ativos (ii)	41
Tabela 6 - Resultados obtidos para o conjunto de investimentos tecnológicos (iii)	41
Tabela A1 - Critérios para determinar o nível de risco associado à construção civil das ETA.....	48
Tabela A2 - Critérios para determinar o nível de risco associado aos equipamentos das ETA.....	48
Tabela A3 - Critérios para determinar o nível de risco dos reservatórios	49
Tabela A4 - Critérios para determinar o nível de risco das condutas	50
Tabela A5 - Critérios para determinar o nível de risco associado aos equipamentos das captações e das estações elevatórias	51
Tabela A6 - Critérios para determinar o nível de risco associado à construção civil das captações e das estações elevatórias.....	52

1 Introdução

O presente projeto de dissertação foi desenvolvido no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e realizou-se em ambiente empresarial, na entidade Águas do Douro e Paiva, S.A. (AdDP).

Neste capítulo será realizada uma apresentação da AdDP, o enquadramento do projeto a desenvolver no âmbito da empresa e, posteriormente, serão indicados os principais objetivos deste trabalho. Por fim, apresentar-se-á uma breve descrição da metodologia utilizada e de todo o processo inerente à realização deste projeto, bem como a estrutura do relatório de dissertação.

1.1 Apresentação da Águas do Douro e Paiva, S.A.

A Águas do Douro e Paiva, S.A. é uma das empresas pertencentes ao grupo Águas de Portugal, S.A. (AdP). A AdP foi constituída a 29 de setembro de 1993, como ferramenta empresarial do Estado, para realizar a gestão dos serviços de abastecimento e saneamento de água. Com vista a assegurar a todas as populações a continuidade e qualidade na prestação destes serviços, de caráter público e essencial. (Águas de Portugal, 2015a).

A AdDP foi inicialmente constituída pelo Decreto-Lei n.º 116/95, de 29 de maio. No entanto, no ano de 2015, após a reorganização do grupo AdP, o sistema da AdDP agrega-se com outros sistemas do grupo AdP e passa a constituir a empresa Águas do Norte, S.A. (AdN).

De acordo com o relatório de contas da entidade Águas do Douro e Paiva, S.A. (2019), em 2017 ocorre a cisão da AdN e a AdDP é constituída pelo Decreto-Lei nº16/2017, de 1 de fevereiro, representando uma sociedade anónima de capitais exclusivamente públicos, com um capital social de 20.902.500,0 euros. Deste modo, o Estado Português atribuiu à AdDP a responsabilidade da construção, concessão da exploração e da gestão do sistema multimunicipal de abastecimento de água do sul do Grande Porto, pelo período de vinte anos.

A missão da AdDP baseia-se em “*gerir o sistema de abastecimento de água em alta, garantindo a eficiência, a fiabilidade, a qualidade do serviço, a segurança do produto e o respeito pelos valores sociais e ambientais mais elevados*” e, de forma a evidenciar todo o esforço ecológico a que se dedica, o seu logótipo apresenta três cores diferentes, que demonstram o equilíbrio entre os três elementos naturais: ar, água e terra, que são representados pelas cores azul claro, azul escuro e verde, respetivamente.

Este sistema multimunicipal é responsável pela captação, tratamento e abastecimento de água para consumo público a cerca de 1.7 milhões de habitantes que residem nos vinte municípios acionistas, que detêm na sua totalidade 49% do capital social: Amarante, Arouca, Baião, Castelo de Paiva, Cinfães, Espinho, Felgueiras, Gondomar, Lousada, Maia, Matosinhos, Oliveira de Azeméis, Ovar, Paços de Ferreira, Paredes, Porto, Santa Maria da Feira, São João da Madeira, Valongo e Vila Nova de Gaia. Para além disso, a AdDP também abastece os municípios de Vale de Cambra e Penafiel que apenas são seus clientes. Os restantes 51% pertencem à administração central, através da empresa AdP.

O sistema de produção e de abastecimento de água da AdDP está estruturado em três unidades operacionais e geográficas: Lever, Vale do Sousa e Baixo Tâmega, representados na Figura 1.

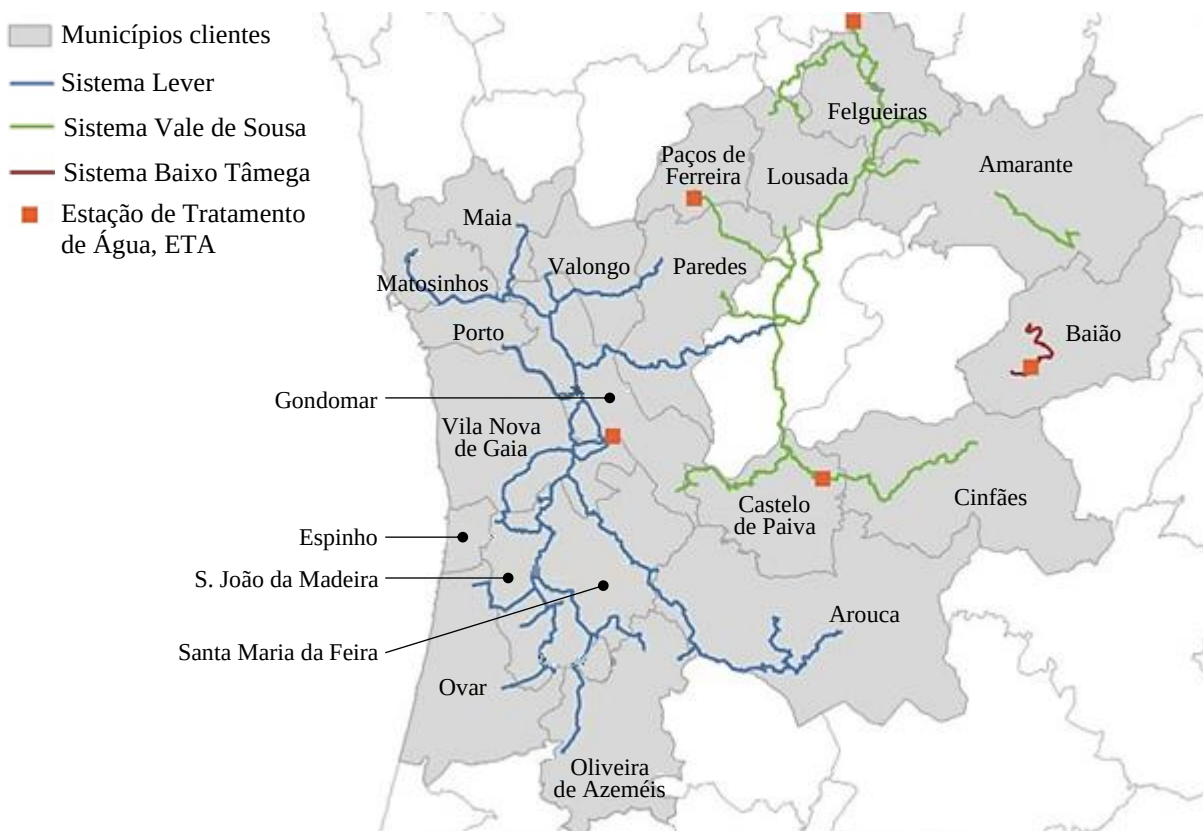


Figura 1 - Mapa do sistema de abastecimento de água da AdDP (adaptado de Águas do Douro e Paiva, 2019)

Com o intuito de cumprir com a missão da AdDP, é fundamental assegurar uma gestão adequada das infraestruturas constituintes da organização. Esta tarefa está ao encargo do departamento de Gestão de Ativos (GA), que é responsável por inventariar todos os ativos, gerir o seu ciclo de vida, realizando avaliações à sua condição, monitorizar e gerir o risco de cada ativo e, por fim, planear intervenções futuras, nomeadamente os investimentos.

1.2 Enquadramento do projeto e motivação

Desde a criação da AdDP, em 1995, foram realizados avultados investimentos na construção de infraestruturas de abastecimento de água. Contudo, com o passar do tempo e com o seu uso diário, estas infraestruturas começam a envelhecer e a apresentar desgastes estruturais e falhas nos seus equipamentos. Consequentemente, surge a necessidade de realizar, de uma forma assídua, grandes investimentos, a fim de conservar todos os seus ativos e, deste modo, responder às necessidades dos seus clientes e proporcionar um serviço de alta qualidade.

Neste sentido, é cada vez mais importante implementar práticas de gestão de ativos, com o intuito de tomar decisões fundamentadas. Desta forma, torna-se fundamental adotar uma ferramenta de otimização aplicada ao plano de investimentos, com o propósito de estabelecer um equilíbrio entre o desempenho, risco e custos de cada um dos ativos pertencentes à AdDP, que retrata um dos principais objetivos da gestão de ativos.

Como tal, este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de otimização do plano de investimentos, segundo vários critérios projetados particularmente para os ativos que constituem esta organização, e insere-se no departamento de Gestão de Ativos da empresa.

Paralelamente à otimização deste plano, tendo em conta a disponibilidade financeira da empresa, é realizada uma priorização dos investimentos.

1.3 Objetivos do projeto

O presente trabalho tem como principal objetivo elaborar um modelo de otimização aplicado ao plano de investimentos no sistema de abastecimento de água da empresa AdDP. Para a realização deste projeto foi fundamental conhecer o ciclo de abastecimento da água, bem como todos os processos inerentes à empresa, em particular ao departamento de gestão de ativos.

Desta forma, um dos principais objetivos consistiu na análise de cada proposta de investimento presente no plano da AdDP, com o intuito de maximizar a criação de valor para a empresa, resultante da concretização dos investimentos.

Numa primeira fase, foi necessário compilar todas as informações já existentes em arquivo, relativas a cada um dos ativos da organização tais como: risco de falha, desempenho, ano de construção e/ou reabilitação, consumos energéticos, entre outros. De seguida, as várias propostas de investimento, cada uma associada a um determinado ativo e proveniente de diferentes departamentos da AdDP, foram avaliadas a fim de determinar as que serão concretizadas pela empresa.

Com a implementação desta metodologia, tornou-se possível estabelecer um melhor processo de tomada de decisão, melhorar a gestão do orçamento disponível pela empresa, realocar os investimentos aos ativos e determinar o momento mais adequado para os realizar. Para além de se cumprir com o principal objetivo de maximizar o valor criado a partir dos ativos intervencionados pelo plano de investimentos, concretizam-se muitos outros inerentes: garantir o desempenho adequado dos ativos, aumentar a sua vida útil remanescente e gerir o seu risco de falha. Estes objetivos conduzem à sustentabilidade dos serviços de abastecimento e de tratamento de água e à melhoria da gestão do ciclo de vida dos ativos.

1.4 Método seguido no projeto

Este projeto iniciou-se com uma fase de integração na AdDP, que permitiu conhecer a estrutura organizacional da empresa, bem como os vários processos que desempenha, ou seja, captação, tratamento e abastecimento de água. Seguidamente, contextualizou-se o projeto a desenvolver no âmbito da empresa e definiu-se o objetivo do departamento de gestão de ativos.

A abordagem do projeto começou pela identificação do problema existente na empresa e pela análise do seu estado atual no que respeita à elaboração do plano de investimentos. Desta forma, procedeu-se ao levantamento de todos os dados arquivados pela empresa referentes ao estado atual dos ativos, tais como: risco de falha, desempenho, registo de avarias, consumos energéticos e ano de construção e/ou reabilitação.

Numa fase posterior, determinou-se o tipo de metodologia de otimização a desenvolver, tendo-se optado por implementar um modelo de programação linear binário. Por conseguinte, com base nos objetivos da empresa mencionados na secção 1.3 e após analisar as propostas de investimento existentes no plano atual da AdDP, definiu-se os critérios que devem ser tidos em conta antes de se tomar a decisão de investir, ou não, numa determinada proposta.

Deste modo, foram estabelecidas algumas condições necessárias cumprir, com o objetivo de ir ao encontro dos princípios da empresa e, assim, garantir um serviço de qualidade aos seus acionistas e clientes. Estas condições consistem, por exemplo, em assegurar um baixo risco de falha dos ativos, um desempenho adequado e, consequentemente, um reduzido número de avarias futuras. De realçar que, no desenvolvimento desta metodologia, para além de se ter em

conta o estado atual dos ativos, também se valoriza todas as vantagens que a concretização de um investimento pode motivar, quer a nível económico, funcional e ambiental.

De seguida, o modelo de otimização desenvolvido foi testado para o caso em particular do plano de investimentos atual da AdDP. Os resultados obtidos foram discutidos com o departamento de gestão de ativos, bem como com colaboradores de outros departamentos da empresa. Posto isto, foram realizados alguns ajustes ao modelo, de forma a ir ao encontro das necessidades e motivações de todas as áreas da empresa.

Por último, esta metodologia foi aplicada para diferentes conjuntos de dados e variou-se algumas condições, quer a nível do orçamento disponível pela organização, como a nível do risco e do desempenho dos ativos, a fim de avaliar a sensibilidade do problema face aos dados da empresa, o que permitiu obter diversas conclusões.

1.5 Estrutura da dissertação

O presente projeto está organizado em seis capítulos que descrevem todo o processo inerente ao desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 2 são apresentadas as bases teóricas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são descritas todas as fases de um sistema de abastecimento de água e de seguida, aborda-se o conceito de gestão de ativos e a sua importância. Para além disso, são definidas as várias tipologias de investimentos, bem como alguns métodos utilizados no setor da água, para gerir os planos de investimento. Por último, são referidas as principais características de um modelo de programação linear, que corresponde à metodologia de otimização adotada neste trabalho.

No Capítulo 3 é indicada a estrutura organizacional da AdDP e as diversas funções que estão ao encargo do departamento de gestão de ativos da empresa. Além do mais, é relatado o estado atual da empresa relativamente à elaboração do plano de investimentos e é feita uma análise ao plano de investimentos atual da AdDP.

No Capítulo 4 é apresentada a ferramenta de otimização desenvolvida, que consiste num modelo de programação linear binário. Ao longo deste capítulo são apresentados os vários critérios utilizados para classificar o valor de cada proposta de investimento e, posteriormente, são indicadas todas as restrições que esta metodologia apresenta. Por fim, é abordado o software utilizado para a implementação deste problema.

No Capítulo 5 são realizadas três análises diferentes ao modelo de otimização desenvolvido, ou seja, este modelo foi utilizado para três conjuntos de dados diferentes e foram alteradas várias condições do problema, a fim de analisar a sensibilidade do modelo de otimização. Por conseguinte, foram detalhadas todas as respostas obtidas com a implementação do modelo de otimização. Estes valores foram comparados aos resultados atingidos caso se cumprisse com o plano de investimentos atual da AdDP.

Por fim, no Capítulo 6, são descritas as principais conclusões e algumas perspetivas de trabalhos futuros de melhoria.

2 Enquadramento teórico

Neste capítulo será realizado um enquadramento teórico que aborda vários conceitos relevantes para o desenvolvimento deste projeto, nomeadamente o funcionamento de um sistema de abastecimento de água, a importância da gestão de ativos, as diversas tipologias de investimento e alguns métodos utilizados no setor da água na gestão e, consequentemente, na priorização dos investimentos. Por último, são apresentadas as principais características do modelo de programação linear, que consiste no método de otimização adotado neste trabalho.

2.1 Sistema de abastecimento de água

Um sistema de abastecimento de água é constituído por um conjunto de infraestruturas, equipamentos e serviços, que asseguram a distribuição de água a várias populações, garantindo sempre a sua continuidade, qualidade e quantidade necessárias. As atividades de abastecimento são fundamentais para o bem-estar geral e segurança das populações, a saúde pública, as atividades económicas e a proteção do ambiente. Desta forma, as entidades gestoras responsáveis pelos sistemas de abastecimento de água procuram que os seus processos sejam o mais eficientes possível (ERSAR, 2020).

Segundo o guia técnico 22 da Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, ERSAR, e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC (2021), o sistema de abastecimento de água pode ser dividido em dois tipos: sistema “em alta” e sistema “em baixa”. O sistema “em alta”, também conhecido como multimunicipal, consiste no conjunto de infraestruturas utilizadas nas fases de captação, tratamento, elevação, adução e armazenamento da água, que fazem a ligação desde a captação até aos sistemas “em baixa”. Por sua vez, o sistema “em baixa” por vezes chamado de municipal, é responsável pela distribuição da água tratada aos consumidores finais. Estes sistemas são compostos por condutas e os respetivos ramais de ligação, e ainda podem integrar infraestruturas dos municípios, como por exemplo reservatórios e estações elevatórias.

A AdDP apresenta um sistema de abastecimento “em alta”, uma vez que, como foi referido na secção 1.1, esta entidade capta, trata e efetua a adução de água tratada a 22 municípios que, por sua vez, abastecem a população.

De forma a compreender melhor o funcionamento e a importância de todas as etapas do sistema de abastecimento de água, na Figura 2 está representada as diversas fases em que este sistema pode ser dividido: captação, tratamento, elevação, adução, armazenamento e distribuição da água, para posteriormente ser utilizada e consumida pela população (ERSAR, 2020).

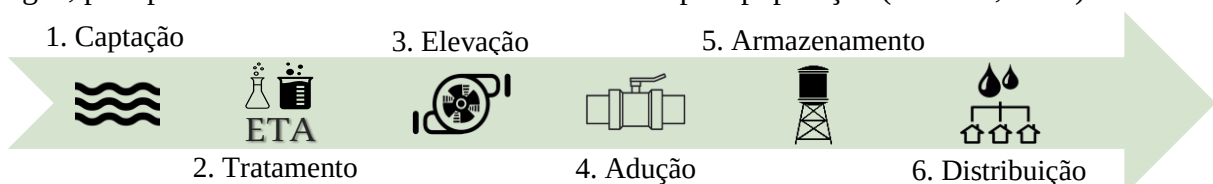


Figura 2 - Fases do sistema de abastecimento de água

De acordo com Covas *et al* (2018), serão descritas as seis fases do sistema de abastecimento de água, bem como as principais infraestruturas utilizadas em cada uma destas fases.

Inicialmente, a água bruta existente na natureza é extraída de acordo com as necessidades das populações. O tipo de infraestruturas utilizadas para a captação da água depende fundamentalmente da forma como esta se encontra disponível no meio ambiente e do caudal necessário. Deste modo, as captações podem ser de dois tipos: superficiais ou subterrâneas.

As captações de água superficial permitem captar água em albufeiras (por torre, poço ou através de plataformas flutuantes) ou rios (diretamente ou através de uma torre ou de um poço). Esta categoria de captação possibilita extrair maiores caudais, no entanto com pior qualidade. Na Figura 3 observa-se um exemplo de uma captação superficial da AdDP, mais concretamente da captação superficial da Estação de Tratamento de Águas (ETA) de Lever. Por outro lado, as captações de água subterrânea consistem em captar água do subsolo ou de poços profundos, em quantidade e qualidade.



Figura 3 - Captação superficial da ETA de Lever da AdDP (Águas do Douro e Paiva, 2004)

Numa segunda fase, a água bruta captada é tratada em Estações de Tratamento de Águas (ETA) com o intuito de eliminar todas as impurezas, como areias, lixos e bactérias, que sejam nocivos à saúde, permitindo retificar as características físicas, químicas e bacteriológicas da água, tornando-a própria para consumo humano.

Segundo a entidade Águas de Portugal (2015b), de uma forma geral, o tratamento da água é dividido em cinco etapas, que permitem cumprir com os requisitos impostos pela lei. De notar que, em determinadas situações, pode não ser necessário que ocorra todos os processos, depende da qualidade da água captada.

Primeiramente ocorre a gradagem da água, que consiste na remoção de sólidos de maior dimensão da água bruta, como folhas, ramos, embalagens, areias e matérias em suspensão, através de grades onde esses materiais ficam retidos forçando a passagem da água. De seguida, realiza-se a coagulação ou floculação, onde é adicionado um reagente (por exemplo, sulfato de alumínio) à água e, posteriormente, misturado, levando às partículas que ainda se encontram na água a se juntarem e provocando a formação de flocos.

Após a formação dos flocos ocorre a decantação, ou seja, devido ao volume e peso dos flocos, estes começam a depositar-se no fundo dos tanques e separam-se da água. Num momento posterior, sucede-se à filtração da água, isto é, a água passa por um filtro, com a finalidade de retirar as partículas sólidas de menores dimensões que ainda possam existir. Por último, através da adição de cloro dá-se a desinfecção final da água, de forma a destruir os microrganismos existentes na água, que possam ser prejudiciais à saúde humana.

Posteriormente à fase de tratamento da água, por vezes é necessário elevar a água potável até ao seu destino, fornecendo energia de pressão. Esta etapa ocorre através de uma estação elevatória, que é constituída por um conjunto de equipamentos (como grupos eletrobomba, válvulas e tubagens) e de instalações elétricas (como quadros e circuitos elétricos e sistemas de sinalização). Em determinados sistemas de abastecimento, a fase de elevação acontece após a captação da água bruta, devido à necessidade de a elevar até à ETA (Covas *et al*, 2018). Na Figura 4 observa-se um exemplo de uma estação elevatória da AdDP, neste caso, da estação elevatória de Jovim.



Figura 4 - Estação elevatória de Jovim da AdDP (Águas do Douro e Paiva, 2018)

De seguida, com recurso a condutas, também conhecidas como adutoras, é realizado o transporte da água potável (fase de adução) até os reservatórios, no caso de sistemas “em alta”, ou até à rede de distribuição, quando se trata de sistemas “em baixa”. Este transporte pode ocorrer de duas formas diferentes: através de condutas em pressão, por gravidade ou bombeamento, ou por meio de canais, galerias ou aquedutos, em que o escoamento da água se processa com superfície livre (Covas *et al*, 2018).

A água tratada é transportada para reservatórios, de forma a garantir a continuidade do abastecimento e a regularização dos caudais. De acordo com as suas funções, os reservatórios podem ser classificados de quatro formas:

- reservatórios de distribuição, a fim de regularizar os caudais, compensando flutuações de consumo face à adução;
- reservatórios de equilíbrio, ou seja, para equilibrar as pressões na rede de distribuição;
- reservatórios de regularização de bombeamento, no caso de estações elevatórias;
- reservatórios de reserva para combate a incêndios ou para assegurar a distribuição em casos de interrupção voluntária ou acidental do sistema de montante;

Por fim, ocorre a distribuição da água tratada através de um conjunto de tubagens e outros elementos como válvulas, juntas, medidores de caudal, entre outros.

Todas as etapas deste processo apresentam igual importância e devem ser seguidas escrupulosamente para que a água chegue até ao consumidor final com a qualidade e na quantidade necessárias.

2.2 Gestão de ativos

A gestão de ativos consiste num processo integrado de tomada de decisão, planeamento e controlo dos ativos da empresa, ao nível da operação, manutenção, reabilitação e substituição, com o intuito de perceber e produzir valor para alcançar o equilíbrio desejado entre o custo,

risco e desempenho (NP ISO 55000, 2016). De acordo com a Empresa Portuguesa das Águas Livres, EPAL (2021), a gestão de ativos constitui uma ferramenta de suporte à tomada de decisão, com o objetivo de garantir a rentabilidade, a sustentabilidade e a qualidade do serviço, como é possível observar na Figura 5.

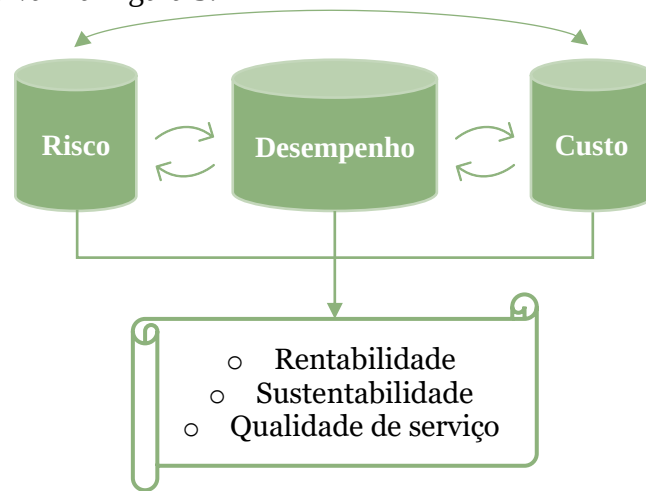


Figura 5 - Equilíbrio entre risco, custo e desempenho

Segundo a Norma Portuguesa ISO 55000 (2016), esta filosofia da gestão dos ativos deve ser aplicada a todas as fases do ciclo de vida de qualquer ativo, isto é, de qualquer bem, coisa ou entidade, que tem um valor potencial ou real para uma organização e que pode ser tangível ou intangível, financeiro ou não financeiro, desde a sua conceção até à respetiva desativação. Esta filosofia de gestão possibilita maximizar a rentabilidade dos ativos ao longo do seu ciclo de vida, mantendo a uniformização dos procedimentos de caracterização dos ativos, de forma a permitir as comparações necessárias e a identificação e implementação de medidas de melhoria.

Relacionando o conceito de ativos com um valor tangível ou intangível com a Águas do Douro e Paiva, alguns exemplos de ativos com um valor tangível, ou seja, ativos físicos, correspondem a equipamentos, inventários e bens da organização (como o caso de equipamentos eletromecânicos, válvulas, equipamentos de medida e de controlo e instalações elétricas). Por outro lado, os ativos que apresentam um valor intangível, são ativos não físicos, como por exemplo os arquivos digitais, licenças de softwares, redes de telecomunicações e sistemas de telegestão.

De acordo com o guia metodológico da entidade Águas de Portugal (2014), no esquema da Figura 6 está representado o ciclo de vida de um ativo, que está dividido em quatro fases: planeamento, construção, utilização (que engloba a sua operação, manutenção e reabilitação) e desativação do ativo.

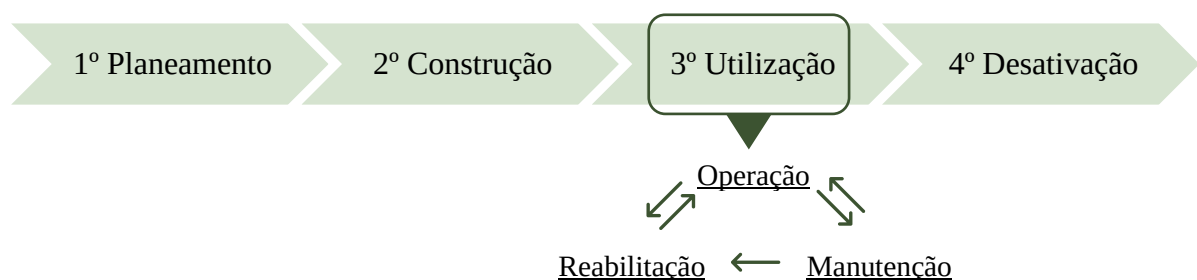


Figura 6 - Ciclo de vida dos ativos

Na fase de planeamento, um determinado ativo é planeado e concebido ou projetado. Além do mais, nesta fase são definidas as especificações necessárias que permitem garantir os requisitos de qualidade e funcionalidade do ativo, bem como as políticas de monitorização do desempenho

e manutenção do ativo. Na segunda fase do ciclo, o ativo é construído ou adquirido e é assegurado que este cumpre com as especificações definidas na fase de planeamento.

Posteriormente, dá-se a fase de utilização do ativo, que normalmente consiste no período mais longo do seu ciclo de vida. Nesta fase, é importante garantir a sua operacionalidade, bem como adotar políticas de manutenção adequadas, de forma a manter o nível de risco do ativo aceitável e com custos reduzidos. A função de manutenção e as decisões sobre manter, reabilitar ou substituir um ativo assumem uma elevada importância nesta fase, pois são fundamentais para assegurar que o ativo cumpre sempre com os requisitos necessários.

Por fim, ocorre a fase de desativação do ativo. Esta decisão de desativar um ativo, ou seja, colocá-lo fora de serviço, está muitas vezes associada a fatores económicos. Quando os custos de operação ou manutenção se tornam muito elevados, por norma, é mais vantajoso economicamente desativar o ativo e adquirir um novo.

De forma a compreender o ciclo de vida de um ativo descrito anteriormente, é importante conhecer os conceitos sobre o período de vida dos ativos (Alegre e Covas, 2010):

- Vida total: período entre a instalação e entrada em funcionamento do ativo até à sua desativação final;
- Vida útil técnica: período após a instalação do ativo, durante o qual este cumpre com a função a que se destina;
- Vida útil contabilística: período de amortização fiscal (por norma, para cada classe de componente);
- Vida útil económica: período desde a aquisição até ao momento em que o ativo, apesar de se encontrar fisicamente capaz de realizar a sua função, já não constitui a opção economicamente mais viável (de menor custo) para concretizar os requisitos de desempenho pretendidos.

Os sistemas de abastecimento de água representam uma parcela significativa no património público construído, e têm um elevado valor económico, sendo a sua gestão uma atividade de capital intensivo. Com efeito, é necessário um capital muito elevado, com um período de retorno muito longo, pelo que é indispensável gerir de modo sustentável e racional, de forma a assegurar a prestação a longo prazo de um serviço de elevada qualidade, garantindo o desenvolvimento das comunidades e a proteção do meio ambiente (Alegre e Covas, 2010).

Os investimentos neste tipo de sistemas representam decisões irreversíveis, em que é fundamental uma gestão de ativos adequada, isto é, um equilíbrio entre os custos financeiros, ambientais e sociais, o risco, a qualidade de serviço e o desempenho associados aos ativos. Deste modo, uma gestão correta e eficaz dos ativos acarreta benefícios, entre os quais (Águas de Portugal, 2014):

- melhoria do desempenho financeiro, levando a um melhor retorno dos investimentos e diminuindo os custos, sem pôr em causa o cumprimento dos objetivos estipulados pela empresa;
- gestão do risco, através de ações, como a redução do impacto ambiental e social, das perdas financeiras e melhorando a segurança;
- melhoria da sustentabilidade da organização (por exemplo, na utilização da água e da energia);
- aumento da satisfação dos clientes pelos níveis de desempenho e controlo do serviço prestado;
- melhoria da eficiência do investimento e da operação;

- maior satisfação dos clientes pelo serviço prestado, levando a uma melhor reputação.

Para além de todas estas vantagens, é necessário tomar decisões fundamentadas com o intuito de melhorar e estruturar a forma de atuação das entidades gestoras de um sistema de abastecimento de água. Deste modo, segundo Alegre e Covas (2010), na Figura 7 é apresentada uma abordagem que engloba três níveis de planeamento (estratégico, tático e operacional), bem como a relação entre estes planos, os seus responsáveis e o respetivo horizonte temporal.



Figura 7 – Relação entre níveis de planeamento, responsáveis e período correspondente (adaptado de Alegre e Covas, 2010)

Os planos estratégicos são de âmbito global, abrangem toda a organização e toda a área geográfica servida. Estes planos são promovidos pela administração da empresa e devem incorporar os objetivos, os critérios e as metas da organização, mas não as vias para atingir os resultados pretendidos. Neste nível, que apresenta um horizonte temporal de longo prazo (10 a 20 anos), a estratégia global que a organização ambiciona utilizar deve estar explícita.

Relativamente ao planeamento tático, são estabelecidas as táticas para atingir os resultados pretendidos, ou seja, define-se de forma sistemática as atividades e os períodos de implementação que permitem a concretização dos objetivos estratégicos, num horizonte temporal de médio prazo (3 a 5 anos). Os planos táticos são de âmbito temático e podem ter um âmbito geográfico mais restrito. Os responsáveis dos departamentos envolvidos estão encarregues por este nível, onde a principal dificuldade está no estabelecimento de prioridades de atuação e no tipo de soluções a implementar.

Por último, nos planos operacionais são definidas as ações para cada sector, que permitem atingir os objetivos estabelecidos no planeamento tático. Estes planos de ações são mais específicos, de âmbito mais localizado e desenvolvidos a curto prazo (1 a 2 anos), cujos responsáveis são os chefes das equipas operacionais (Alegre e Covas, 2010).

2.3 Investimentos

O conceito investimento apresenta duas perspetivas diferentes: económica e financeira. Um investimento económico, também designado por investimento real, é realizado com o intuito de criar condições para a produção ou comercialização de bens ou serviços. Os investimentos financeiros são concretizados apenas com o intuito de obter rendimentos, ou seja, são investimentos em ativos financeiros destinados à capitalização e valorização (Soares *et al*, 2015).

Contudo, a distinção entre estes dois conceitos muitas vezes não é clara pois não depende exclusivamente do ativo adquirido, mas sobretudo da motivação que está subjacente à sua

aquisição. Por outras palavras, o investimento real trata-se de todo o sacrifício resultante numa troca de satisfação atual, associada ao custo, por uma satisfação futura, e associada a benefícios esperados, sendo o objetivo principal a produção e venda de bens ou a prestação de serviços (Soares *et al*, 2015).

Os investimentos podem ser classificados segundo vários critérios, consoante o seu objetivo. Cada tipo de investimento envolve diferentes áreas de análise, pelo que é importante enquadrar os investimentos em estudo, para que sejam avaliados de forma adequada, ajudando assim na sua priorização e tomada de decisão. De um modo geral, as várias tipologias de investimento podem ser agrupadas do seguinte modo (Lopes, 2018):

- Investimentos de substituição ou reposição: quando chega ao fim a vida útil de um equipamento, este é substituído por um equipamento novo com as mesmas características. O risco destes investimentos é pequeno, já que o objetivo é apenas repor a capacidade produtiva da empresa (não há alteração da produção);
- Investimentos de modernização ou racionalização: visam melhorar a produtividade da empresa, ou seja, investir em novos equipamentos, substituindo os equipamentos usados, de forma a aumentar ou melhorar a produção com custos iguais ou inferiores;
- Investimentos de expansão: realizados com o intuito de aumentar a capacidade produtiva da empresa, de modo a atender novos mercados e clientes ou a aumentar a procura da clientela atual;
- Investimentos de inovação: o objetivo é diversificar a atividade da empresa através de investimentos relacionados com novos produtos;
- Investimentos estratégicos: o principal foco é criar condições favoráveis à empresa no futuro. A sua rentabilidade só será visível a longo prazo, pelo que no futuro poderão, por exemplo, possibilitar a entrada em novos mercados e o desenvolvimento e comercialização de novos produtos.

A maioria dos investimentos são irreversíveis e comprometem a empresa por um longo período de tempo, por esta razão é crucial fundamentar com rigor estas decisões e definir qual o momento ideal para as concretizar. Desta forma, é necessário avaliar as novas propostas de investimento com vista à sua inserção no plano de investimentos. Para tal, estas propostas são analisadas a vários níveis, nomeadamente: estratégico, técnico, económico, político, social e ambiental.

Naturalmente, o adequado planeamento e otimização dos investimentos permite uma melhor gestão dos ativos e, conseqüentemente, prolonga a vida útil dos ativos existentes, reforça a fiabilidade do serviço a longo prazo, promove níveis adequados de serviço, gere o risco do serviço e assegura a sustentabilidade da empresa.

A otimização do plano de investimentos de uma empresa é um dos principais fatores para que estes investimentos repercutam de uma forma positiva, quer a nível económico, quer a nível de criação de valor para a empresa.

2.3.1 Métodos de gestão dos investimentos

De um modo geral, as empresas revelam uma preocupação cada vez maior por realizar uma gestão adequada do plano de investimentos e, para tal, utilizam vários critérios com o objetivo de priorizar esses investimentos. Os critérios utilizados para gerir os investimentos devem ser pensados para a empresa em questão, consoante a área de negócio.

Relativamente às empresas relacionadas com o setor da água, são utilizadas diversas abordagens, com o intuito de gerir o plano de investimentos, umas mais complexas que outras,

destacando-se: os indicadores-chave de desempenho (KPI), o princípio de ALARP, a análise de decisão multicritério (MCDA) e a análise envoltória de dados (DEA).

Os KPI correspondem a valores quantitativos que medem os principais processos internos de uma empresa, permitindo o acompanhamento e uma melhor gestão do desempenho e sucesso das estratégias adotadas. Um dos KPI mais utilizados para lidar com a incerteza no planejamento de investimentos de longo prazo consiste no índice de valor de infraestrutura (IVI) (Vieira *et al*, 2020).

O indicador IVI é a razão entre o valor atual do ativo e o seu valor de reposição, assume um valor no intervalo $[0,1]$ e representa o estado de envelhecimento e as intervenções necessárias numa determinada infraestrutura e nos seus ativos. Este índice está diretamente relacionado com as despesas de capital, designado por CAPEX, não incluindo despesas operacionais (OPEX). Contudo, OPEX pode afetar indiretamente a vida útil dos ativos, uma vez que, com uma operação adequada e a respetiva manutenção obtém-se vidas úteis maiores (Vieira *et al*, 2020). De uma forma geral, o método proposto para calcular o IVI compreende seis etapas (Almeida *et al*, 2020):

- 1- Coletar dados relacionados com os ativos;
- 2- Estabelecer uma estrutura de divisão da base de ativos;
- 3- Calcular os custos de reposição atuais;
- 4- Estabelecer as vidas úteis teóricas dos ativos;
- 5- Calcular o IVI atual utilizando uma abordagem estocástica;
- 6- Calcular o IVI ao longo do tempo utilizando uma abordagem determinística.

Esta última etapa é uma tarefa complexa e subjetiva, onde são propostas novas equações, relativamente à quinta etapa, para calcular o valor atual e o custo de reposição, com base nos valores CAPEX (Almeida *et al*, 2020).

Relativamente ao princípio ALARP, que significa “As Low As Reasonably Practicable”, é de extrema importância na gestão do risco e muitas vezes utilizado como o principal critério na priorização dos investimentos (French *et al*, 2005).

Como é possível observar na Figura 8, neste princípio são definidos dois níveis de risco: o primeiro consiste num nível de risco não admissível, ou seja, que não pode ser ultrapassado independentemente do custo das medidas; o segundo nível representa o nível abaixo do qual o risco é considerado insignificante, onde não é necessário implementar novas medidas para além das já existentes. A região entre estes dois níveis denomina-se zona ALARP, na qual o risco apenas é tolerado enquanto o prejuízo causado for menor que o custo da implantação de medidas mitigadoras, esta zona remete a necessidade de uma análise custo-benefício (French *et al*, 2005).

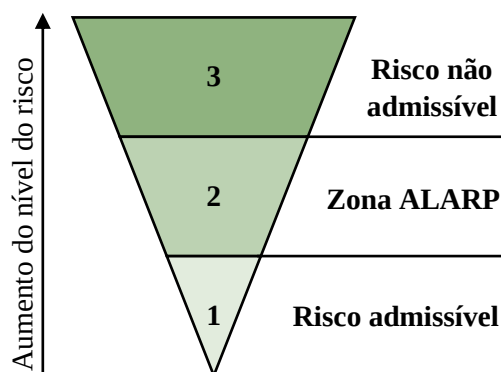


Figura 8 - Princípio ALARP (adaptado de Popov *et al*, 2016)

Com a finalidade de apoiar o princípio de ALARP, é comum recorrer-se a ferramentas quantitativas, tais como a análise custo-benefício (CBA) e a teoria da utilidade multi-atributo (MAUT). A ferramenta analítica CBA faz uma avaliação quantitativa dos benefícios e desvantagens de qualquer decisão, expressa-se em termos monetários e tudo o que não pode ser expresso em dinheiro é considerado sem valor monetário. Em contrapartida, a abordagem MAUT é adotada para modelar cenários de tomada de decisão com múltiplos critérios. Esta teoria não fornece uma solução única, mas sim uma ordem de preferência entre as alternativas existentes, de acordo com determinados critérios estabelecidos. No entanto, o seu principal problema consiste em construir a sua função matemática (French *et al*, 2005).

No que diz respeito à MCDA, esta análise consiste num conjunto de métodos que auxilia no processo de tomada de decisão e na comparação das diferentes alternativas, com base em vários critérios, usando uma análise sistemática. Nesta abordagem, cada critério possui um peso relativo diferente e cada uma das alternativas adquire uma pontuação global distinta, estabelecendo-se uma ordem de preferência das opções disponíveis. Alguns dos métodos mais utilizados, que recorrem a algoritmos de otimização, são: a teoria da utilidade multi-atributo (MAUT), abordada anteriormente, e o processo de hierarquia analítico (AHP) (Linkov *et al*, 2006).

O método MAUT transforma os vários critérios numa escala comum de utilidade ou valor. O seu principal objetivo consiste em maximizar a utilidade, sendo que pontuações baixas em determinados critérios podem ser compensadas por pontuações altas noutros. Em contraste, o AHP utiliza um método de comparação quantitativo, que se baseia em comparações de pares de critérios de decisão, em vez de funções de utilidade e ponderação (Linkov *et al*, 2006).

Por fim, a DEA trata-se de um método de programação linear utilizado para medir a eficiência de um conjunto homogêneo de unidades, intituladas de *decision making units* - DMUs. Neste caso em particular, cada DMU representa um dado cenário de investimento que possui um conjunto de *inputs e outputs*. Posteriormente, as DMUs relativas a um dado ativo são comparadas, com o intuito de compreender melhor as consequências de cada tomada de decisão, para uma eficiente gestão dos ativos. Um dos pontos negativos desta abordagem, passa por criar um problema de programação linear em separado para cada DMU, tornando-se num problema complexo computacionalmente (Li e McNeil, 2019).

Para além deste tipo de abordagens, muitas vezes recorre-se a métodos heurísticos, como os algoritmos genéticos, para realizar a gestão do plano de investimentos. Os algoritmos genéticos são métodos de resolução de problemas de otimização de alta complexidade computacional, muito utilizados na área da engenharia, incluindo no setor da água. Este tipo de algoritmo conduz a uma abordagem holística com um ou vários objetivos, com o intuito de minimizar os custos e maximizar os benefícios (Dandy e Engelhardt, 2001) (Dandy e Engelhardt, 2006).

Na maioria das situações em que o algoritmo genético é aplicado, trata-se de um problema com múltiplos objetivos de apoio à decisão, com uma natureza estocástica. Este algoritmo tem a capacidade de lidar com problemas complexos que podem integrar qualquer tipo de restrição: não linear, inteira, lógica, descontínua, entre outras. Este método é capaz de fornecer uma lista de soluções e não apenas uma, apresentando soluções de ótima qualidade (Dandy e Engelhardt, 2001) (Zangenehmadar *et al*, 2020).

2.4 Modelo de programação linear

Um modelo de programação linear corresponde a um método de otimização frequentemente utilizado no setor empresarial na tomada de decisão, através do uso de modelos matemáticos para a resolução de problemas reais.

De acordo com Hillier (2014), a programação linear consiste numa ferramenta de otimização utilizada para resolver problemas operacionais, tais como: definir rotas, planejar investimentos ou programar a produção de uma empresa. Neste caso em particular, o termo programação é um sinónimo de planejar, ou seja, remete ao planeamento das atividades para obter a solução ótima entre todas as soluções viáveis, de acordo com o modelo matemático definido.

O objetivo deste tipo de metodologia consta na maximização ou minimização de uma função linear, intitulada de função objetivo, e está sujeita a um conjunto de restrições. Geralmente estas restrições correspondem a inequações ou equações lineares, que definem o domínio de todas as soluções possíveis do problema. O conjunto das soluções possíveis de um problema resultam da interseção de todas as restrições.

Tantos as restrições do problema, como a sua função objetivo são formuladas em função de variáveis de decisão. Estas variáveis de decisão são as incógnitas que serão definidas na solução do problema. Os problemas mais simples, até duas variáveis de decisão, podem ser resolvidos graficamente. No entanto, com o aumento do número destas variáveis, a representação gráfica do problema torna-se cada vez mais complexa, surgindo a necessidade de utilizar um software para encontrar uma solução para o problema. Alguns dos softwares mais utilizados são: o *Solver* do excel, LINGO/LINDO e CPLEX.

Num problema de programação linear, uma solução é dada pelo valor que uma variável de decisão pode assumir. Deste modo, é possível identificar quatro tipos de soluções: admissível, não admissível ou impossível, ilimitada e ótima.

No caso de todas as restrições de um problema de programação linear serem cumpridas é encontrada uma solução admissível. Ao conjunto de todas as soluções admissíveis chama-se região admissível. Uma solução é não admissível ou impossível quando pelo menos uma restrição não é cumprida. Se porventura, a função objetivo do problema respeitar todas as restrições e crescer (problema de maximização) ou decrescer (problema de minimização) indefinidamente, a solução encontrada designa-se por solução ilimitada. Por último, a solução ótima consiste numa solução admissível e limitada, que otimiza a função objetivo. Um problema de programação linear pode ter uma, várias ou infinitas soluções ótimas.

O objetivo de um modelo de programação linear é encontrar a solução ótima do problema. A utilização deste modelo não é adequada em todas as situações, está dependente da verificação de quatro pressupostos (Hillier, 2014):

- Proporcionalidade: a contribuição de cada atividade, para o valor da função objetivo Z e para o lado esquerdo das restrições funcionais, é proporcional ao nível de atividade x_j , sabendo que $c_j x_j$ corresponde à função objetivo e $a_{ij} x_j$ representa a restrição i .
- Aditividade: cada função de um modelo de programação linear – a função objeto ou a função do lado esquerdo das restrições funcionais - corresponde à soma das contribuições individuais das respetivas atividades.
- Divisibilidade e não negatividade: as variáveis de decisão podem assumir quaisquer valores, incluindo números não inteiros, desde que cumpram com as restrições funcionais e de não negatividade. Estas variáveis são infinitamente divisíveis.
- Determinístico ou Certeza: o valor atribuído a cada parâmetro de um modelo de programação linear é considerado uma constante conhecida.

3 Apresentação e contextualização do problema

Considerando que a empresa AdDP gere uma atividade de capital intensivo, a definição de um planeamento consciente e eficaz dos investimentos é indispensável para a prossecução dos seus objetivos organizacionais.

Atualmente, o planeamento dos investimentos é realizado considerando a experiência e o conhecimento dos colaboradores da direção de Exploração (EXP) e da direção de Gestão de Ativos e Engenharia (GAE). A AdDP entende que este processo carece de melhoria e complemento, de forma a ter em conta a informação do departamento de Gestão de Ativos (GA) no que concerne à criação de valor a partir dos ativos da empresa, considerando a gestão do risco, do desempenho e dos custos dos ativos.

Desta forma, surge a necessidade de automatizar este processo com a criação de um modelo de otimização, que permita avaliar a continuidade de todas as propostas de investimento comparando igualmente cada uma delas.

Neste capítulo, inicialmente será referida a estrutura organizacional da AdDP e, de seguida, será abordado, resumidamente, os processos incumbidos à GAE, da qual faz parte a GA. Por fim, relatar-se-á o panorama atual relativo à elaboração do plano de investimentos e, posteriormente, será realizada uma análise do caso de estudo deste projeto, ou seja, do plano de investimentos que está atualmente em vigor na AdDP.

3.1 Estrutura organizacional

Em conformidade com o manual de governo da sociedade elaborado pela AdDP (2021), a macroestrutura da empresa está estruturada segundo três níveis organizacionais: direção, departamento e área.

No primeiro nível encontram-se os diretores, que dependem diretamente da Administração e são responsáveis pelos processos mais importantes para o bom funcionamento da empresa. Uma direção pode ser subdividida em departamentos ou áreas. Os coordenadores dos departamentos, que representam o segundo nível organizacional, estão dependentes da administração ou da direção à qual pertencem e podem estar subdivididos em áreas. Por último, os responsáveis das áreas, que diz respeito ao terceiro nível da estrutura organizacional da empresa, estão dependentes ou do diretor ou do coordenador do departamento à qual fazem parte.

Na Figura 9 está representada a estrutura organizacional da AdDP, que apresenta três direções: Administrativa e Financeira (DAF), Exploração (EXP) e Gestão de Ativos e Engenharia (GAE). A DAF está dividida em duas áreas: Contabilidade e Administrativa Financeira. A EXP é responsável pela captação, tratamento e abastecimento da água, ou seja, por garantir a operação e manutenção dos sistemas de abastecimento de água e por maximizar a eficiência dos processos operacionais, e está estruturada internamente em Produção, Distribuição e Gestão Técnica e de Energia. A GAE, que irá ser apresentada com maior detalhe na secção 3.2,

encontra-se estruturada em Planeamento, Investimento e Gestão de projetos e Obras, e Gestão de Ativos (GA).

Adicionalmente, na Figura 9 também se observa os restantes departamentos da empresa. De realçar o departamento de Sistemas e Tecnologias de Informação (STI), que será mencionado várias vezes ao longo deste trabalho. Este departamento garante a gestão do parque informático e da rede de sistemas de informação e comunicação da empresa, permitindo um fácil acesso aos colaboradores. Desta forma, otimiza o fluxo de informação, bem como a promoção, desenvolvimento e acompanhamento de soluções informáticas de apoio.

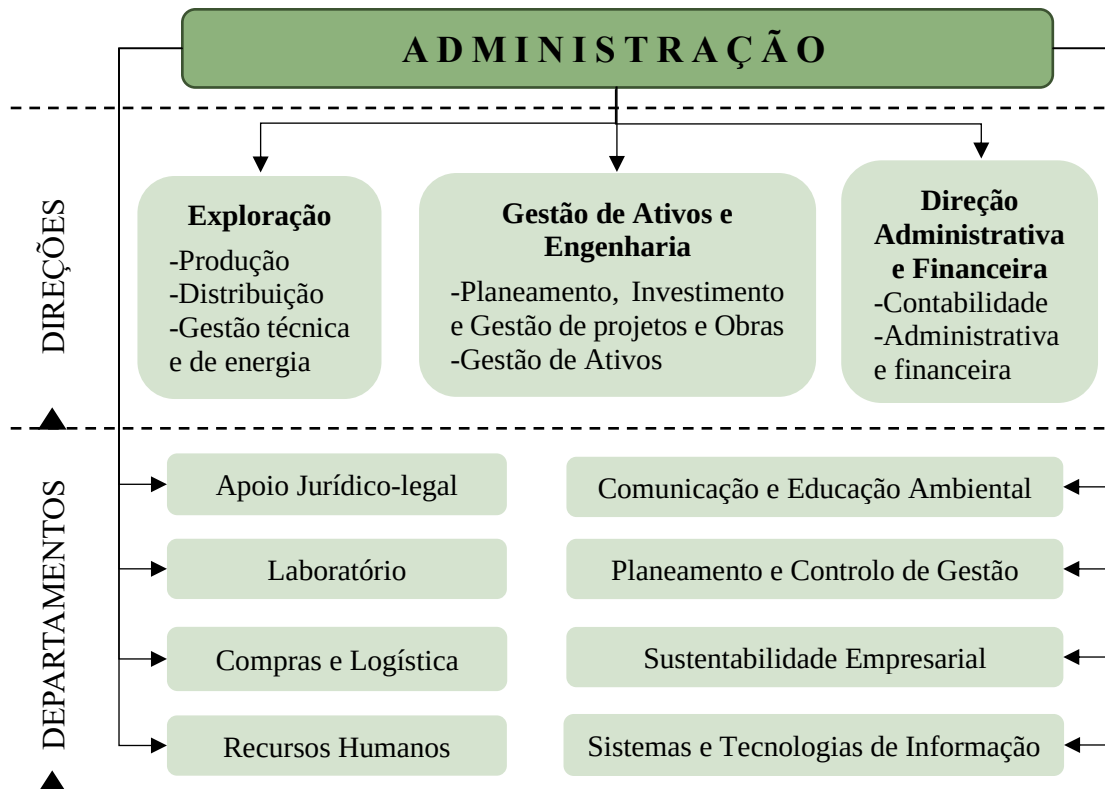


Figura 9 - Estrutura organizacional da AdDP

3.2 Direção de Gestão de Ativos e Engenharia

De acordo com o manual de Gestão de Ativos e Engenharia (2020), a direção de GAE da AdDP é responsável por maximizar o valor criado pelos ativos operacionais ao longo de todo o seu ciclo de vida, garantindo o equilíbrio entre o desempenho, custo e risco destes, tal como foi mencionado na secção 2.2. Esta tem a seu cargo quatro processos: a gestão de ativos, o planeamento, projetos e obras e o sistema de informação geográfica (SIG).

Na Figura 10 estão representadas as principais funções de cada um destes processos, bem como a ligação entre cada um deles. A GA é responsável pelo processo de gestão de ativos, que consiste em inventariar todos os ativos, gerir o seu ciclo de vida, realizando avaliações da sua condição, monitorização e gestão do risco, e planejar intervenções futuras, nomeadamente os investimentos. O planeamento consiste no controlo dos investimentos, ou seja, controlar regularmente os estudos, projetos e obras em curso, compilando todos os dados dos investimentos. Relativamente às obras e projetos, são responsáveis por controlar o estudo dos projetos, contratar e fiscalizar a empreitada, obter licenciamentos e autorizações, adquirir terrenos, efetuar o arranque e o encerramento da construção das obras e fiscalizar algumas tarefas de obra, como controlar a empreitada e os contratos. Por fim, o SIG acompanha equipas

de topografia e desenho de obras e projetos, aprova telas finais e organiza o arquivo destas, posteriormente, carrega toda esta informação na plataforma WebSIG.

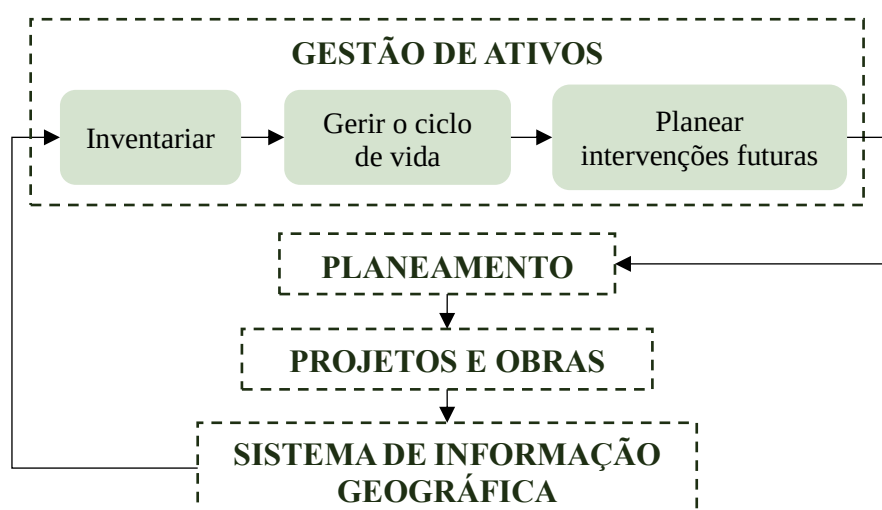


Figura 10 - Processos realizados pelo departamento de GAE da AdDP

3.3 Caracterização do planeamento atual dos investimentos

Com a criação da entidade gestora Águas do Douro e Paiva, S.A. foi assinado um contrato de concessão entre a empresa e o Estado Português, no dia 22 de fevereiro de 2017, onde estão previstos os investimentos que serão realizados durante o período de concessão atribuído de vinte anos. Atualmente, a maioria desses investimentos já foram concretizados e têm surgido outro tipo de investimentos, como de reabilitação, substituição e modernização.

A AdDP possui um plano de investimentos, que é definido no âmbito do Estudo de Viabilidade Económica e Financeira (EVEF). Fundamentado no anexo III do contrato de concessão elaborado entre o Estado Português e a Águas do Douro e Paiva, S.A. (2017), o EVEF integra a previsão das condições aplicáveis ao financiamento da concessão, isto é, engloba a informação relativa ao novo plano de negócios da empresa e tem como objetivo analisar a evolução previsional do nível de atividade desta.

O EVEF permite apurar a tarifa necessária a aplicar aos utilizadores, para a atividade de abastecimento. Deste modo, define-se um projeto tarifário, onde constam os critérios a utilizar para a fixação das tarifas, assim como os gastos e encargos que devem ser cobertos – “*gastos anuais, incluindo os impostos sobre o rendimento e a remuneração do capital investido, deduzidos dos rendimentos obtidos, pelos volumes de caudais a faturar. Para a sua composição contribuíram gastos operacionais, os encargos financeiros e fiscais, assim como a remuneração do capital investido*”.

Este projeto tarifário é revisto quinquenalmente, nas vertentes técnica e económica. Posto isto e estando a atingir-se o fim dos primeiros cinco anos da concessão, surge a necessidade de atualizar o plano de investimentos da empresa, sendo que o orçamento investido deve estar equilibrado ao longo dos cinco anos.

Relativamente ao orçamento disponível pela AdDP para a realização dos investimentos, parte deste é destinado à EXP, outra parte para a GAE, outra para o STI e, por fim, um valor residual para outros departamentos da empresa.

A GA tem a responsabilidade de avaliar todas as propostas provenientes da GAE e EXP e decidir quais as que devem estar incluídas no plano de investimentos e qual a melhor altura para a sua concretização. Contudo, muitas vezes devido à falta de recursos, esta tarefa não é

realizada da melhor forma. A avaliação das propostas de investimento implica a realização de inspeções aos ativos com regularidade e, muitas vezes, não existem recursos para realizar estas inspeções de uma forma detalhada e com a frequência desejada.

Este é o principal problema que tem persistido e por isso a importância de se automatizar o processo de otimização do plano de investimentos, libertando os recursos para outras tarefas.

Com base neste plano quinquenal, é elaborado um plano anual com o intuito de controlar todos os investimentos que serão realizados nesse ano. Todos os anos o plano anual é atualizado e é verificado se todos os investimentos, que foram previstos realizar durante esse ano, se concretizaram ou não. Numa fase posterior, todos os planos de investimentos devem ser aprovados pela administração da empresa.

3.3.1 Inspeções

Para que a decisão de investir seja fundamentada, é necessário proceder a inspeções aos ativos operacionais em questão. Estas inspeções consistem em avaliar a condição funcional de uma infraestrutura ou ativo.

Segundo o processo de avaliação da condição dos ativos definido pelo departamento de Gestão de Ativos da AdDP (2019), no princípio de cada ano a equipa de gestão de ativos é responsável por elaborar o plano anual de inspeções a ativos a realizar ao longo desse mesmo ano. Neste plano refere-se quais as infraestruturas a visitar, a causa da inspeção e o período de tempo (normalmente em meses) necessário para a sua realização, desde a preparação em gabinete até à entrega do relatório de inspeção. Posteriormente à elaboração deste plano, este tem de ser revisto pelo diretor da GAE e aprovado pela administração.

De realçar que a escolha dos ativos a inspecionar tem em consideração os ativos sinalizados pela EXP, por exemplo devido a anomalias detetadas, avarias ou planos de manutenção (corretiva ou preventiva), ativos considerados críticos após a avaliação do risco, ativos novos ou que sofreram reabilitações profundas, reclamações por parte dos clientes e acidentes ou emergências que tenham ocorrido. A GA garante que todos os ativos são inspecionados num período de três anos.

A equipa de inspeção é constituída por colaboradores de diversas áreas da AdDP, nomeadamente da EXP (ou seja, da produção, distribuição e gestão técnica e de energia) e do departamento de sustentabilidade empresarial, podendo ainda fazer parte colaboradores de outras áreas, de forma a garantir as competências necessárias à avaliação adequada dos ativos.

Primeiramente, a GA analisa toda a informação já disponível sobre o ativo de forma a preparar a inspeção. De seguida, esta equipa procede à inspeção visual da condição do ativo, faz um registo fotográfico completo do ativo e das possíveis anomalias detetadas, e anota toda a informação relativa à operação e manutenção do ativo. Por conseguinte, a equipa de inspeção elabora o Relatório e Ficha de Avaliação (RFA) com todas as informações recolhidas.

O RFA é constituído pela descrição geral do ativo, os resultados da inspeção, bem como as propostas de atuação e resolução de eventuais anomalias. Neste relatório é atribuída uma pontuação de acordo com a avaliação global do seu desempenho, que se encontra dividida em três aspetos: performance, estado ou condição e segurança. A escala da classificação do desempenho encontra-se representada na Figura 11, qualitativamente e quantitativamente.

De acordo com a complexidade que envolve todo este processo de inspeção, a equipa de inspeção, desde o momento que realiza a visita ao ativo, tem um prazo de quarenta e cinco dias para entregar o RFA, para posteriormente ser analisado por parte do responsável da instalação, pelo diretor da GAE e pelo diretor da EXP.

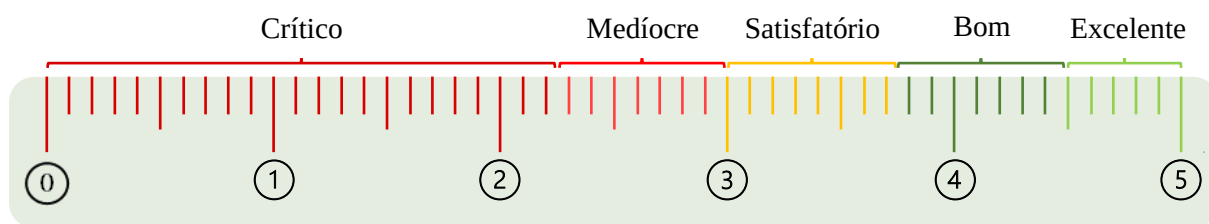


Figura 11 - Escala da classificação do desempenho do ativo

3.4 Caso de estudo

Para a realização deste projeto, a empresa forneceu o plano de investimentos para os próximos dois quinquênios, desde o ano 2022 até ao ano 2031. Este plano foi realizado no âmbito do EVEF e foi a partir deste que o caso de estudo foi desenvolvido.

Este plano apresenta investimentos da EXP, GAE e STI, sendo que os investimentos propostos pela EXP representam, aproximadamente, 50% do orçamento total deste plano. Na Tabela 1 observa-se a distribuição do orçamento a investir pelas duas direções e departamento.

Tabela 1 - Distribuição do orçamento pelos setores da AdDP, de acordo com o seu plano atual

Direção de Exploração	Produção	18.7%
	Distribuição	12.3%
	Gestão técnica e de energia	11.0%
	Geral da EXP	5.9%
Direção de Gestão de Ativos e Engenharia		23.7%
Departamento de Sistemas e Tecnologias de Informação		28.4%

De acordo com o objetivo de cada investimento, estes podem ser classificados segundo várias tipologias: substituição, modernização, expansão, inovação e estratégico. No contexto em particular deste caso de estudo, o plano de investimentos da AdDP foi dividido em dois grandes grupos: investimentos tecnológicos (como por exemplo licenças de softwares, aquisição de material informático e desenvolvimentos de aplicações) e investimentos em ativos, que são realizados em componentes pertencentes a um dos cinco grupos de infraestruturas da AdDP: estações elevatórias, estações de tratamento de águas, condutas (também conhecidas como adutoras), reservatórios e captações.

Deste modo, no gráfico da Figura 12 observa-se a distribuição anual de investimentos em ativos e de investimentos tecnológicos presentes no plano atual da AdDP. Considere que o parâmetro T representa o orçamento total previsto investir nos próximos dez anos.

Após analisar o gráfico da Figura 12 verifica-se que, no primeiro quinquénio se prevê utilizar cerca de 45% do orçamento T em investimentos em ativos e 21% do orçamento T em investimentos tecnológicos. Ou seja, a maioria do orçamento T será utilizado nos próximos cinco anos, aproximadamente 66%. Para além disso constata-se que, ao longo da próxima década, o orçamento T utilizado na concretização de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos será de 65% e de 35%, respetivamente.

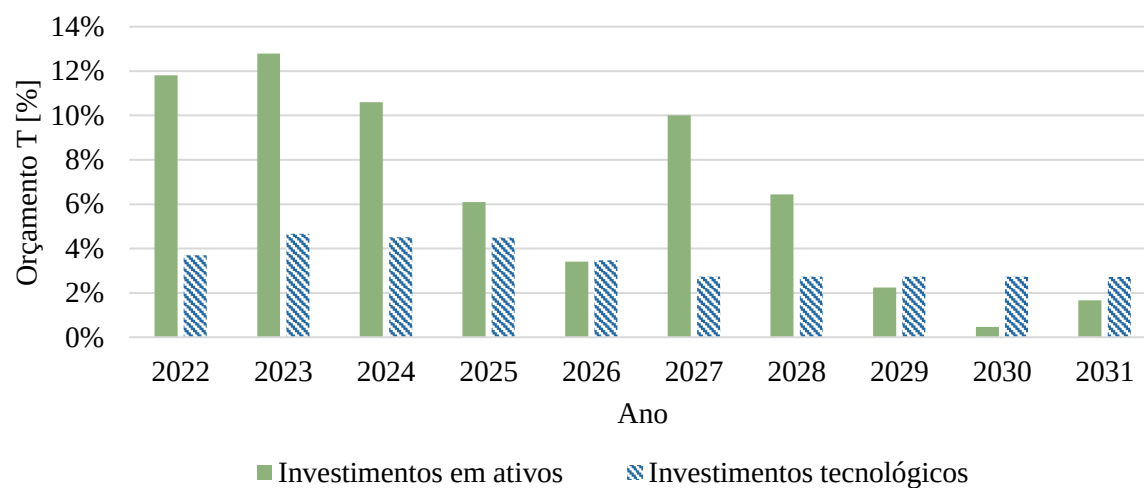


Figura 12 - Distribuição anual dos investimentos em ativos e tecnológicos, de acordo com o plano atual da AdDP

4 Metodologia

Em virtude do atual problema na elaboração do plano de investimentos, surge a necessidade de criar uma ferramenta que auxilie a empresa a fundamentar as escolhas na realização e priorização do plano de investimentos, automatizando este processo de planeamento.

Deste modo, foi desenvolvida uma metodologia de otimização, idealizada em prol da missão da AdDP - *“Gerir o sistema de abastecimento de água em alta, garantindo a eficiência, a fiabilidade, a qualidade do serviço, a segurança do produto e o respeito pelos valores sociais e ambientais mais elevados”* - e tendo em conta o maior objetivo da GA, que consiste em aumentar a perceção e produção de valor para a empresa dos conjuntos dos seus ativos.

Ao longo deste capítulo é descrito o modelo de otimização desenvolvido, que corresponde a um modelo de programação linear binário, onde é atribuída, a cada proposta de investimento, uma classificação do valor que esse investimento cria para a empresa quando é realizado. Desta forma, recordando sempre qual a missão e a visão da AdDP - *“Sermos reconhecidos pela nossa eficiência, competência, sustentabilidade e criação de valor para a região”* -, esta metodologia tem como principal função otimizar o plano de investimentos e, consequentemente, priorizá-los. Além disso, tem como objetivo maximizar a criação de valor para a empresa, indicando os investimentos que devem ser realizados nos próximos cinco anos e em que ano cada um deles deve ocorrer. De notar que, tal como foi referido na secção 3.4, neste caso de estudo em particular, os investimentos podem ser de dois tipos: investimentos em ativos e investimentos tecnológicos.

4.1 Caracterização do valor dos investimentos em ativos

A classificação do valor atribuída a cada um dos investimentos em ativos é obtida tendo por base um conjunto de critérios, que vão ao encontro da missão da AdDP. Esta classificação tem igualmente em consideração o estado atual do ativo, bem como as vantagens que este investimento trará à organização. O estado atual do ativo é avaliado através do nível de risco do ativo (que está relacionado com as falhas dos ativos), da vida útil remanescente (determinada a partir do ano de construção do ativo e da sua vida útil recomendada) e do histórico de avarias dos últimos quatro anos, garantindo a segurança e eficiência dos ativos.

Relativamente ao retorno do investimento, a sua realização trará diversas vantagens à empresa. Neste caso, cada proposta de investimento será analisada quanto à sua eventual modernização/ inovação tecnológica, eficiência/ produção de energia, fiabilidade do abastecimento, perdas/fugas de água e vantagens económicas, e é indicado se algum destes cinco fatores ocorrerá, ou não, com a realização do investimento. Estes últimos critérios avaliados permitem aumentar a fiabilidade do abastecimento e realçar as consequências ambientais positivas, através da valorização da produção de energia, conduzindo a uma maior qualidade do serviço prestado pela AdDP.

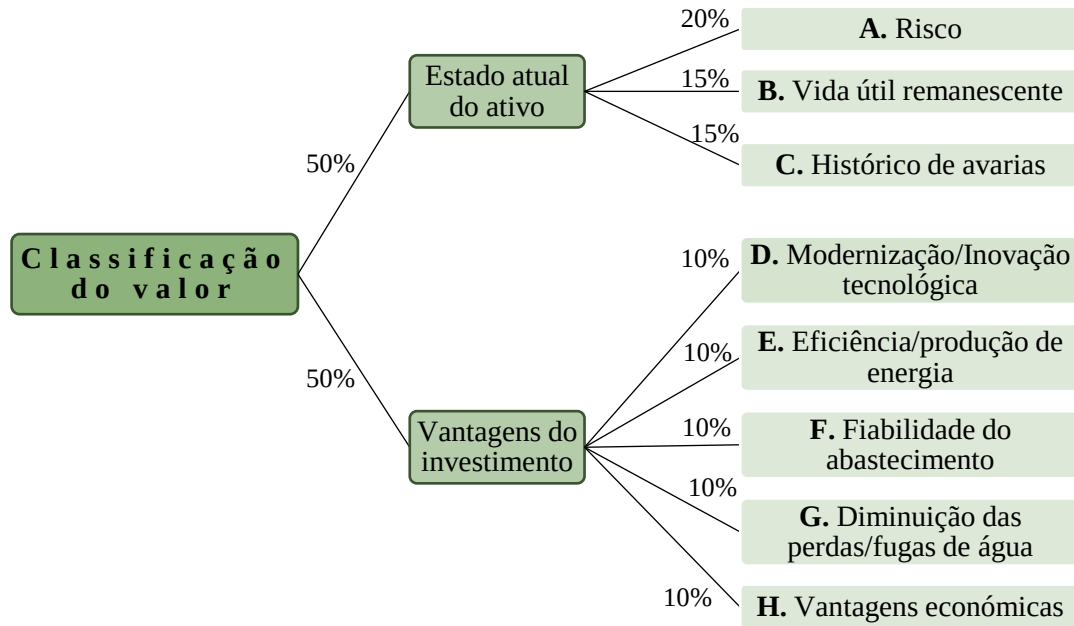


Figura 13 - Critérios que determinam a classificação do valor dos investimentos em ativos e respectivas ponderações

Na Figura 13 encontra-se esquematizado todos os critérios referidos anteriormente, que são utilizados para determinar o valor dos investimentos em ativos, bem como as ponderações de cada critério para o seu cálculo. Deste modo, a classificação do valor de um investimento num ativo atual, que já existe na AdDP, é apresentada pelo parâmetro V_a numa escala de [0,25] e é obtida através da equação (4.1). Uma proposta de investimento que apresente um valor de 25 significa que esse investimento, se for realizado, trará muito valor para a empresa. A designação dos parâmetros A, B, C, D, E, F, G e H está indicado na Figura 13.

$$V_a = 0.2 \times A + 0.15 \times (B + C) + 0.1 \times (D + E + F + G + H) \quad (4.1)$$

Contudo, existem algumas propostas de investimentos em ativos novos, que ainda não existem na AdDP, como por exemplo a instalação de uma nova conduta, de novos equipamentos solar fotovoltaico, de uma nova ponte rolante numa determinada infraestrutura, ou até mesmo o abastecimento a uma nova região. Deste modo, a classificação do valor para propostas de investimentos em ativos futuros, representada pelo parâmetro V_f , é determinada a partir da equação (4.2) numa escala de [0,25]. Esta classificação apenas tem consideração as vantagens que ocorrem com a concretização deste investimento, não tem em conta o estado atual do ativo, pois ele ainda não existe na AdDP.

$$V_f = \frac{0.1}{0.5} \times (D + E + F + G + H) \quad (4.2)$$

Nas secções seguintes será explicado como se determina o valor dos parâmetros A, B, C, D, E, F, G, H presentes nas equações (4.1) e (4.2).

4.1.1 Risco

Segundo o procedimento de gestão do risco dos ativos elaborado pelo departamento de Gestão de Ativos da AdDP (2020), a apreciação e gestão adequada do risco é um processo essencial para uma correta gestão dos ativos. A gestão do risco ajuda a empresa na tomada de decisão,

uma vez que o valor do risco é definido tendo em conta a incerteza, a possibilidade de eventos futuros e os seus efeitos nos objetivos desta tomada de decisão.

No caso em particular da AdDP, o risco está relacionado com as falhas dos ativos. Por outras palavras, a análise de risco consiste na determinação das consequências – criticidade - e das probabilidades – funcionalidade – dos riscos identificados. A funcionalidade de ocorrência de uma falha pode ser estimada através de dados históricos relevantes ou, em caso de não existir, com recurso a técnicas preditivas ou análises de falhas. Já a criticidade, que resulta da ocorrência de falhas, está relacionada com a tipologia do ativo e com o impacto do mesmo.

Deste modo, o risco de um ativo é determinado através do produto da sua funcionalidade (probabilidade) e da respetiva criticidade (consequência), representado na equação (4.3).

$$\text{Risco} = \text{Funcionalidade} \times \text{Criticidade} \quad (4.3)$$

Na metodologia desenvolvida neste projeto, recorreu-se à matriz de risco, representada na Figura 14, para determinar o risco de cada ativo e, posteriormente, definir o parâmetro A. Esta matriz apresenta no eixo das coordenadas (eixo horizontal) o valor da criticidade e no eixo das ordenadas (eixo vertical) a funcionalidade. A zona da matriz sombreada a vermelho, onde o parâmetro $A \in \{15,16,20,25\}$, corresponde a um risco inaceitável do ativo, ou seja, a um nível elevado do risco (devem ser implementadas medidas imediatas para a redução do risco). Relativamente à zona amarela, onde o parâmetro $A \in \{8,9,10,12\}$, significa que o risco é considerado médio (nível médio do risco) e, por fim, a região a verde representa um risco aceitável, ou seja, o ativo está em plenas condições de funcionamento (nível baixo do risco), onde o parâmetro $A \in \{1,2,3,4,5,6\}$.

Funcionalidade ↑	[4.5; 5.0]	5	10	15	20	25
	[3.5; 4.5]	4	8	12	16	20
	[2.5; 3.5]	3	6	9	12	15
	[1.5; 2.5]	2	4	6	8	10
	[1.0; 1.5]	1	2	3	4	5
		[1.0; 1.5]	[1.5; 2.5]	[2.5; 3.5]	[3.5; 4.5]	[4.5; 5.0]
		Criticidade →				

Figura 14 - Matriz de risco adotada para a classificação do risco dos ativos

Tanto a funcionalidade, como a criticidade dos ativos, e, consequente, o nível de risco, são determinadas a partir de um conjunto de critérios que variam consoante a infraestrutura em questão, ou seja, depende se se trata de uma estação de tratamento de águas (ETA), reservatório, conduta, captação ou estação elevatória (EE). Estes critérios, bem como as suas respetivas ponderações, estão indicados no Anexo A. No caso das ETA, EE e captções, estas infraestruturas apresentam dois tipos de risco, um associado à construção civil e outro relativo aos equipamentos.

4.1.2 Vida útil remanescente

A vida útil remanescente trata-se de uma estimativa do período de tempo, a partir do momento atual, durante o qual a empresa ainda pretende utilizar o ativo.

Como é referido na secção 2.2, a vida útil técnica corresponde ao período após a instalação do ativo, durante o qual este cumpre com a função a que se destina. Desta forma, a vida útil remanescente de um ativo, expressa em anos, é determinada a partir da equação (4.4), tendo em conta o seu ano de construção e o respetivo período, em anos, da vida útil técnica recomendada. No caso de o ativo ter sido reabilitado após a sua construção, considera-se o ano de reabilitação em vez do ano de construção do ativo.

$$V_{ur} = (A_c + V_{ut}) - A_a \quad (4.4)$$

Onde:

V_{ur} , é a vida útil remanescente do ativo, expressa em anos

A_c , é o ano de construção do ativo

V_{ut} , é a vida útil técnica do ativo, expressa em anos

A_a , é o ano atual

Sabendo que cada proposta de investimento está associada a um determinado ativo, a sua vida útil técnica recomendada depende do seu tipo e da sua natureza. De acordo com Covas *et al* (2018), no guia técnico 23 da ERSAR encontram-se os valores recomendados para a vida útil técnica dos ativos do sistema de abastecimento de água, que variam se a proposta de investimento se refere à construção civil do ativo ou aos seus equipamentos. Estes valores, expressos em anos, estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 - Vida útil técnica recomendada para os componentes de um sistema de abastecimento de água, expressa em anos (Covas *et al*, 2018)

Construção civil	Edifícios (geral)		60
	Reservatórios		60
	Estações elevatórias		60
	Condutas	(geral)	50
		Ferro fundido dúctil	60
		Aço	60
		Betão	50
		Policloreto de vinilo	40
		Polietileno	50
		Fibrocimento	40
		Grés	60
		Entubamento Rígido	50
	Instalações de tratamento		60
Equipamento	Equipamento eletromecânico		25
	Válvulas		25
	Instalações elétricas		15
	Equipamento de medida e de controlo		15
	Equipamento de tratamento		15

Posteriormente à determinação da vida útil remanescente dos ativos, expressa em anos, torna-se necessário classificá-la numa escala de [0,25], para o cálculo do parâmetro B e, consequentemente, da classificação do valor dos investimentos em ativos. O parâmetro B é determinado através da equação (4.5).

$$B = 25 \times \frac{V_{ut} - V_{ur}}{V_{ut}} \quad (4.5)$$

Quando a vida útil remanescente (V_{ur}), expressa em anos, apresenta um valor negativo, significa que o ativo já devia ter sido substituído ou reabilitado. Nestes casos, o parâmetro B assume a classificação máxima, ou seja, o valor de vinte e cinco. Isto significa que, como o ativo já não apresenta uma vida útil remanescente, se for realizado um investimento nesse ativo, trará muito valor para a empresa.

4.1.3 Histórico de avarias

Com base na lista de ordens de trabalho, constante no software de manutenção da empresa, que resultam da necessidade de se repararem avarias, foram contabilizadas o número de avarias de cada ativo, registadas entre abril de 2017 e fevereiro de 2021.

Estas avarias dizem respeito às ordens de trabalho solicitadas para serviços de trabalho extra de manutenção, manutenção corretiva/curativa, manutenção de melhoria ou obras novas. Na contagem das avarias separou-se as que correspondem à construção civil, das avarias relativas aos equipamentos.

Relativamente ao cálculo do parâmetro C, que corresponde à classificação do histórico de avarias numa escala de [0,25], é determinado recorrendo às equações (4.6) ou (4.7), consoante se a proposta de investimento está relacionada com a construção civil do ativo ou com aos seus equipamentos, respetivamente.

$$C_{\text{construção civil}} = 25 \times \frac{N_{cc}}{a} \quad (4.6)$$

$$C_{\text{equipamento}} = 25 \times \frac{N_{eq}}{b} \quad (4.7)$$

Onde:

N_{cc} , é o número total de avarias do ativo, associado à construção civil

a , é o maior valor de avarias entre todos os ativos, arredondado por excesso, associado à construção civil

N_{eq} , é o número total de avarias do ativo, associado aos equipamentos

b , é o maior valor de avarias entre todos os ativos, arredondado por excesso, associado aos equipamentos

4.1.4 Vantagens

Quando se realiza um determinado investimento, espera-se que este traga vantagens para a empresa, quer a nível económico, ambiental/social, bem como uma melhor qualidade do serviço prestado. Deste modo, foram analisadas quais as vantagens que ocorrem ao realizar-se um determinado investimento num ativo. As vantagens avaliadas, consideradas como as mais importantes e que vão ao encontro da missão da AdDP, são:

- Modernização/ inovação tecnológica, que corresponde ao parâmetro D (por exemplo, a instalação de um novo equipamento eletromecânico com uma tecnologia mais recente e avançada);

- Eficiência/produção de energia, que corresponde ao parâmetro E (por exemplo, um investimento relacionado com a instalação de painéis fotovoltaicos, permitindo a produção de energia);
- Fiabilidade do abastecimento, que corresponde ao parâmetro F. Um investimento pode originar uma maior fiabilidade do abastecimento quando, ao ser concretizado, permite uma maior qualidade dos processos e do serviço prestado;
- Diminuição das perdas/fugas de água, que corresponde ao parâmetro G (por exemplo, através da substituição ou reabilitação de uma conduta ou reservatório);
- Vantagens económicas, que corresponde ao parâmetro H.

No caso de a concretização de um investimento originar uma destas cinco vantagens, o respetivo parâmetro toma o valor de vinte cinco, caso contrário apresenta um valor nulo. Deste modo, conclui-se que os parâmetros D, E, F, G, H $\in \{0,25\}$.

4.2 Caracterização do valor dos investimentos tecnológicos

A maioria dos investimentos tecnológicos estão associados a ativos intangíveis da empresa provenientes do departamento de Sistemas e Tecnologias de Informação (STI). Deste modo, todos os critérios avaliados para determinar a classificação do valor de cada proposta de investimento foram estabelecidos em conjunto com colaboradores pertencentes ao STI.

No esquema da Figura 15 estão enumerados os vários critérios considerados e as respetivas ponderações, para a classificação do valor de um investimento tecnológico.

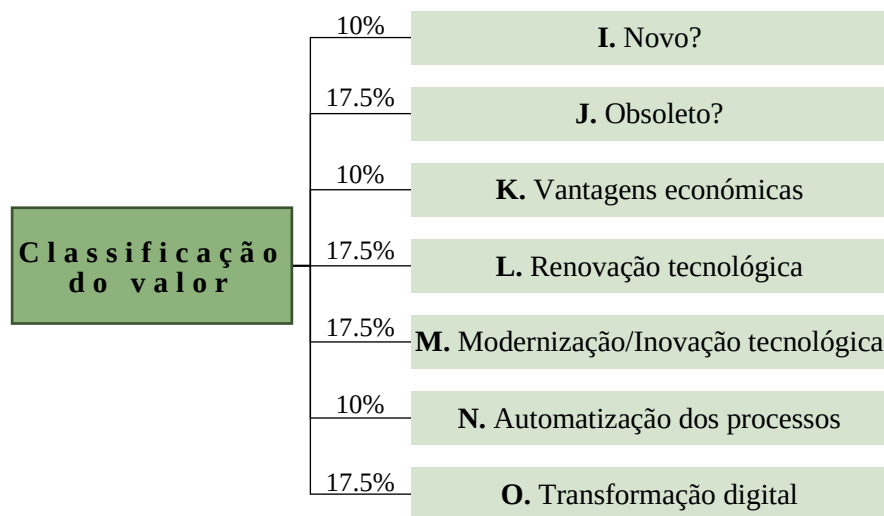


Figura 15 - Critérios que determinam a classificação do valor dos investimentos tecnológicos e respetivas ponderações

A classificação do valor de um investimento tecnológico tem em consideração se este é novo para a empresa, se o investimento que se pretende realizar se encontra atualmente obsoleto e as vantagens económicas que o investimento poderá trazer se for realizado. Para além disso, foram ponderadas mais quatro vantagens, que são consideradas fundamentais para esta avaliação: a renovação tecnológica (muitas empresas optam por atualizar ou substituir regularmente alguns destes ativos tecnológicos em vez de os utilizar até não funcionarem mais, de forma a maximizar o desempenho dos processos do sistema), a modernização/inovação tecnológica, a automatização dos processos (ou seja, tornar os sistemas mais automáticos, permitindo agilizar os processos) e a transformação digital (com o passar do tempo, o universo digital tem ganho

cada vez mais poder e, por isso, torna-se fundamental repensar nas ações da empresa e integrar o digital).

A equação (4.8) permite calcular V_t , que corresponde à classificação do valor dos investimentos tecnológicos, onde os parâmetros I, J, K, L, M, N e O estão designados na Figura 15. Há parâmetros que apresentam uma maior ponderação, pois os colaboradores de STI consideram que esses parâmetros têm maior interesse para a empresa.

$$V_t = 0.1 \times (I + K + N) + 0.175 \times (J + L + M + O) \quad (4.8)$$

Os parâmetros I, J, K, L, M, N, O assumem o valor de vinte e cinco quando o respetivo critério se verifica, caso contrário apresentam um valor nulo. Desta forma define-se que os parâmetros I, J, K, L, M, N, O $\in \{0; 25\}$.

4.3 Modelo de programação linear binário

O modelo de otimização proposto tem como objetivo maximizar a criação de valor para a empresa, resultante da concretização das propostas de investimento. Consequentemente, este modelo retorna quais os investimentos que devem ser realizados em cada um dos anos do próximo quinquénio (de 2022 a 2026). Para além disso, este modelo considera a obrigatoriedade da realização de determinados investimentos, isto é, investimentos que, por obrigação legal ou devido ao contrato de concessão, devem ser realizados nos próximos anos. Deste modo, consoante o horizonte de planeamento dos investimentos considerado para a resolução do modelo proposto, deve ser feita uma análise de quais as propostas de investimento que apresentam este carácter obrigatório.

Esta metodologia desenvolvida trata-se de um modelo de programação linear binário, constituído por variáveis de decisão, ou seja, incógnitas que serão determinadas pela solução do problema, e por parâmetros, que corresponde a valores fixos no problema, isto é, dados de entrada.

Neste modelo são utilizadas as seguintes variáveis de decisão binárias:

$$x_{k,i} = \begin{cases} 1, & \text{se o investimento no ativo } i \text{ é realizado no ano } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_{k,j} = \begin{cases} 1, & \text{se o investimento tecnológico } j \text{ é realizado no ano } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Seja o horizonte de planeamento dos investimentos, neste caso de estudo em particular, de cinco anos, assume-se que A corresponde ao conjunto dos anos em que este horizonte de planeamento está definido, ou seja, $A \in \{1,2,3,4,5\}$. Considere B o conjunto dos investimentos em ativos e C o conjunto dos investimentos tecnológicos. Deste modo, é proposto o seguinte modelo:

$$\max \left[\sum_{k \in A} \sum_{i \in B} (x_{k,i} \times va_i) + \sum_{k \in A} \sum_{j \in C} (y_{k,j} \times vt_j) \right] \quad (4.9)$$

$$s. a. \sum_{k \in A} x_{k,i} \leq 1, \forall i \in B \quad (4.10)$$

$$\sum_{k \in A} y_{k,j} \leq 1, \forall j \in C \quad (4.11)$$

$$\sum_{i \in B} (x_{k,i} \times za_i) + \sum_{j \in C} (y_{k,j} \times zt_j) \leq q_k, \forall k \in A \quad (4.12)$$

$$\sum_{j \in C} (y_{k,j} \times zt_j) \leq 0.35 \times q_k, \forall k \in A \quad (4.13)$$

$$\sum_{k \in A} x_{k,i} \geq wa_i, \forall i \in B \quad (4.14)$$

$$\sum_{k \in A} y_{k,j} \geq wt_j, \forall j \in C \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in N} r_i - \sum_{m=1}^k \sum_{i \in N} (x_{m,i} \times r_i) \leq 7 \times \left[|N| - \sum_{m=1}^k \sum_{i \in N} x_{m,i} \right], \forall k \in A \quad (4.16)$$

$$f_i - 4.5 \leq x_{k,i} - \varepsilon \quad (4.17)$$

$$\sum_{i \in N} d_i - \sum_{m=1}^k \sum_{i \in N} (x_{m,i} \times d_i) \geq 3 \times \left[|N| - \sum_{m=1}^k \sum_{i \in N} x_{m,i} \right], \forall k \in A \quad (4.18)$$

$$|P| - \sum_{k \in A} \sum_{i \in P} x_{k,i} = |P| \times h \quad (4.19)$$

$$x_{k,i} \in \{0,1\}, \forall k \in A, i \in B \quad (4.20)$$

$$y_{k,i} \in \{0,1\}, \forall k \in A, j \in C \quad (4.21)$$

$$h \in \{0,1\} \quad (4.22)$$

Onde:

- va_i , é a classificação do valor do investimento no ativo i
- vt_j , é a classificação do valor do investimento tecnológico j
- za_i , é a quantia, em euros, do investimento no ativo i
- zt_j , é a quantia, em euros, do investimento tecnológico j
- q_k , é o orçamento, em euros, disponível para investir no ano k
- wa_i , é a existência, ou não, de caráter obrigatório do investimento no ativo i
- wt_j , é a existência, ou não, de caráter obrigatório do investimento tecnológico j
- r_i , é o risco do ativo associado ao investimento no ativo i
- f_i , é a funcionalidade do ativo associado ao investimento no ativo i
- d_i , é o desempenho do ativo associado ao investimento no ativo i

A função objetivo (4.9) maximiza o valor criado para a empresa, com a realização dos investimentos. Os parâmetros va_i e vt_j são determinados utilizando as equações (4.1) ou (4.2) e a equação (4.8), respetivamente.

As restrições (4.10) e (4.11) asseguram, respetivamente, que cada proposta de investimento no ativo i e de investimento tecnológico j é realizada, no máximo, uma vez no horizonte de planeamento dos investimentos.

Seguidamente, foram impostas duas restrições a nível económico. A restrição (4.12) indica que a quantia total, em euros, relativa a todos os investimentos em ativos e investimentos tecnológicos concretizados no ano k, não pode exceder o orçamento disponível para investir, pela empresa, nesse ano k.

Para além disso, a restrição (4.13) equilibra o montante utilizado anualmente na realização dos investimentos em ativos e dos investimentos tecnológicos. Esta restrição dita que a quantia total, em euros, relativa aos investimentos tecnológicos realizados no ano k , não pode exceder 35% do orçamento total disponível para investir nesse ano k . Esta ponderação foi adotada com base nas conclusões retiradas na secção 3.4, onde se constata que aproximadamente 65% do orçamento total previsto utilizar nos próximos dez anos segundo o plano de investimentos atual da AdDP é utilizado para realizar investimentos em ativos e os restantes 35% na concretização de investimentos tecnológicos.

As propostas de investimento que apresentam um carácter obrigatório são representadas pelos parâmetros wa_i e wt_j da seguinte forma:

$$wa_i = \begin{cases} 1, & \text{se o investimento no ativo } i \text{ é de carácter obrigatório} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$wt_j = \begin{cases} 1, & \text{se o investimento tecnológico } j \text{ é de carácter obrigatório} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Desta forma, as restrições (4.14) e (4.15) garantem, respetivamente, que caso o investimento no ativo i e o investimento tecnológico j possuam um carácter obrigatório, sejam realizados ao longo do período de planeamento dos investimentos considerado. Se as propostas de investimento não apresentarem esta obrigatoriedade, podem, ou não, ser realizadas ao longo do horizonte de planeamento.

Seja N o conjunto dos investimentos em ativos atuais, que já existem na AdDP, note que o conjunto N é um subconjunto do conjunto B . Considere que a notação $|N|$ representa a cardinalidade do conjunto N , ou seja, corresponde ao número de elementos constituintes do conjunto N .

A restrição (4.16) garante que o risco médio de falha dos ativos associados às propostas de investimento em ativos i ainda não realizados até ao fim de cada ano, não excede o valor numérico sete. Esta restrição foi estabelecida com base na matriz de risco dos ativos representada na Figura 14 da secção 4.1.1.

Adicionalmente foi acrescentada outra restrição relacionada com o risco de falha dos ativos. Como foi referido na secção 4.1.1, o valor do risco resulta do produto da sua funcionalidade (probabilidade) e criticidade (consequência). O parâmetro f_i , que corresponde à funcionalidade do ativo i associado ao investimento no ativo i , apresenta uma escala de $[0,5]$ e assume o valor $f_i = 5$ quando a probabilidade de ocorrência de uma falha é muito alta. Consequentemente foi desenvolvida a restrição (4.17), que indica que todas as propostas de investimento associadas a ativos que apresentam uma funcionalidade igual ou superior a 4,5 ($f_i \geq 4,5$), devem ser obrigatoriamente realizadas num dos anos do horizonte de planeamento dos investimentos considerado. Considere que ε representa um valor infinitesimal.

No que diz respeito ao desempenho dos ativos, foi elaborada a restrição (4.18), para assegurar que o desempenho médio associado às propostas de investimento em ativos i ainda não realizados até ao fim de cada ano, não é inferior ao valor numérico três. Esta restrição foi definida tendo por base a escala da classificação do desempenho de um ativo, que apresenta uma escala no intervalo de $[0,5]$ e está representada na Figura 11 da secção 3.3.1, onde o desempenho de um ativo abaixo do valor numérico três é considerado inaceitável.

De notar que, as restrições (4.20) e (4.21) definem os respetivos domínios das duas variáveis de decisão.

Por último, é fundamental analisar cada caso de estudo e ter em atenção às propostas de investimento em ativos que devem ser realizadas em conjunto, pois existem investimentos que, quando se realiza a obra para executar um deles, outros tantos relacionados devem também ser

concretizados. No caso de estudo em questão, existem vários investimentos em ativos relacionados com o fornecimento e instalação de equipamentos solar fotovoltaico, mas que, quando é realizada a obra para concretizar um destes investimentos numa determinada infraestrutura de um ativo, todos os outros investimentos relativos ao fornecimento e instalação de equipamentos solar fotovoltaico nas restantes infraestruturas de ativos devem ser realizadas, logo, ou são realizados todos os investimentos deste tipo ou não é realizado nenhum deles.

Desta forma, seja P o conjunto dos investimentos em ativos relacionados com o fornecimento e instalação dos equipamentos solar fotovoltaico e $|P|$ a respetiva cardinalidade do conjunto, foi formulada a restrição (4.19). Nesta restrição é utilizada a seguinte variável de decisão auxiliar binária, cujo domínio está definido na restrição (4.22):

$$h = \begin{cases} 1, & \text{se nenhum dos investimentos pertencentes ao conjunto } P \text{ for realizado} \\ 0, & \text{se todos os investimentos pertencentes ao conjunto } P \text{ forem realizados} \end{cases}$$

Neste caso, esta restrição foi aplicada a investimentos relativos ao fornecimento e instalação dos equipamentos solar fotovoltaico mas, num outro caso de estudo, poderia ser aplicada a quaisquer investimentos que apresentem esta condição.

4.4 Resolução do modelo proposto

Seguidamente à construção do modelo de programação linear desenvolvido, recorreu-se a um software de otimização para o implementar e resolver o caso de estudo fornecido pela AdDP. A ferramenta de otimização matemática utilizada foi o software IBM-ILOG-CPLEX, com a linguagem de modelagem OPL.

Este software simplifica, acelera o desenvolvimento e a implementação dos modelos de otimização. A linguagem de modelagem OPL permite guardar a representação matemática do modelo desenvolvido separadamente dos seus dados. Estes dados podem ser inseridos no programa ou lidos a partir de um documento externo, como um documento em formato excel. Nesta linguagem, um projeto pode ter vários arquivos de modelo e vários arquivos de dados, ou seja, pode ter várias configurações de execução. Estas configurações correspondem à execução de um modelo e de um arquivo de dados. A interface deste programa pode ser visualizada na Figura 16.

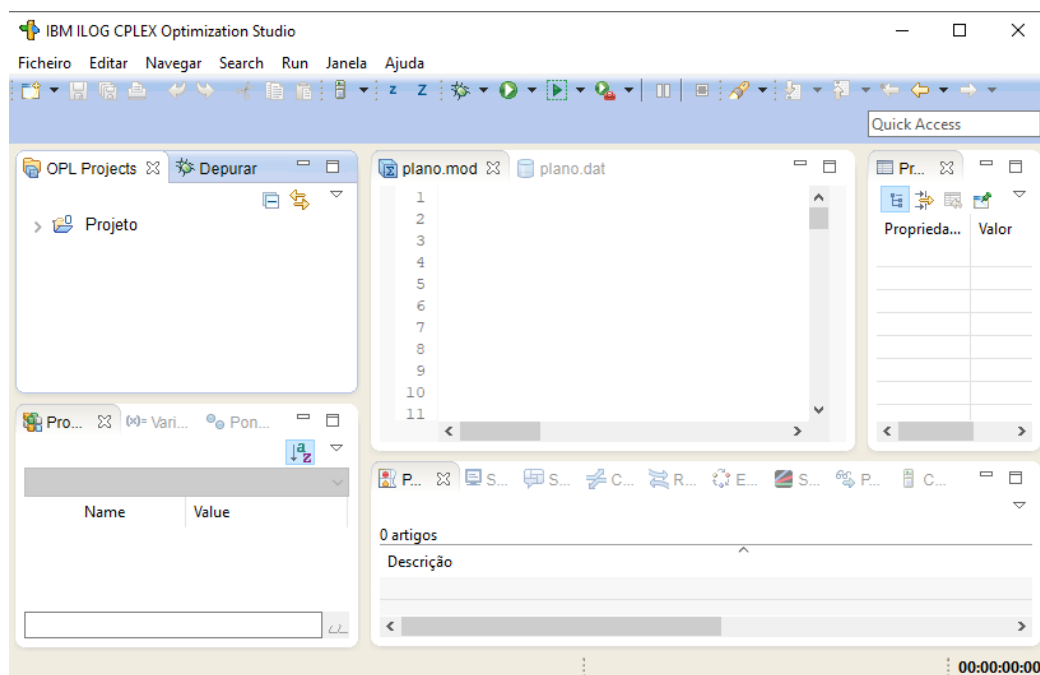


Figura 16 - Interface do software CPLEX

5 Análise dos resultados

Para melhor compreender esta análise de resultados, e tendo em consideração a metodologia desenvolvida, é fundamental ter sempre em mente o objetivo principal deste modelo: maximizar a criação de valor resultante da concretização dos investimentos e escolher os investimentos que devem ser realizados em cada um dos próximos cinco anos (de 2022 a 2026).

Numa fase inicial, será analisado o valor criado para a empresa nos próximos cinco anos se a AdDP cumprisse com o seu plano de investimentos atual. Esta análise será feita para três conjuntos de dados diferentes: o conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i), o conjunto de investimentos em ativos (ii) e conjunto de investimentos tecnológicos (iii).

Numa fase posterior, serão estudados os resultados obtidos através da implementação do modelo de otimização desenvolvido para estes três conjuntos de dados. Deste modo, será analisada a sensibilidade deste modelo face à variação do orçamento disponível, para o caso do conjunto de dados (i). Adicionalmente, será observada a influência que este modelo apresenta relativamente ao conjunto (ii), variando o orçamento disponível e as restrições (4.16) e (4.18) relativas, respetivamente, ao risco e desempenho médio dos investimentos ainda não realizados, e o conjunto (iii), variando o orçamento disponível.

Para além disso, os resultados alcançados com a utilização da metodologia desenvolvida serão comparados com os valores obtidos caso se cumprisse com o plano de investimentos atual da AdDP.

5.1 Plano de investimentos atual da AdDP

Para o desenvolvimento deste projeto, a AdDP forneceu o plano de investimentos atual para os próximos dez anos, de 2022 a 2031. Considere três conjuntos de dados diferentes: o conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i), o conjunto de investimentos em ativos (ii) e conjunto de investimentos tecnológicos (iii). Note-se que o conjunto (i) consiste na reunião dos conjuntos (ii) e (iii).

Inicialmente analisou-se qual seria o valor criado em cada ano do horizonte de planeamento do plano de investimentos atual da AdDP. Na Figura 17 apresentam-se os resultados desta análise para cada um dos conjuntos de dados. Considere que os parâmetros V_i , V_{ii} e V_{iii} correspondem ao valor total que é possível criar caso a AdDP concretizasse todas as propostas de investimento deste plano para os próximos dez anos, relativas ao conjunto (i), (ii) e (iii), respetivamente, onde $V_i = V_{ii} + V_{iii}$.

De notar que, o valor criado por cada proposta de investimento é calculado com base nos critérios utilizados na metodologia de otimização desenvolvida neste trabalho. No caso de investimentos em ativos recorre-se à equação (4.1) ou (4.2), se o ativo em que se vai investir é um ativo da AdDP ou um ativo futuro, respetivamente. Já no caso de ser um investimento tecnológico, o valor criado com a sua concretização é calculado através da equação (4.8).

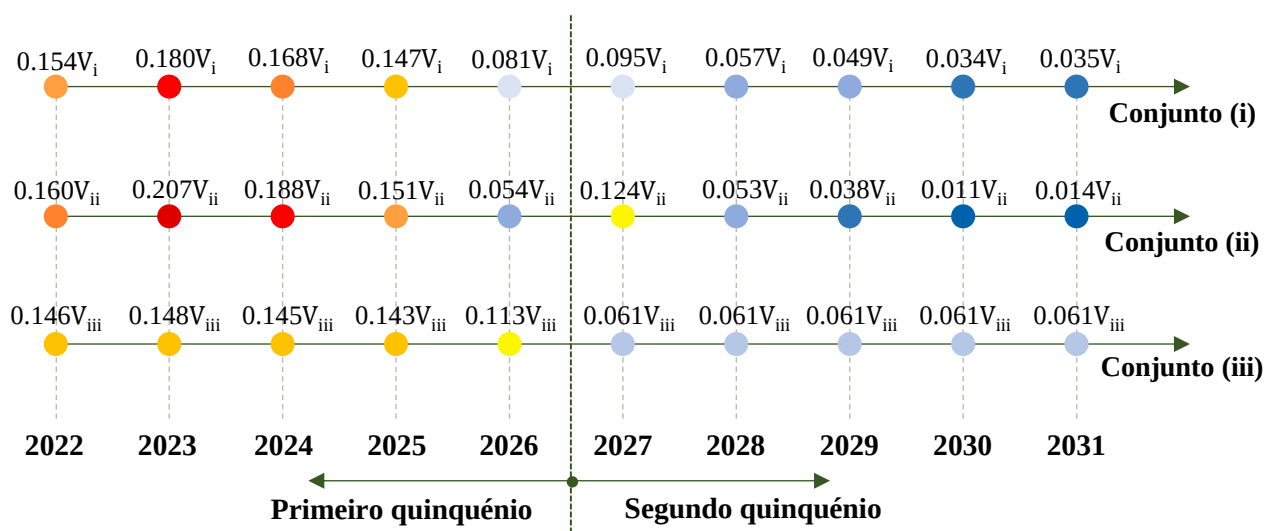


Figura 17 - Valor criado em cada ano do horizonte de planeamento do plano de investimentos atual da AdDP, para cada um dos conjuntos de dados

Uma das razões para o horizonte de planeamento do modelo de otimização desenvolvido neste projeto ser de cinco anos, deve-se ao facto de a maior parte da criação de valor para a empresa, segundo o plano atual da AdDP, ocorrer nos próximos cinco anos, de 2022 a 2026. Na Tabela 3 está indicado o valor criado nos próximos cinco anos, bem como o respetivo orçamento necessário, para cada um dos conjuntos de dados.

Considere que os parâmetros P , Z , W representam o orçamento total previsto investir nos próximos cinco anos, segundo o plano de investimentos atual da AdDP, para o conjunto (i), (ii), (iii), respetivamente, sendo que $P = Z + W$.

Tabela 3 - Valor criado nos próximos cinco anos por cada um dos conjuntos de dados, segundo o plano de investimentos atual da AdDP

	Conjunto (i)	Conjunto (ii)	Conjunto (iii)
Orçamento	P	Z	W
Valor criado	73% V _i	76% V _{ii}	69.5% V _{iii}

A título de exemplo, interpretando os dados relativos ao conjunto (i) indicados na Tabela 3, conclui-se que, no caso de a AdDP cumprir com o seu plano de investimentos atual, nos próximos cinco anos utilizará um orçamento P e criará 73% do valor V_i . Ou seja, no segundo quinquênio, de 2027 a 2031, será apenas criado 27% do valor V_i .

5.2 Modelo de otimização

Nesta secção serão analisados os resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização desenvolvido, para três conjuntos de dados diferentes: o conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i), o conjunto de investimentos em ativos (ii) e conjunto de investimentos tecnológicos (iii).

Para cada um dos conjuntos de dados serão realizados dois estudos:

- **Estudo I:** maximizar a criação de valor para a empresa, utilizando o orçamento total previsto investir nos próximos cinco anos segundo o plano de investimentos atual da AdDP;

- **Estudo II:** minimizar o orçamento necessário para criar o mesmo valor que o plano de investimentos atual da AdDP.

Para além disso, relativamente ao conjunto (i) foram comparados os resultados obtidos com o modelo de otimização e com o que está inscrito no plano de investimentos atual da AdDP. Ou seja, observou-se a diferença entre o ano em que o investimento deve ser realizado segundo o modelo de otimização e o ano que está indicado no plano atual da empresa.

Quanto ao conjunto de investimentos em ativos (ii), foi realizada uma análise de sensibilidade às restrições deste modelo relativas ao risco médio e ao desempenho médio dos investimentos ainda não realizados até ao fim de cada ano, isto é, às restrições (4.16) e (4.18), respetivamente.

5.2.1 Conjunto dos investimentos em ativos e dos investimentos tecnológicos

Relativamente ao estudo I, este tem como objetivo maximizar a criação de valor para a AdDP nos próximos cinco anos, resultante da concretização dos investimentos em ativos e dos investimentos tecnológicos, utilizando um orçamento P. Com a implementação do modelo de otimização, verificou-se que, com um orçamento P será criado 82% do valor V_i , ou seja, verifica-se um acréscimo de 12.3% do valor V_i $\left(\frac{82\%}{73\%} - 1 = 12.3\%\right)$ face ao plano de investimentos atual da AdDP.

Numa fase posterior, foi analisada qual a criação de valor para a empresa face à variação do orçamento disponível. Esta relação está representada no gráfico da Figura 18 e observa-se que a criação de valor cresce, aproximadamente, de forma linear com o aumento do orçamento disponível.

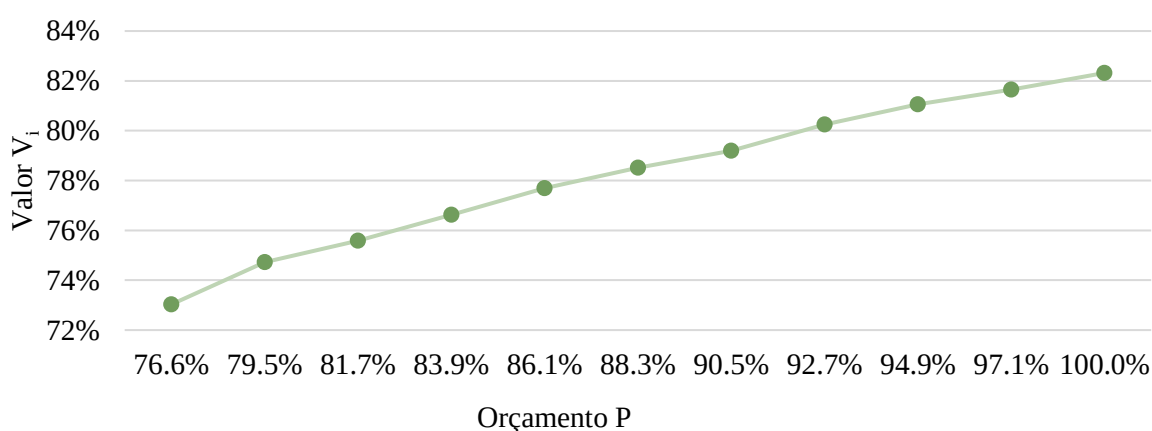


Figura 18 - Relação entre o valor criado para a empresa, devido à realização do conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i), e o orçamento disponível

No que diz respeito ao estudo II, este visa determinar o orçamento mínimo necessário para criar 73% do valor V_i , resultante da concretização dos investimentos em ativos e dos investimentos tecnológicos. No gráfico da Figura 18 constata-se que, para criar 73% do valor V_i é apenas necessário utilizar 76.6% do orçamento P. Por outras palavras, verifica-se uma redução de, aproximadamente, 23.4% do orçamento P $\left(\frac{76.6\% P}{1 P} - 1 = -23.4\%\right)$.

Os resultados obtidos, relativamente ao conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i), estão apresentados no gráfico da Figura 19. Adicionalmente, é também apresentado o valor criado, utilizando o modelo de otimização, caso a AdDP tivesse disponível metade do orçamento P, tendo sido verificada a criação de 56.3% do valor V_i (estudo III).

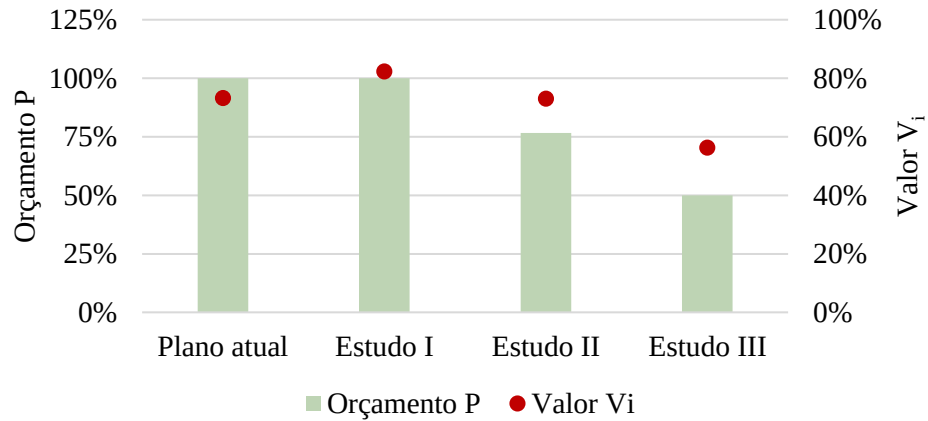


Figura 19 - Resultados da otimização desenvolvida face ao plano atual da AdDP, relativamente ao conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i)

Como já foi referido anteriormente, para além desta metodologia maximizar a criação de valor para a empresa, esta também retorna os investimentos que devem ser realizados no próximo quinquénio e em que ano deve ocorrer cada um deles. Deste modo, analisou-se qual diferença entre o ano em que o investimento deve ser realizado segundo o modelo de otimização e o ano que está indicado no plano de investimentos atual da empresa. Esta diferença é representada pelo parâmetro β , expresso em anos.

Nos gráficos da Figura 20 e da Figura 21 é indicada esta diferença de resultados, respetivamente, relativa a cada proposta de investimento em ativos, para o orçamento P e para 76.6% do orçamento P, que corresponde ao orçamento necessário para criar o mesmo valor que o plano atual da empresa.

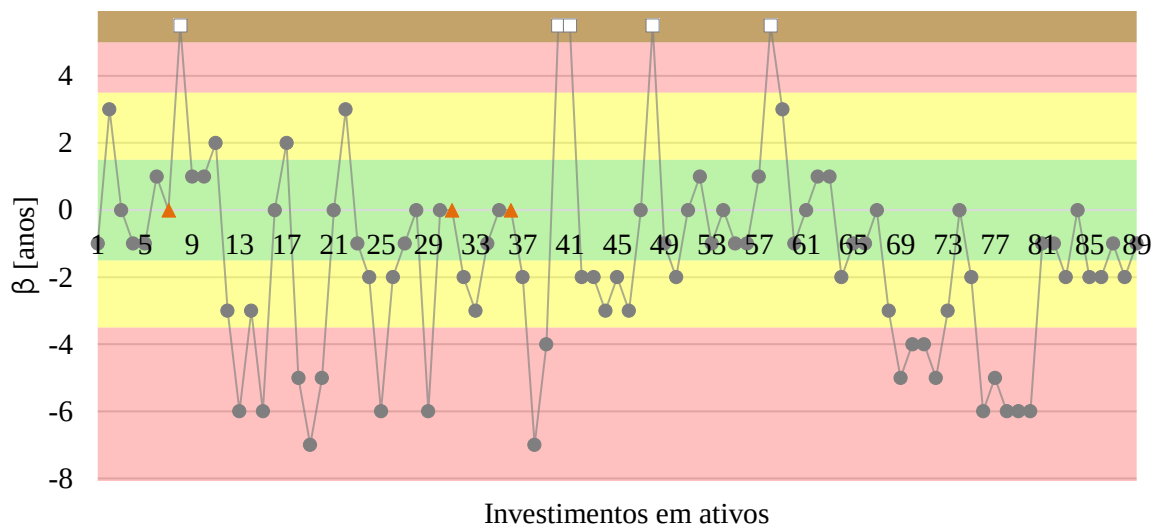


Figura 20 - Diferença, expressa em anos, dos resultados obtidos através do modelo de otimização e do plano atual da AdDP, para a totalidade do orçamento P

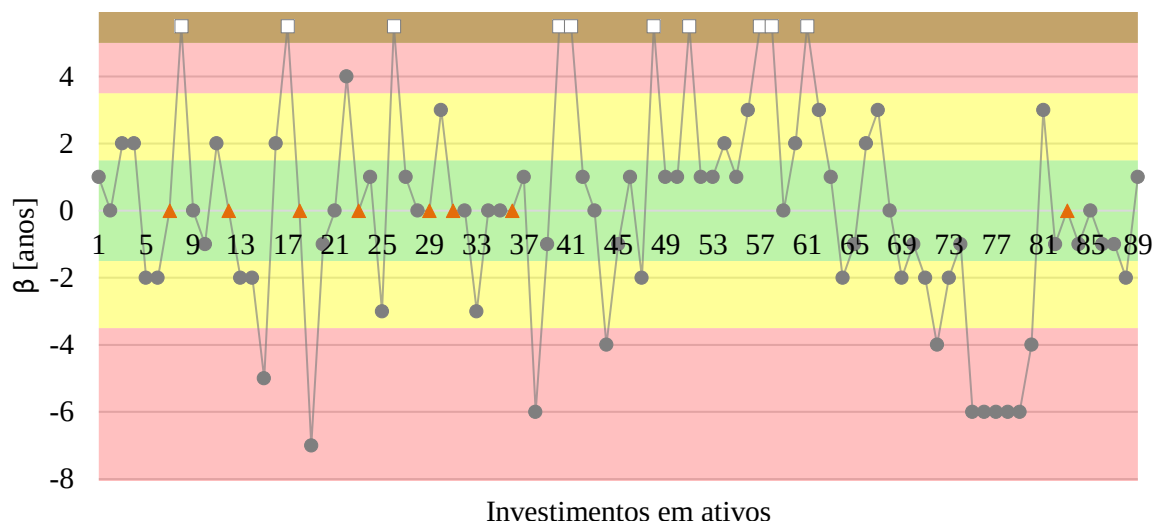


Figura 21 - Diferença, expressa em anos, dos resultados obtidos através do modelo de otimização e do plano atual da AdDP, para 76.6% do orçamento P

Quando o parâmetro β , representado no eixo das ordenadas (eixo vertical) dos gráficos da Figura 20 e Figura 21, assume um valor negativo significa que, de acordo com o modelo de otimização, o investimento é antecipado β anos. Se o parâmetro β for positivo indica que, segundo a metodologia desenvolvida, este investimento deve ser realizado β anos mais tarde do que o está indicado no plano atual da AdDP. Nestes dois gráficos, a zona sombreada a vermelho, onde $\beta \in [-\infty, -3.5] \cup [3.5, +\infty]$, indica que esta diferença é muito grande, a zona sombreada a amarelo representa uma diferença moderada e é definida por $\beta \in [-3.5, -1.5] \cup [1.5, 3.5]$. Relativamente à zona verde, representada por $\beta \in [-1.5, 1.5]$, indica que esta diferença é pequena.

Nos gráficos da Figura 20 e da Figura 21, os pontos apresentados com a forma triangular a cor de laranja indicam que esses investimentos, tanto no plano atual da AdDP, como no modelo de otimização devem ser realizados no segundo quinquénio, ou seja, no decorrer dos anos de 2027 a 2031. Os pontos com a forma quadrangular a cor branca, representados na zona sombreada a castanho, indicam que, segundo o plano atual da empresa, esses investimentos devem ser realizados nos próximos cinco anos mas, de acordo com o modelo de otimização estes apenas devem ser concretizados no segundo quinquénio.

Com o intuito de analisar a relação que poderá existir entre o plano de investimentos atual da empresa e os resultados obtidos através do modelo de otimização desenvolvido, foi calculado o coeficiente de correlação para cada um dos casos dos gráficos da Figura 20 e Figura 21. Este coeficiente pode assumir um intervalo de valores de $[-1, 1]$ e quanto maior for o seu valor em módulo, maior será o seu grau de relação linear. Quando o coeficiente de correlação assume um valor positivo indica uma relação linear positiva, caso apresente um valor negativo significa que existe uma correlação negativa ou inversa entre as duas variáveis.

No caso do gráfico da Figura 20, que corresponde à utilização da totalidade do orçamento P, o coeficiente de correlação assume o valor 0.02, já no caso do gráfico da Figura 21, cujo orçamento é de 76.6% do orçamento P, apresenta o valor de -0.10. Estes dois valores são muito próximos de zero, o que significa que não existe relação entre os resultados presentes no plano de investimentos atual da AdDP e os resultados obtidos com a metodologia desenvolvida. Esta conclusão vai ao encontro do esperado, pois os resultados obtidos através do modelo de otimização resultam de um conjunto de critérios e condições, enquanto que o plano atual da empresa é elaborado sem este tipo de critérios na tomada de decisão de concretizar, ou não, um determinado investimento.

O cálculo do coeficiente de correlação apenas foi realizado para os investimentos em ativos, pois a maioria dos investimentos tecnológicos devem ser concretizados todos os anos e grande parte destes apresenta um carácter obrigatório.

5.2.2 Conjunto dos investimentos em ativos

No que diz respeito ao estudo I, com recurso ao modelo de otimização pretende-se maximizar o valor criado para a AdDP nos próximos cinco anos utilizando um orçamento Z. Para este estudo verificou-se que é criado 91% do valor V_{ii} , ou seja, observa-se um aumento percentual de criação de valor de 19.7% do valor V_{ii} ($\frac{91\%}{76\%} - 1 = 19.7\%$).

Seguidamente, esta metodologia foi testada para diferentes valores de orçamento disponível e foi analisado qual seria o valor criado para a empresa. Esta relação está representada no gráfico da Figura 22 e observa-se que o valor criado cresce linearmente com o aumento do orçamento disponível, tal como se verificou no caso do conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i).

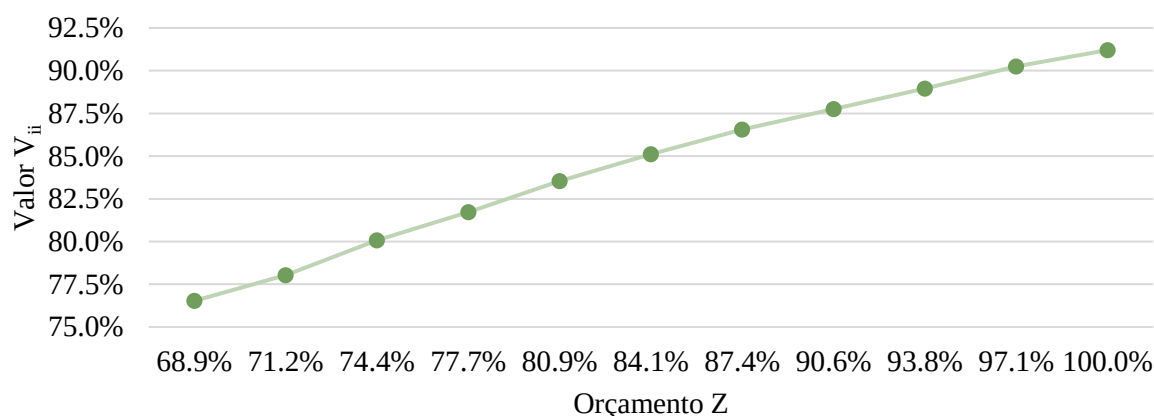


Figura 22 - Relação entre o valor criado para a empresa, devido à realização do conjunto de investimentos em ativos (ii), e o orçamento disponível

Face ao estudo II, que tem como objetivo minimizar o orçamento necessário para criar 76% do valor V_{ii} , através do gráfico da Figura 22 conclui-se que, com recurso ao modelo de otimização, é necessário 68.9% do orçamento Z, isto é, constata-se uma redução percentual de 31.1% do orçamento Z ($\frac{68.9\%Z}{1Z} - 1 = -31.1\%$).

No gráfico da Figura 23 encontram-se indicados todos estes resultados alcançados com o modelo de otimização para o conjunto de investimentos em ativos (ii), bem como o valor criado apenas com metade do orçamento Z, que corresponde a 61.3% do valor V_{ii} (estudo III).

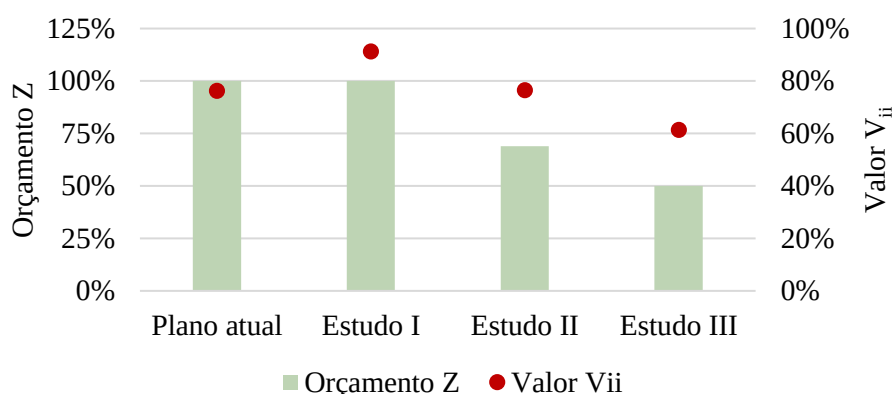


Figura 23 - Resultados da otimização desenvolvida face ao plano atual da AdDP, relativamente ao conjunto de investimentos em ativos (ii)

De seguida, com vista a analisar qual seria o valor criado para a empresa caso se alterasse duas das restrições deste modelo de otimização, que são direccionadas exclusivamente aos investimentos em ativos, foram estabelecidos dois cenários para o conjunto de investimentos em ativos:

- Cenário 1: a restrição (4.16), que está relacionada com o nível de risco médio dos investimentos em ativos ainda não realizados até ao fim de cada ano, foi variada para diferentes valores de risco médio. Esta restrição assume uma nova formulação representada pela restrição (5.1). Considere que o risco médio corresponde ao parâmetro R_m ;

$$\sum_{i \in N} r_i - \sum_{m=1}^k \sum_{i \in N} (x_{m,i} \times r_i) \leq R_m \times \left[|N| - \sum_{m=1}^k \sum_{i \in N} x_{m,i} \right], \forall k \in A \quad (5.1)$$

- Cenário 2: a restrição (4.18), que está relacionada com o nível de desempenho médio dos investimentos em ativos ainda não realizados até ao fim de cada ano, foi variada para diferentes valores de desempenho médio. Esta restrição assume uma nova formulação representada pela restrição (5.2). Considere que o desempenho médio corresponde ao parâmetro D_m .

$$\sum_{i \in N} d_i - \sum_{m=1}^k \sum_{i \in N} (x_{m,i} \times d_i) \geq D_m \times \left[|N| - \sum_{m=1}^k \sum_{i \in N} x_{m,i} \right], \forall k \in A \quad (5.2)$$

De salientar que o horizonte de planeamento dos investimentos considerado nesta metodologia desenvolvida é de cinco anos, ou seja, de 2022 a 2026, e que este estudo foi realizado sempre para o mesmo valor orçamental. Considerou-se um valor orçamental de 68.9% do orçamento Z, que permite criar 76% do valor V_{ii} .

Uma vez que, segundo a matriz de risco representada na Figura 14 da secção 4.1.1, o risco de falha de um ativo é classificado numa escala de [0,25], a restrição (4.16) indica que o risco médio (R_m) dos investimentos em ativos ainda não realizados até ao fim de cada ano não pode exceder o valor sete. Deste modo, o cenário 1 consiste na variação do parâmetro R_m desde o valor mais baixo que ele pode assumir, de forma ao problema apresentar uma solução, até ao valor catorze, visto que, quando o risco de um ativo assume o valor quinze já está situado na zona vermelha da matriz de risco, isto é, na zona de um nível de risco elevado.

No caso de estudo em particular da AdDP, o valor mínimo que o parâmetro R_m pode assumir é $R_m = 5.3$ e constatou-se que, para qualquer valor $R_m \in U$, o valor criado para a empresa com a realização dos investimentos é exatamente o mesmo, ou seja, é criado 76% do valor V_{ii} . Considere U o conjunto dos valores que o parâmetro R_m assume nesta análise, define-se $U \in \{5.3, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14\}$.

No gráfico da Figura 24 está indicado o risco médio anual dos investimentos ainda não realizados até ao fim de cada ano, consoante o valor do parâmetro R_m . De notar que, a zona sombreada a amarelo, que corresponde ao intervalo de risco [6,8], representa um nível médio do risco e a zona sombreada a verde, representada pelo intervalo de risco [4,6], indica que o nível de risco de falha dos ativos é baixo.

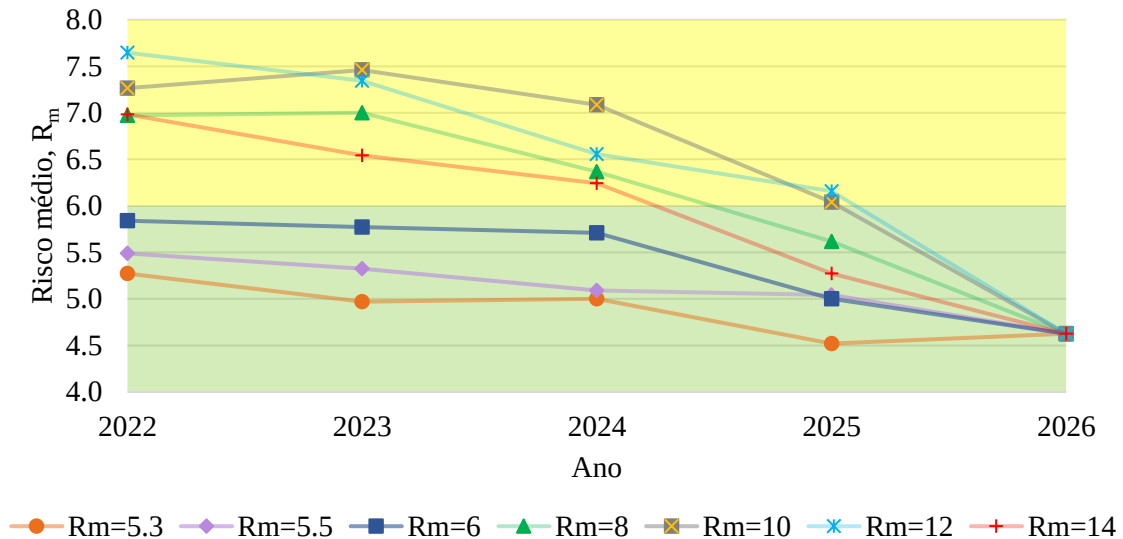


Figura 24 - Risco médio anual dos investimentos em ativos ainda não realizados até ao fim de cada ano

Posteriormente, realizou-se um estudo análogo ao desempenho dos ativos. Sabendo que a classificação do desempenho de um ativo apresenta uma escala de $[0,5]$, representada na Figura 11 da secção 3.3.1. O desempenho de um ativo quando assume um valor abaixo de três é considerado medíocre, ou seja, inaceitável. Logo, a restrição (4.18) indica que o desempenho médio dos investimentos em ativos ainda não realizados até ao fim de cada ano deve ser igual ou superior a três.

Deste modo, relativamente ao cenário 2, analisou-se qual o valor criado para a empresa desde que o parâmetro D_m assume o valor três, até ao valor mais alto que ele pode assumir, de forma ao problema apresentar sempre uma solução admissível. No caso de estudo em questão, o valor mais alto que este parâmetro pode apresentar é $D_m = 4.2$ e verificou-se a mesma situação que no cenário 1. Para $D_m \in T$, o valor criado para a empresa com a realização dos investimentos é sempre o mesmo, ou seja, é criado 76% do valor V_{ii} . Considere T o conjunto dos valores que o parâmetro D_m assume neste estudo, define-se $T \in \{3, 3.5, 4, 4.2\}$.

No gráfico da Figura 25 estão indicados os valores do desempenho médio anual dos investimentos ainda não realizados até ao fim de cada ano, em função do valor do parâmetro D_m . Considere que, no gráfico da Figura 25, a zona sombreada a verde indica o bom desempenho do ativo, representada pelo intervalo de desempenho $[3.75, 4.5]$. A zona sombreada a amarelo representa o desempenho satisfatório do ativo e corresponde ao intervalo de desempenho $[3, 3.75]$.

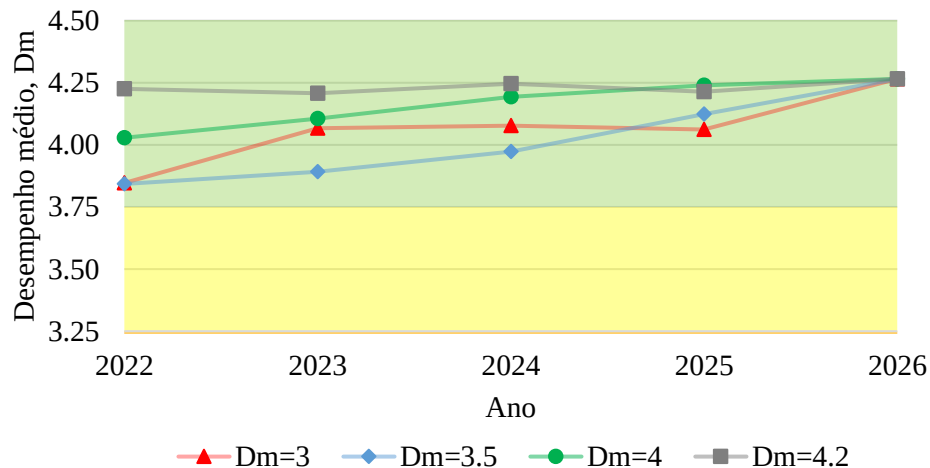


Figura 25 - Desempenho médio anual dos investimentos em ativos ainda não realizados até ao fim de cada ano

Em suma, conclui-se que, variando os parâmetros R_m e D_m , o valor criado para a empresa com a realização dos investimentos em ativos será sempre o mesmo, devido às restrições (4.16) e (4.18) deste modelo desenvolvido apresentarem uma folga, o que permite alterá-las e, simultaneamente, manter o valor da função objetivo.

Deste modo, quanto mais se restringe estas duas condições, ou seja, quando menor for o parâmetro R_m e maior for o parâmetro D_m , maior segurança terá a empresa de que os ativos associados aos investimentos ainda não realizados, apresentem um risco e um desempenho adequados para um bom funcionamento, forçando a que os investimentos em ativos com pior desempenho e maior risco de falha sejam realizados primeiramente.

5.2.3 Conjunto dos investimentos tecnológicos

Por último, avaliou-se qual a influência que o conjunto de investimentos tecnológicos apresenta face ao modelo de otimização desenvolvido. Após implementar o modelo de otimização, em prol do estudo I, conclui-se que, no caso da AdDP disponibilizar um orçamento W para a realização de investimentos tecnológicos, nos próximos cinco anos é criado 70.1% do valor V_{iii} . Ou seja, o aumento percentual do valor criado para a empresa foi de apenas 0.9% do valor V_{iii} ($\frac{70.1\%}{69.5\%} - 1 = 0.9\%$), relativamente ao plano de investimentos atual da AdDP.

Por meio do modelo de otimização desenvolvido, foram atribuídos diferentes valores ao orçamento disponível pela empresa e, posteriormente, analisou-se o valor criado para a AdDP em função da variação do orçamento disponível. Esta relação está representada no gráfico da Figura 26 e concluiu-se que, com o aumento do orçamento disponível, há um aumento do valor criado para a empresa.

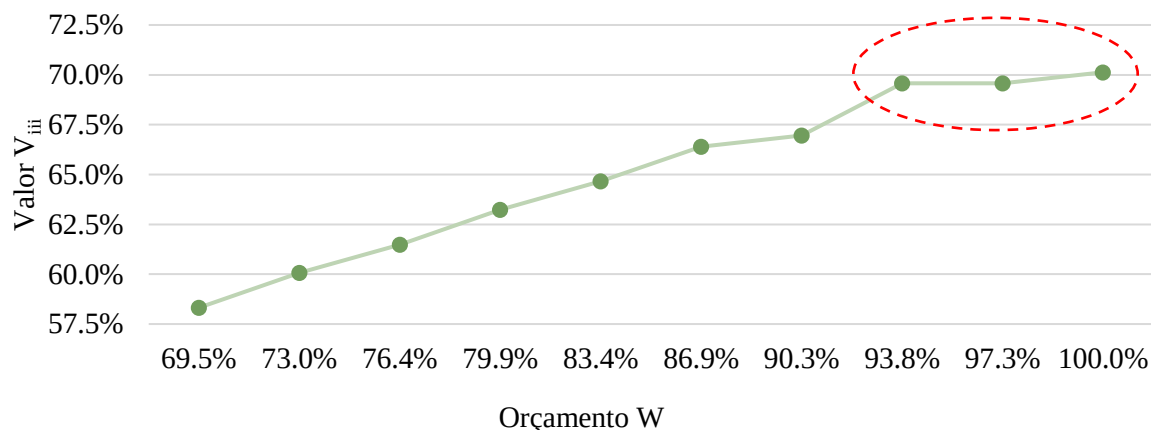


Figura 26 - Relação entre o valor criado para a empresa, devido à realização do conjunto de investimentos tecnológicos (iii), e o orçamento disponível

Além do mais, no gráfico da Figura 26 observa-se que a criação de valor cresce com inclinação maior até 86.9% do orçamento W . A partir deste valor orçamental, esta inclinação diminui e quase estabiliza. No intervalo $[93.8\%W, 97.3\%W]$ verifica-se que o valor criado é constante. Isto deve-se ao facto de a grande maioria dos investimentos tecnológicos apresentarem quantias avultadas e, uma vez que com o aumento do orçamento disponível se tende a realizar mais investimentos, ficam a faltar concretizar cada vez menos. Desta forma, como cada ponto do gráfico apresenta apenas uma diferença orçamental de aproximadamente 3.5%, por vezes este aumento não é suficiente para realizar mais algum investimento.

No gráfico da Figura 27 é apresentado, com maior detalhe, a zona rodeada a tracejado no gráfico da Figura 26. Através desta zona assinalada é possível dar resposta ao estudo II. A questão que se coloca neste estudo consiste em saber qual o orçamento mínimo necessário para criar 69.5%

do valor V_{iii} , utilizando o modelo de otimização. Através do gráfico da Figura 27 observa-se que, para criar 69.5% do valor V_{iii} é necessário 93.8% do orçamento W , ou seja, verifica-se uma redução orçamental apenas de 6.2% $\left(\frac{93.8\% W}{1 W} - 1 = -6.2\%\right)$.

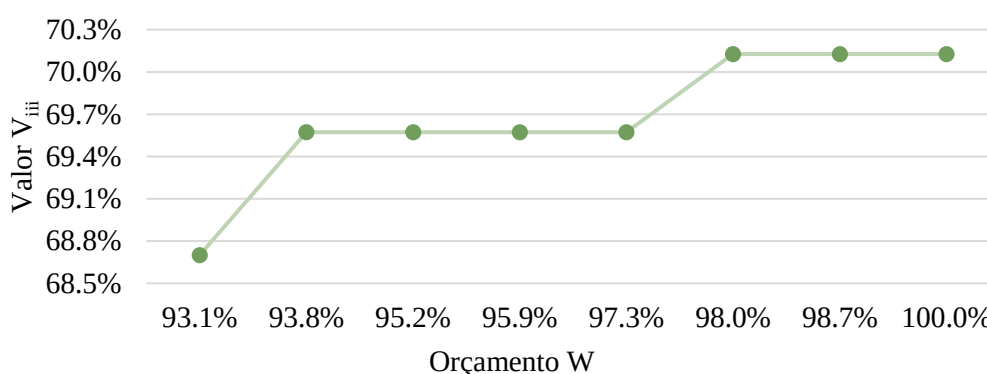


Figura 27 - Relação entre o valor criado para a empresa, devido à realização do conjunto de investimentos tecnológicos (iii), e o orçamento disponível, para um menor intervalo de orçamento

No gráfico da Figura 28 estão registados estes resultados obtidos com recurso ao modelo de otimização desenvolvido, aplicado ao conjunto de investimentos tecnológicos (iii). Para além disso, também se encontra indicado o valor criado para metade do orçamento W , que corresponde a 48.8% do valor V_{iii} (estudo III).

De realçar que, através da análise do gráfico da Figura 28 constata-se que, para o conjunto de investimentos tecnológicos, a diferença entre o valor criado segundo a metodologia desenvolvida e o plano atual da empresa, para o orçamento W , é pouco significativa.

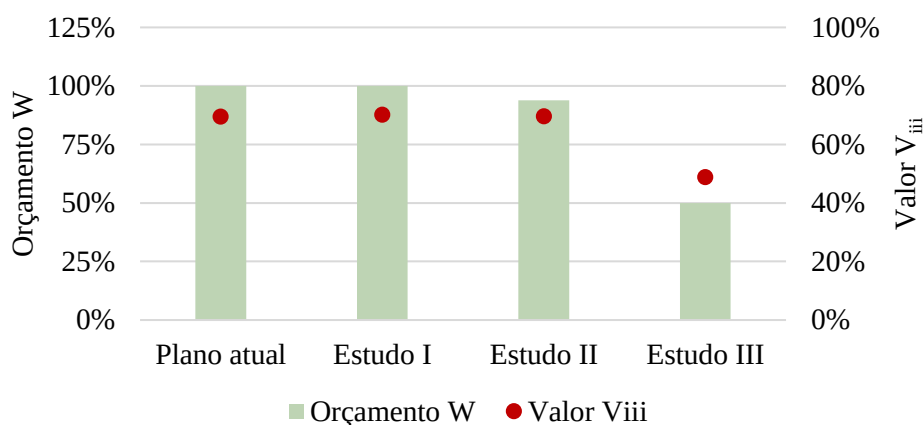


Figura 28 - Resultados da otimização desenvolvida face ao plano atual da AdDP, relativamente ao conjunto de investimentos tecnológicos (iii)

5.3 Síntese dos resultados

Os resultados obtidos relativamente ao plano de investimentos atual da AdDP e aos dois estudos realizados para os conjuntos de dados (i), (ii) e (iii) estão indicados na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, respetivamente.

De notar que, o estudo I tem como objetivo maximizar a criação de valor utilizando o orçamento total previsto investir nos próximos cinco anos segundo o plano de investimentos atual da AdDP. O estudo II consiste em minimizar o orçamento necessário para criar o mesmo valor que este plano da empresa.

Tabela 4 - Resultados obtidos para o conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i)

	Plano de investimentos atual da AdDP	Modelo de otimização	
		Estudo I	Estudo II
Orçamento	P	P	76.6% P
Valor criado	73% V_i	82% V_i	73% V_i

Tabela 5 - Resultados obtidos para o conjunto de investimentos em ativos (ii)

	Plano de investimentos atual da AdDP	Modelo de otimização	
		Estudo I	Estudo II
Orçamento	Z	Z	68.9% Z
Valor criado	76% V_{ii}	91% V_{ii}	76% V_{ii}

Tabela 6 - Resultados obtidos para o conjunto de investimentos tecnológicos (iii)

	Plano de investimentos atual da AdDP	Modelo de otimização	
		Estudo I	Estudo II
Orçamento	W	W	93.8% W
Valor criado	69.5% V_{iii}	70.1% V_{iii}	69.5% V_{iii}

Após analisar estes valores conclui-se que, relativamente ao estudo I, o aumento do valor criado no caso do conjunto (i), utilizando o modelo de otimização desenvolvido, resulta maioritariamente da otimização realizada ao conjunto de investimentos em ativos (ii).

Adicionalmente, com os resultados obtidos no estudo I foi analisado o valor criado em cada ano do horizonte de planeamento do plano de investimentos atual da AdDP, para cada um dos conjuntos de dados. Deste modo, na Figura 29 está indicada a criação de valor anual nos próximos cinco anos, quando se tem disponível um orçamento igual ao do plano de investimentos atual da AdDP. Ou seja, quando é utilizado um orçamento P, Z e W para realizar investimentos do conjunto (i), (ii), e (iii), respetivamente. Para além disso está indicada qual a criação de valor que fica por concretizar para o segundo quinquénio, ou seja, para os anos de 2027 a 2031.

Quanto ao estudo II verifica-se que, através da implementação do modelo de otimização, o orçamento necessário para criar o mesmo valor que o plano atual da AdDP é significativamente menor para os três conjuntos de dados. Contudo, a redução deste orçamento necessário é maior no caso do conjunto de investimentos em ativos (ii), tal como se observou no estudo I.

Isto deve-se ao facto de a maioria dos investimentos tecnológicos necessitarem de ser realizados todos os anos e, para além disso, grande parte destes apresentam um carácter obrigatório, o que dificulta a otimização. No entanto, quando se recorre a um modelo deste tipo, para além de se objetivar otimizar os resultados, também se perspetiva encontrar uma solução e, neste caso em particular, priorizar os investimentos e, conseqüentemente, descobrir qual o momento mais indicado para concretizar cada um deles. Deste modo, pode-se concluir que esta ferramenta de

otimização deve ser aplicada a investimentos em ativos e a investimentos tecnológicos, pois acarreta diversas vantagens para a empresa.

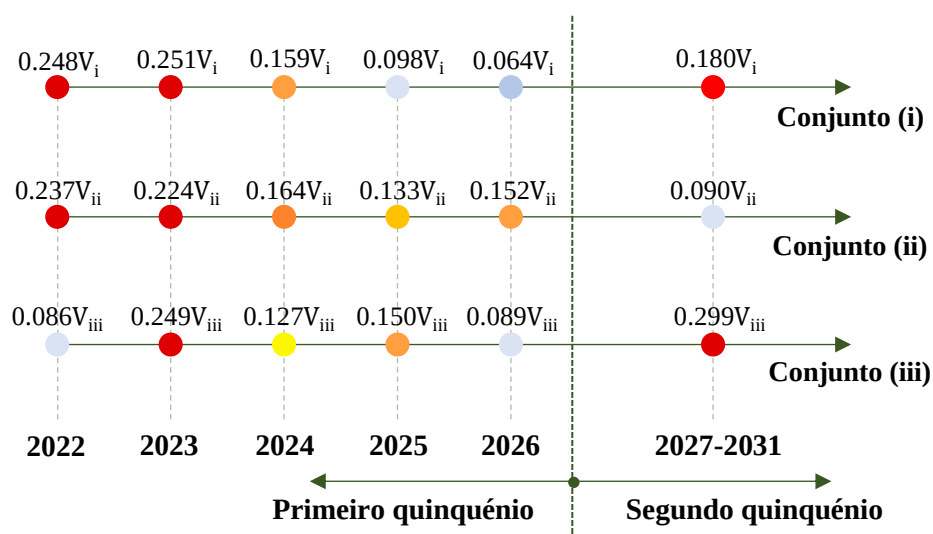


Figura 29 – Valor criado em cada ano do horizonte de planeamento do modelo de otimização relativamente ao estudo I, para cada um dos conjuntos de dados

6 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

O presente projeto consistiu no desenvolvimento de uma ferramenta de otimização aplicada ao plano de investimento da AdDP. Esta metodologia desenvolvida consiste num modelo de programação linear binário, que visa maximizar a criação de valor com a concretização dos investimentos e apresenta várias restrições, tanto a nível económico, funcional, bem como no caso do investimento apresentar uma obrigatoriedade. Este modelo indica os investimentos que devem ser concretizados e o melhor momento para os realizar, no horizonte de planeamento de cinco anos, ou seja, de 2022 a 2026.

Na fase embrionária deste projeto, realizou-se uma análise ao plano de investimentos atual da AdDP e, por conseguinte, as propostas de investimento foram agrupadas em duas categorias: investimentos em ativos e investimentos tecnológicos. Posteriormente à idealização do modelo de otimização, este foi implementado através do software CPLEX, que demonstrou ser uma ferramenta muito útil, que soluciona problemas com um elevado número de variáveis de decisão e com tempos de resolução curtos.

Para a análise de resultados, foi introduzido no modelo três conjuntos de dados diferentes: o conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i), o conjunto de investimentos em ativos (ii) e conjunto de investimentos tecnológicos (iii). De notar que, o conjunto (i) consiste na reunião dos conjuntos (ii) e (iii).

Numa primeira fase, foi realizada uma análise de sensibilidade aos três conjuntos de dados, onde se variou o orçamento disponível pela AdDP e verificou-se que, para todos os conjuntos, o valor criado para a empresa aumenta de uma forma aproximadamente linear, com o aumento do orçamento disponível.

Relativamente ao conjunto de investimentos em ativos e investimentos tecnológicos (i), segundo o plano de investimentos atual da AdDP, que apresenta os investimentos previstos realizar nos próximos dez anos e que na totalidade perfazem o valor V_i , constata-se que, nos próximos cinco anos é criado cerca de 73% do valor V_i e é utilizado um orçamento P. Contudo, com recurso ao modelo de otimização verifica-se que, relativamente ao estudo I, com o orçamento P é criado 82% do valor V_i , ou seja, ocorre um acréscimo de 12.3% do valor V_i . Por outro lado, face ao estudo II, para criar 73% do valor V_i , é somente necessário utilizar 76.6% do orçamento P, ou seja, há uma redução de 23.4% do orçamento necessário.

No que diz respeito ao conjunto (ii), analisando exclusivamente os investimentos em ativos integrantes no plano atual da AdDP que na totalidade criam o valor V_{ii} , nos próximos cinco anos observa-se a criação de, aproximadamente, 76% do valor V_{ii} , utilizando um orçamento Z. Consequentemente, recorrendo à metodologia desenvolvida, conclui-se que, relativamente ao estudo I, com um orçamento Z é possível criar 91% do valor V_{ii} , ou seja, há um acréscimo de valor de 19.7% do valor V_{ii} . Quanto ao estudo II, para criar 76% do valor V_{ii} , é necessário aproximadamente 68.9% do orçamento Z, isto é, constata-se uma redução de 31.1% do orçamento necessário.

Em relação ao conjunto (iii), após estudar apenas os investimentos tecnológicos pertencentes ao plano atual da AdDP, que no seu total permitem criar um valor V_{iii} , a concretização dos investimentos desta categoria delineados para os próximos cinco anos permitem criar 69.5% do valor V_{iii} , com um orçamento W . Em contrapartida, utilizando o modelo de otimização, em prol do estudo I, com o orçamento W é criado 70.1% do valor V_{iii} , ou seja, o aumento percentual de valor foi de apenas 0.9% do valor V_{iii} . Por outro lado, face ao estudo II, para criar 69.5% do valor V_{iii} , é necessário 93.8% do orçamento W , ou seja, verifica-se uma redução de apenas 6.2% do orçamento necessário.

Estes resultados obtidos para os conjuntos de dados (i), (ii) e (iii), estão indicados na secção 5.3, na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, respetivamente. Deste modo, conclui-se que o modelo de otimização desenvolvido cumpre com os objetivos do estudo I e do estudo II. Contudo, verifica-se que, relativamente ao conjunto (i), a maximização do valor criado, no caso do estudo I, e a minimização do orçamento necessário, no caso do estudo II, deve-se principalmente ao conjunto de investimentos em ativos (ii). Isto acontece devido à maior parte dos investimentos tecnológicos propostos no plano atual da AdDP necessitarem de ser realizados todos os anos e, para além disso, grande parte destes apresentam um carácter obrigatório, o que dificulta a otimização. Contudo, constata-se que esta ferramenta de otimização traz diversas vantagens quando aplicada a investimentos em ativos e a investimentos tecnológicos pois, para além de otimizar os investimentos, também os prioriza e indica o momento mais adequado para os concretizar.

Numa fase posterior, foi realizada uma análise ao valor criado para a empresa caso se alterasse duas das restrições do modelo de otimização, que são direcionadas exclusivamente ao risco e ao desempenho dos ativos. Desta forma, percebeu-se que, com a variação destas duas restrições, o valor criado para a empresa devido à concretização de investimentos em ativos, mantém-se sempre constante, pois estas restrições apresentam uma folga, o que permite alterá-las e, ao mesmo tempo, manter o valor da função objetivo. Por conseguinte, quanto mais se restringe estas duas condições, maior segurança trará à empresa, já que assegura que os ativos associados a cada um dos investimentos ainda não realizados apresentem um risco e um desempenho adequados para seu correto funcionamento, forçando a que os investimentos em ativos com pior desempenho e maior risco de falha sejam realizados primeiramente.

Por último, com os resultados obtidos com o conjunto (i), foi comparado o ano em que o investimento deve ser realizado segundo a ferramenta de otimização e o ano que está indicado no plano de investimentos atual da AdDP. Este estudo foi apenas realizado para os investimentos em ativos, pois a maioria dos investimentos tecnológicos devem ser concretizados todos os anos e grande parte destes apresenta um carácter obrigatório, o que leva a que este estudo não tenha grande relevância para o caso dos investimentos tecnológicos.

Nesta análise foi avaliada se existe alguma relação entre os resultados obtidos com o modelo de otimização e o plano atual da empresa. Para isso, foi calculado o coeficiente de correlação para os resultados obtidos com o orçamento total previsto utilizar nos próximos cinco anos segundo o plano atual da empresa e com 76.6% desse orçamento. Desta forma, sabendo que o coeficiente de correlação indica se existe, ou não, uma relação linear entre as variáveis, estes foram calculados e assumiram, respetivamente, os valores de 0.02 e -0.10. Estes coeficientes de correlação apresentam valores muito próximos de zero, o que significa que não existe relação entre os resultados presentes no plano de investimentos atual da AdDP e os resultados obtidos com a metodologia desenvolvida, o que faz todo o sentido, uma vez que os resultados obtidos através do modelo de otimização resultam de uma tomada de decisão fundamentada em critérios de custo, risco e desempenho, enquanto que, neste momento, o plano atual da empresa é elaborado sem ter em conta estes de critério.

Em suma, este projeto cumpriu com os objetivos propostos inicialmente, potenciando um planeamento fundamentado de todos investimentos que se pretendem concretizar. Deste modo, conduz a uma melhor gestão dos ativos da AdDP, visto que garante o desempenho adequado dos ativos, promove a gestão do risco e aumenta a vida útil remanescente dos ativos, o que potencia uma maior fiabilidade e qualidade do serviço prestado. Para além disso, tendo em conta as limitações financeiras e os escassos recursos humanos existentes na empresa, este trabalho dá um contributo para a determinação dos ativos que devem ser alvo de investimento, bem como para o respetivo planeamento e distribuição ao longo do tempo.

A metodologia desenvolvida neste projeto representa uma primeira abordagem na implementação de um modelo de otimização aplicado ao plano de investimentos de um sistema de abastecimento de água.

A criação deste modelo foi realizada com o intuito de criar as bases e a estrutura principal da otimização. No entanto, os critérios utilizados nesta otimização são transversais aos diversos investimentos existentes na AdDP, pelo que, no futuro seria importante adotar alguns critérios associados a indicadores de desempenho e de risco dos ativos, bem como realizar inspeções mais detalhadas aos ativos da empresa. De notar que, alguns destes indicadores já são calculados pela AdDP.

Para além disso, seria uma mais valia para a empresa adotar uma abordagem diferente deste modelo desenvolvido para o caso dos investimentos tecnológicos, visto que, na maioria dos casos, há necessidade de os realizar anualmente, muitas das vezes devido a contratos já realizados.

O modelo desenvolvido neste projeto consiste num problema de ordem combinatória que, à medida que o problema cresce, o número de variáveis de decisão aumenta. Consequentemente, muitas vezes os métodos exatos, como o CPLEX, não conseguem encontrar uma solução para o problema, pelo que, um outro desafio futuro passa por recorrer a algoritmos genéticos para resolver o modelo. Estes algoritmos, que consistem num método heurístico, proporcionam uma solução de ótima qualidade, permitindo solucionar o problema para um horizonte de planeamento mais longo. Desta forma, tornar-se-á possível resolver o problema para o horizonte de planeamento do plano de investimentos atual da AdDP, ou seja, para os próximos dez anos.

Referências

- Águas de Portugal, S.A. 2014, Gestão de Ativo AdP: Guia Metodológico.
- Águas de Portugal, S.A. 2015a, "Grupo AdP: História." <https://www.adp.pt/pt/grupo-adp/historia/?id=7>.
- Águas de Portugal, S.A. 2015b, "O ciclo urbano da água." accessed 04 abril. <https://www.adp.pt/pt/atividade/o-que-fazemos/o-ciclo-urbano-da-agua/?id=28>.
- Águas do Douro e Paiva. 2004, Captação de Lever.
- Águas do Douro e Paiva. 2018, Estação elevatória de Jovim.
- Águas do Douro e Paiva, S.A. 2019, Relatório & Contas.
- Águas do Douro e Paiva, S.A. 2021, Manual de Governo da Sociedade da AdDP.
- Alegre, Helena, and Dídia Covas. 2010, *Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água. Uma abordagem centrada na reabilitação*. Lisboa.
- Almeida, Nuno, João Vieira, Jaime Gabriel Silva, Cristina Castro, Branca Lima, and Manuela Trindade. 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*, 226-237.
- Covas, Dídia, Marta Cabral, Alexandre Pinheiro, Valentina Marchionni, Sara Antunes, Nuno Lopes, Luis Mamouros, and Nuno Brôco. 2018, *Custos de Construção de Infraestruturas Associadas ao Ciclo Urbano da Água*. Lisboa.
- Dandy, Graeme, and M. Engelhardt. 2001, "Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement Using Genetic Algorithms." *Journal of Water Resources Planning and Management-asce - J WATER RESOUR PLAN MAN-ASCE* 127. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:4(214).
- Dandy, Graeme, and M. Engelhardt. 2006, "Multi-Objective Trade-Offs between Cost and Reliability in the Replacement of Water Mains." *Journal of Water Resources Planning and Management* 132:79-88. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:2(79).
- Departamento de Gestão de Ativos. 2019, Avaliação da Condição dos Ativos.
- Departamento de Gestão de Ativos. 2020, "Gestão do Risco dos Ativos."
- EPAL, Empresa Portuguesa das Águas Livres. 2021, Gestão de Ativos: adoção de um novo paradigma. Lisboa.
- ERSAR. 2020, Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal: caracterização do setor de águas e resíduos.
- Estado Português, and S.A. Águas do Douro e Paiva. 2017, Anexo III: Estudo de Viabilidade Económica e Financeira.
- French, Simon, Tim Bedford, and Elizabeth Atherton. 2005, "Supporting ALARP decision making by cost benefit analysis and multiattribute utility theory." *Journal of Risk Research* 8 (3):207-223. doi: 10.1080/1366987042000192408.
- Gestão de Ativos e Engenharia. 2020, Manual de Gestão de ativos e Engenharia.
- Hillier, Frederick S. 2014, *Introduction to Operations Research*: McGraw-Hill Higher Education.

- Li, Joshua Qiang, and Sue McNeil. 2019, "Data envelopment analysis for highway asset investment assessment." *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 8 (1):117-128. doi: 10.1016/j.jtte.2019.06.001.
- Linkov, I., F. K. Satterstrom, G. Kiker, C. Batchelor, T. Bridges, and E. Ferguson. 2006, "From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: recent developments and applications." *Environ Int* 32 (8):1072-93. doi: 10.1016/j.envint.2006.06.013.
- LNEC, and ERSAR. 2021, *Guia de avaliação da qualidade dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores*.
- Lopes, Maria Dulce Soares. 2018, *Análise de Projetos de Investimento*. 4ª ed. Porto: U.Porto Editorial.
- NP ISO 55000. 2016, *Gestão de ativos - Visão geral, princípios e terminologia*. Caparica: IPQ.
- Popov, G., B.K. Lyon, and B. Hollcroft. 2016, *Risk Assessment: A Practical Guide to Assessing Operational Risks*: Wiley.
- Soares, Isabel, José Moreira, Carlos Pinho, and João Couto. 2015, *Decisões de Investimento*. 4th ed. Lisboa: Sílabo.
- Vieira, João, Marta Cabral, Nuno Almeida, Jaime Gabriel Silva, and Dídia Covas. 2020, "Novel methodology for efficiency-based long-term investment planning in water infrastructures." *Structure and Infrastructure Engineering* 16 (12):1654-1668. doi: 10.1080/15732479.2020.1722715.
- Zangenehmadar, Zahra, Osama Moselhi, and Sasan Golnaraghi. 2020, "Optimized planning of repair works for pipelines in water distribution networks using genetic algorithm." *Engineering Reports* 2 (6). doi: 10.1002/eng2.12179.

ANEXO A: Critérios utilizados para determinar o nível de risco das infraestruturas

Tabela A1 - Critérios para determinar o nível de risco associado à construção civil das ETA

	Critérios	Indicador	Peso	Métrica	Classificação
Funcionalidade (Probabilidade)	Desempenho real	Grau de obsolescência	20%	Sem problemas	1
				Dificuldade na obtenção de peças de reserva	3
				Descontinuados sem peças de reserva	5
		Número e gravidade das anomalias	30%	Impacto reduzido	1
				Impacto médio	3
				Impacto elevado	5
		Adequação à exploração	50%	Adequado	1
				Adequado com limitações	3
				Não adequado	5
Criticidade (Consequência)	Relevância	Volume anual elevado, V (1000 × m ³)	100%	$V \leq 100$	1
				$100 < V \leq 1\,000$	2
				$1\,000 < V \leq 5\,000$	3
				$5\,000 < V \leq 10\,000$	4
				$V > 10\,000$	5

Tabela A2 - Critérios para determinar o nível de risco associado aos equipamentos das ETA

	Critérios	Indicador	Peso	Métrica	Classificação
Funcionalidade (Probabilidade)	Avaliação estrutural	Nota da inspeção	80%	Muito bom	1
				Bom	2
				Razoável	3
				Mau	4
				Muito mau	5
	Implicação na operação	Gravidade do impacto	20%	Sem gravidade	1
				Pouco grave	3
				Grave	4
				Muito grave	5
Criticidade (Consequência)	Relevância	Volume anual elevado, V (1000 × m ³)	100%	$V \leq 100$	1
				$100 < V \leq 1\,000$	2
				$1\,000 < V \leq 5\,000$	3
				$5\,000 < V \leq 10\,000$	4
				$V > 10\,000$	5

Tabela A3 - Critérios para determinar o nível de risco dos reservatórios

	Crítérios	Indicador	Peso	Métrica	Classificação
Funcionalidade (Probabilidade)	Estado da condição de conservação do reservatório	Nota de inspeção	90%	Muito bom	1
				Bom	2
				Razoável	3
				Mau	4
				Muito mau	5
		Anos de funcionamento, A	10%	$A \leq 10$	1
				$10 < A \leq 20$	2
				$20 < A \leq 30$	3
				$30 < A \leq 40$	4
				$A > 40$	5
Criticidade (Consequência)	Impacto a jusante	Volume de circulação diário, V [m ³ /dia]	30%	$V \leq 2500$	1
				$2\,500 < V \leq 10\,000$	2
				$10\,000 < V \leq 50\,000$	3
				$50\,000 < V \leq 150\,000$	4
				$V > 150\,000$	5
	Redundância / Dimensão	Número de células, N	10%	$N \geq 4$	1
				$N = 3$	2
				$N = 2$	3
				$N = 1$	5
		Capacidade de armazenamento, C [m ³]	10%	$C \leq 1\,000$	1
				$1\,000 < C \leq 5\,000$	2
				$5\,000 < C \leq 10\,000$	3
				$10\,000 < C \leq 20\,000$	4
				$C > 20\,000$	5
	Relevância / Importância estratégica	Porcentagem do volume total do subsistema, v	40%	$0\% < v \leq 10\%$	1
				$10\% < v \leq 20\%$	2
				$20\% < v \leq 30\%$	3
				$30\% < v \leq 40\%$	4
				$v > 40\%$	5
		Tráfego, T [(m ³ /dia)/m ³]	10%	$0 < T \leq 4$	1
				$4 < T \leq 6$	2
				$6 < T \leq 8$	3
				$8 < T \leq 12$	4
				$T > 12$	5

Tabela A4 - Critérios para determinar o nível de risco das condutas

	Critérios	Indicador	Peso		Métrica	Classificação
			Cenário 1	Cenário 2		
Funcionalidade (Probabilidade)	Desempenho esperado	Idade	0%	20%	0 – 19	1
					20 – 39	2
					40 – 59	4
					≥ 60	5
		Material predominante	0%	20%	Ferro fundido dúctil	1
					Aço	1
					Polietileno	1
					Betão	3
					Policloreto de vinilo	4
					Polietileno com fibra de vidro	4
					Fibrocimento/ Ferro fundido não dúctil	5
					Alvenaria	5
		Inspeções	40%	0%	Muito bom	1
					Bom	2
					Razoável	3
					Mau	4
					Muito mau	5
	Desempenho real	Número de avarias por ano e por 100km	60%		0	1
					1 – 9	2
					10 – 14	3
					15 - 19	4
					≥ 20	5
Criticidade (Consequência)	Redundância	Alternativa de abastecimento	60%		Total	1
					Parcial (sem distribuição de percurso)	2
					Parcial (com distribuição de percurso)	4
					Não	5
	Relevância	[Caudal fornecido pelo adutor] / [Caudal que entra no sistema]	40%		0.0 – 0.2	1
					0.2 – 0.3	2
					0.3 – 0.4	3
					0.4 – 0.5	4
					0.5 – 1	5

O cenário 1 é utilizado na eventualidade de existir inspeção à conduta, caso contrário recorre-se ao cenário 2.

Tabela A5 - Critérios para determinar o nível de risco associado aos equipamentos das captações e das estações elevatórias

	Critérios	Indicador	Peso	Métrica	Classificação
Funcionalidade (Probabilidade)	Desempenho real	Grau de obsolescência	10%	Sem problemas	1
				Dificuldade na obtenção de peças de reserva	3
				Descontinuados sem peças de reserva	5
		Nível de utilização da capacidade instalada	20%	Nível < 0.6	1
				$0.6 \leq \text{Nível} < 0.7$	2
				$0.7 \leq \text{Nível} < 0.8$	3
				$0.8 \leq \text{Nível} < 0.9$	4
				Nível ≥ 0.9	5
		Número e gravidade das anomalias	30%	Impacto reduzido	1
				Impacto médio	3
				Impacto elevado	5
		Adequação à exploração	30%	Adequado	1
				Adequado com limitações	3
				Não adequado	5
		Nota de inspeção	10%	Muito bom	1
				Bom	2
				Razoável	3
				Mau	4
				Muito mau	5
Criticidade (Consequência)	Relevância	Volume anual elevado, V (1000 × m ³)	75%	$V \leq 100$	1
				$100 < V \leq 1\,000$	2
				$1\,000 < V \leq 5\,000$	3
				$5\,000 < V \leq 10\,000$	4
				$V > 10\,000$	5
	Redundância	Alternativa de elevação	25%	Total	1
				Total/Parcial	2
				Parcial	3
				Não/Parcial	4
				Não	5

Tabela A6 - Critérios para determinar o nível de risco associado à construção civil das captações e das estações elevatórias

	Critérios	Indicador	Peso	Métrica	Classificação
Funcionalidade (Probabilidade)	Avaliação estrutural	Nota de inspeção	80%	Muito bom	1
				Bom	2
				Razoável	3
				Mau	4
				Muito mau	5
	Implicação na exploração	Gravidade do impacto	20%	Sem gravidade	1
				Pouco grave	3
				Grave	4
				Muito grave	5
Criticidade (Consequência)	Relevância	Volume anual elevado, V (1000 × m ³)	75%	$V \leq 100$	1
				$100 < V \leq 1\,000$	2
				$1\,000 < V \leq 5\,000$	3
				$5\,000 < V \leq 10\,000$	4
				$V > 10\,000$	5
	Redundância	Alternativa de elevação	25%	Total	1
				Total/Parcial	2
				Parcial	3
				Não/Parcial	4
				Não	5