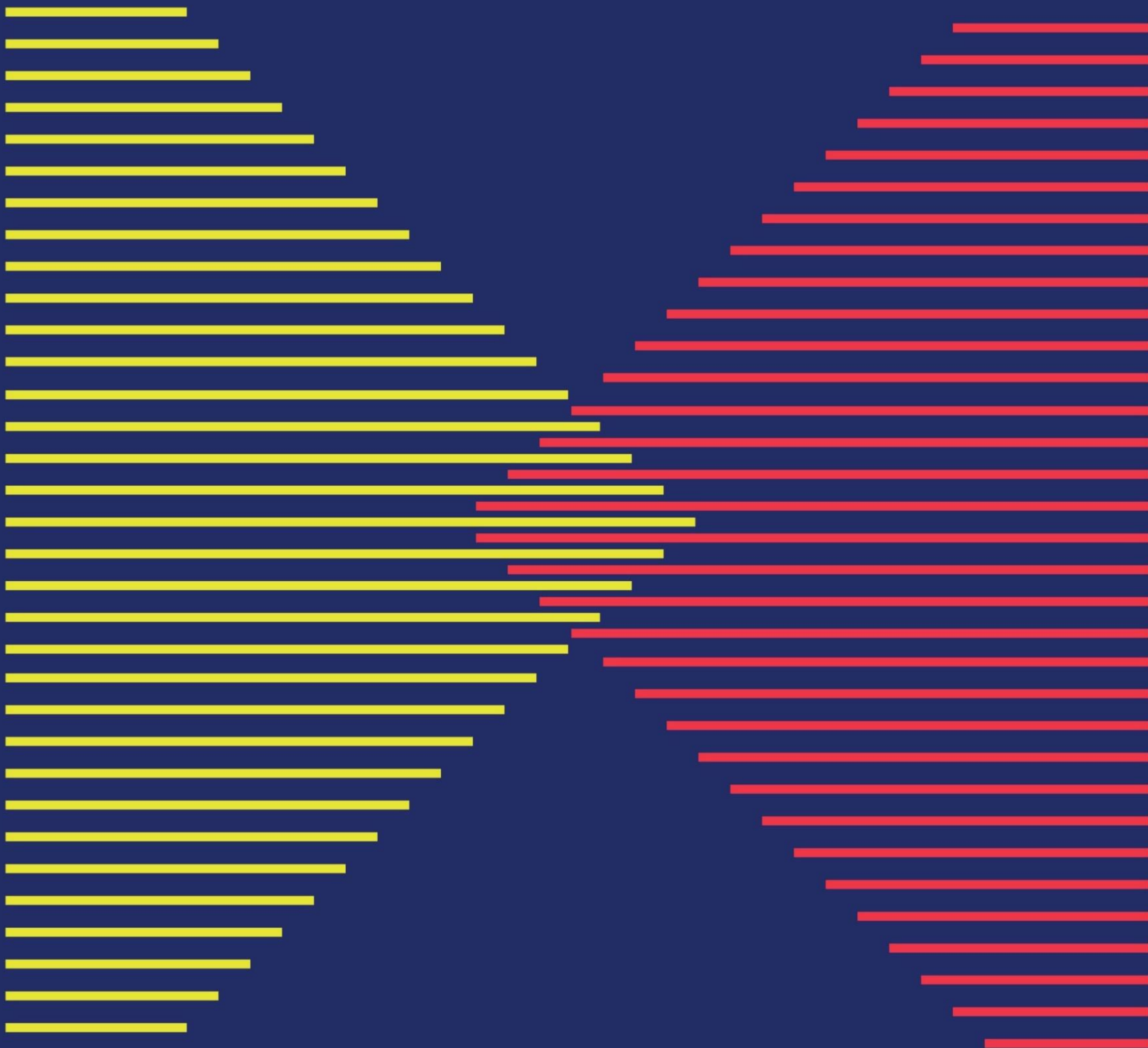


# Revista de Ativos de Engenharia

2024

Volume 2, Número 1  
ISSN Online: 2975-8289






## FICHA TÉCNICA

---

- **ISSN ONLINE:** 2975-8289
- **FREQUÊNCIA:** Semestral
- **PROPRIEDADE:** Ponteditora, Sociedade Unipessoal, Lda.
- **NIPC:** 514 111 054
- **COMPOSIÇÃO DO CAPITAL DO PROPRIETÁRIO:** 10 000€, 100% detido por Ana Leite, doutoranda
- **GESTÃO (NÃO REMUNERADA):** Eduardo Leite, Ph.D.
- **LOCALIZAÇÃO:** Startup Madeira — Campus da Penteada, 9020-105, Funchal, Madeira, Portugal
- **CONTACTO PRINCIPAL:**
  - Eduardo Leite
  - Universidade da Madeira
  - +351 291 705 180
  - [eduardo.leite@staff.uma.pt](mailto:eduardo.leite@staff.uma.pt)
- **CONTACTO DE APOIO:**
  - Ponteditora
  - +351 291 723 010
  - [geral@ponteditora.org](mailto:geral@ponteditora.org)










**EDITOR-CHEFE:**

- Nuno Marques Almeida  — PhD em Engenharia Civil, Professor Auxiliar, Instituto Superior Técnico, Portugal.





**CONSELHO CIENTÍFICO:**

- Ana Camanho  — PhD em Estudos Industriais e Empresariais, Professora Associada com Agregação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Ana Luís  — PhD em Gestão Estratégica do Risco em Entidades Gestoras de Infraestruturas de Água, Administradora Executiva AdP Internacional, Portugal.
- António Aguiar Costa  — PhD em Engenharia Civil, Professor Associado, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- António Marques Cardoso  — PhD em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Professor Catedrático, Universidade da Beira Interior, Portugal.
- Carla Boehl  — PhD em Engenharia e Ciência de Decisão, Assessora de administração em gestão de ativos, Fremantle Ports, Austrália.
- Celso de Azevedo  — PhD em Engenharia e Gestão Industrial, CEO, Assetsman, França.
- Daniel Gaspar  — PhD em Engenharia Mecânica, Investigador Pós-doutorado, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- Fernanda Coutinho  — PhD em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal.
- Filipa Salvado  — PhD em Engenharia Civil, Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- Helena Alegre  — PhD em Engenharia Civil, Investigadora Principal com Habilitação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- Hugo David Raposo  — PhD em Engenharia Mecânica, Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal.
- Hugo Rodrigues  — PhD em Engenharia Civil, Professor Associado, Universidade de Aveiro, Portugal.
- Inês Flores Colen  — PhD em Engenharia Civil, Professora Catedrática, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- João Gomes Ferreira  — PhD em Engenharia Civil, Professor Catedrático, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- João Gomes Morgado  — PhD em Engenharia Civil, Responsável Gestão de Ativos - Unidade de Planeamento e Revisão, Infraestruturas de Portugal, Portugal.
- João Poças Martins  — PhD em Engenharia Civil, Professor Associado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- José Campos e Matos  — PhD em Engenharia Civil, Professor Auxiliar, Universidade do Minho, Portugal.
- José Silvestre  — PhD em Engenharia Civil, Professor Associado, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- José Sobral  — PhD em Engenharia Mecânica, Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal.
- José Torres Farinha  — PhD em Engenharia Mecânica, Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal.







- Luis Andrade Ferreira  — PhD em Engenharia Mecânica, Professor Associado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Marta Cabral  — PhD em Engenharia Civil, Investigadora, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- Moacyr Eduardo Alves da Graca  — PhD em Engenharia Urbana e Construções Civas, Professor Coordenador do MBA Facility Management, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Mateus Mendes  — PhD em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal.
- Mónica Amaral Ferreira  — PhD em Engenharia Civil, Investigadora, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- Paulo Vaz Serra  — PhD em Engenharia Civil, Professor Auxiliar, Universidade de Melbourne, Austrália.
- Ricardo Prata  — PhD em Engenharia e Políticas Publicas, Diretor de Gestão de Ativos, E-Redes, Portugal.
- Rita Brito  — PhD em Engenharia Civil, Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- Rui Carrilho Gomes  — PhD em Engenharia Civil, Professor Auxiliar, Instituto Superior Técnico, Portugal.

#### CONSELHO CONSULTIVO:

- Jaime Gabriel Silva  — Assessor da Administração na Águas do Douro e Paiva SA, Professor Convidado no Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.
- Rui Coutinho  — Diretor Gestão de Ativos, Infraestruturas e Portugal, Portugal.
- Vítor Correia  — Secretário-Geral do Observatório Internacional dos Recursos Minerais (Intraw), Bélgica.
- Wagner Carvalho  — Gestor de Projetos Senior, Aegea Saneamento e Participações SA, Brasil

#### CONSELHO EDITORIAL:

- Ana Miguel Ramos Leite  — Doutoranda em Economia Política, Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, Portugal.
- Azucena Marques  — Mestre em Farmácia e Química dos produtos naturais, Universidade de Salamanca, Espanha.
- Edmundo de Almeida e Pais  — Doutorando em Engenharia e Gestão Industrial, Professor Auxiliar na Universidade Lusófona, Portugal.
- Hugo Patrício  — Responsável Gestão de Ativos - Risco da Infraestrutura, Infraestruturas de Portugal, Portugal.



## ESTATUTO EDITORIAL

---

- I — A **Revista de Ativos de Engenharia**, conhecida também pelas formas abreviadas de **RAE**, é uma publicação periódica. Propriedade da Editora: Ponteditora.
- II — A **RAE** dedica-se à pluralidade de temas que envolvem a gestão de ativos de engenharia.
- III — A linha editorial da **RAE** publica textos inéditos dedicados à investigação científica transdisciplinar abrangendo áreas da Engenharia e da Gestão de Ativos.
- IV — A **RAE** tem por missão fomentar a ciência em português e inglês nas suas linhas editoriais, como forma de estimular o conhecimento nas comunidades científicas.
- V — A **RAE** é editada semestralmente, online, em língua portuguesa, sendo disseminada em todo o mundo através da Internet.
- VI — A **RAE** terá, aproximadamente, 80 a 180 páginas.
- VII — A **RAE** é, desde a sua génese até à atualidade, publicada na versão online.
- VIII — A **RAE** destina-se a professores, investigadores, estudantes e profissionais, nacionais ou estrangeiros.
- IX — A **RAE** apresenta um corpo editorial técnico e científico, aberto a académicos, investigadores e profissionais oriundos de diversas organizações e empresas relacionadas com a investigação, desenvolvimento e inovação da gestão de ativos de engenharia.
- X — A **RAE** publica artigos académicos e científicos, originais e de revisão, bem como ensaios e resenhas/recensões críticas.
- XI — A aprovação dos manuscritos para publicação regula-se por critérios de pertinência, interesse, qualidade científica e no respeito pela pluralidade de perspetivas. A **RAE** assume-se como independente de qualquer poder político, ideológico ou económico, e orienta-se por critérios de rigor, isenção e inclusão.
- XII — A **RAE** publica em língua portuguesa, assim como em inglês. Em cada artigo estão incluídos o título, resumo e palavras-chave em duas línguas.
- XII — A **RAE** publica preferencialmente em língua portuguesa, assim como em inglês. O título, resumo e palavras-chave de cada artigo poderão ser incluídos nas duas línguas.
- XIII — A revista **RAE** edita números regulares e números especiais, confiados a investigadores credenciados das respetivas áreas de especialidade (normas para revisores), sob a escrutínio e aprovação da Equipa Editorial. Toda a colaboração é submetida a um exigente processo de seleção e revisão baseado em arbitragem científica e dois modos, cega por pares e por pares aberta.



XIV — Almejando os mais elevados padrões de ética na publicação, a Equipa Editorial da RAE inspira o seu Código de Ética nas orientações estabelecidas pelo *Committee on Publication Ethics COPE*; *Declaration of Helsinki WMA*; *International Committee of Medical Journal Editors ICMJE*; *Animal Research: Reporting of In Vivo Experiments ARRIVE*. Nesse código definem-se as responsabilidades de todas as partes envolvidas no ato de publicação da **RAE**.

XV — A revista **RAE** pretende promover o intercâmbio de ideias, experiências e projetos entre os autores e editores, contribuindo para a reflexão abrangente sobre o valor gerado a partir dos ativos de engenharia e para a importância deste tipo de ativos no funcionamento sustentável e resiliente das sociedades modernas.

XVI — A revista **RAE** disponibiliza as Normas para apresentação e publicação de artigos e uma lista anual dos revisores que colaboram na arbitragem científica dos manuscritos.

XVII — A Equipa Editorial da revista **RAE**, assume o compromisso de assegurar o respeito pelos princípios deontológicos e pela ética profissional dos jornalistas, assim como pela boa-fé dos leitores, nos termos nº 1 do artigo 17º da Lei de Imprensa.



## ÍNDICE


PÁGINA	TÍTULO	AUTOR(ES)
1	EDITORIAL—AN OVERVIEW OF CONTRIBUTIONS PROMOTING ENGINEERING ASSET MANAGEMENT	Nuno de Almeida
6	ANÁLISE COMPARATIVA DE BOMBAS DE CALOR AEROTÉRMICAS E GEOTÉRMICAS PARA A GESTÃO DE ATIVOS NO SISTEMA AVAC DE UM AMBIENTE CRÍTICO	Pedro Barandier Antonio Cardoso Victor Cavaleiro
22	PERSPETIVA DAS COMUNIDADES TÉCNICA E CIENTÍFICA SOBRE O CORPO DE CONHECIMENTO DA GESTÃO DE ATIVOS	Joana Torcato Daniel Gaspar Francielle dos Santos João Vieira Nuno Almeida
35	GESTÃO DE INFRAESTRUTURAS PÚBLICAS ATRAVÉS DO BIM: MODELAÇÃO DE TÚNEIS FERROVIÁRIOS DAS INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL	Inês Caetano Débora Pinto João Silva Yessica Barbosa Luís Sanhudo João Poças Martins Margarida Amândio Miguel Azenha José Granja Mohammad El Sibaii Hugo Patrício
49	STANDARDIZATION OF TECHNICAL INFORMATION ON RAILWAY PROJECTS TO OBTAIN PERFORMANCE INDICATORS	Filipa Salvado Maria Falcão Paula Couto Simona Fontul
60	IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO NA FASE DE CRIAÇÃO DE ATIVOS CONSTRUÍDOS	Isabella Carvalho Francielle dos Santos
74	THE SIMULATION OF THE RELIABILITY OF ASSETS USING THE MONTE CARLO METHOD. THE SPECIFIC-CASE OF COMPLEX AND COHERENT SYSTEMS K-OUT-OF-N, WITH CENSORED DATA	Daniel Gaspar Luís Ferreira

**EDITORIAL**

**AN OVERVIEW OF CONTRIBUTIONS PROMOTING ENGINEERING ASSET  
MANAGEMENT**

**UMA VISÃO SOBRE CONTRIBUTOS PARA A PROMOÇÃO DA GESTÃO DE ATIVOS  
DE ENGENHARIA**

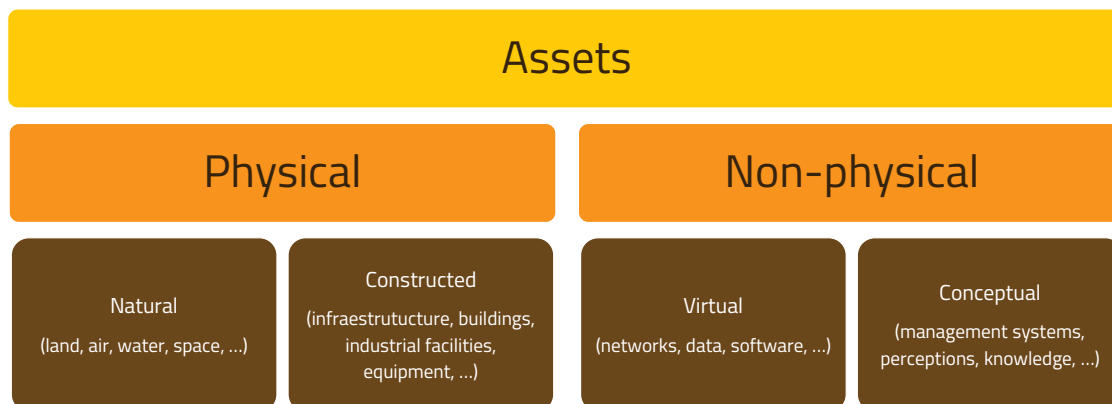
[10.29073/rae.v2i1.888](https://doi.org/10.29073/rae.v2i1.888)

Nuno de Almeida , Instituto Superior Técnico, Portugal, [nunomarquesalmeida@tecnico.ulisboa.pt](mailto:nunomarquesalmeida@tecnico.ulisboa.pt).

This editorial expounds an outlook for the ecosystem of engineering asset management transdisciplinary scientific research, while mapping the specific contributions published in the three first numbers of the *Journal of Engineering Assets* (RAE: *Revista Ativos de Engenharia*). For this purpose, six well-known thematic group areas of engineering asset management are used.

The need for engineering asset management as a broad-band approach is driven by the increasing complexities and challenges arising from engineered assets and asset systems (Figure 1), both physical and non-physical, that consume significant financial resources from public and private budgets, and also other forms of capital (natural, social, manufactured, intellectual, etc).

**FIGURE 1:** Asset taxonomy (Almeida, 2023; Amadi-Echendu et al., 2010; Dieter, 2020).



Engineering asset management principles and practices, which are of crucial importance to enhance the lifecycle management of engineered assets and asset systems that serve and are critical to the functioning of modern cities and societies, are well-documented elsewhere (Amadi-Echendu et al., 2010; Azevedo C, 2019; Márquez et al., 2009; The IAM, 2022; Too, 2010; WoodhouseJohn, 2019).

Pushing the boundaries of innovation and sophistication in engineering asset management requires transdisciplinary scientific research, necessarily involving actors from outside academia. This is to ensure that the best available knowledge is used in addressing the multidimensional complexity of real-world problems (Martens et al., 2012). But it is often the case that the main thought leaders and innovators of the engineering asset management community, from outside academia, are invisible to standard academic criteria and its conventional research approaches.

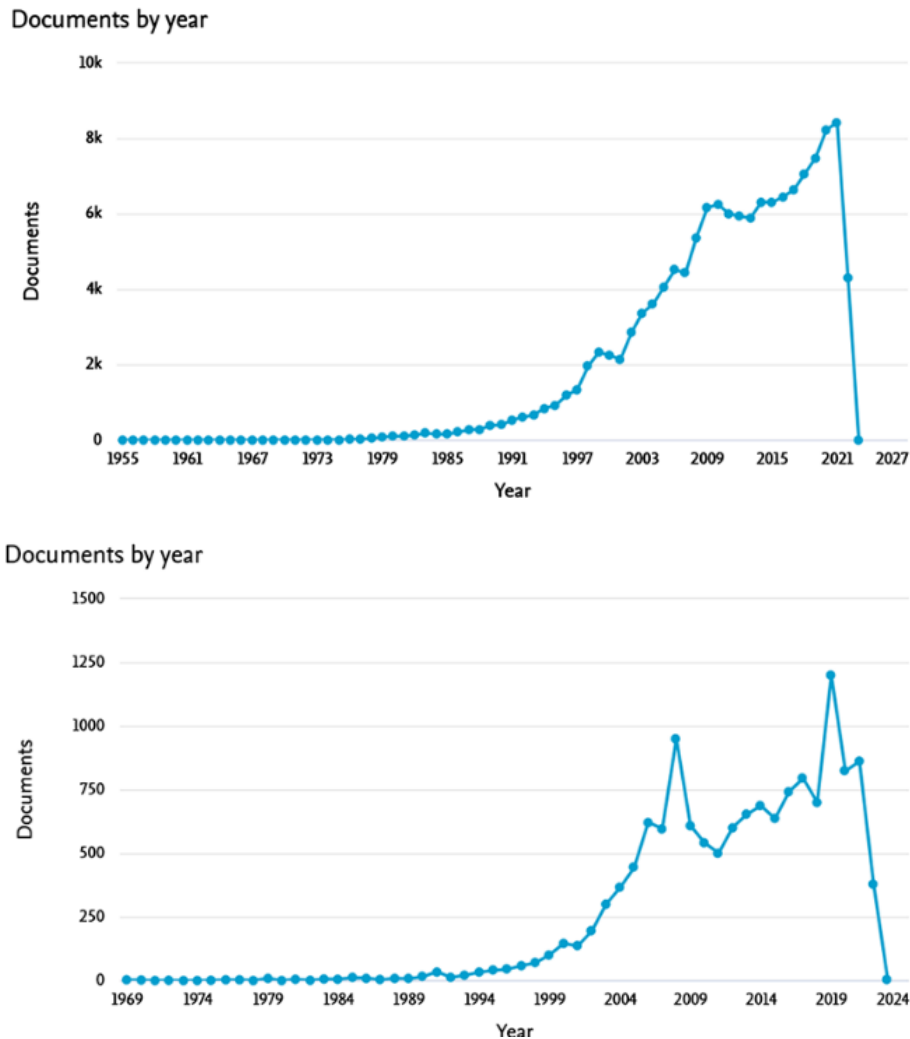
It is thus difficult to give due recognition to highly influential and successful individuals in this space by strictly following standard academic approaches, such as systematic or traditional literature reviews. This is aggravated by the fact that the asset management literature in reputed indexed scientific journals is very dispersed, despite the



asset management concept is becoming more and more mainstream, amongst the scientific community and practitioners alike.

Moreover, scientific literature often deals with narrow subsets of asset management without a sufficient articulation of asset management as a transdisciplinary approach and an integral body of knowledge. The subsets of life-cycle costing, risk management or asset performance are only a few examples of this. This can be apprehended in Figure 2 with regards to asset management and risk management.

**FIGURE 2:** Number and distribution of publications about “risk management” (above) and “asset management” (below) (Diop et al., 2022).



Asset management scientific literature is highly dispersed due to a lack of international journals specifically dedicated to transdisciplinary asset management research.

A possible way of tracking relevant literature following the principles of transdisciplinary research is through the work of the GFMAM or the Subject Specific Guidelines (SSGs) coordinated by the IAM. This SSGs cover the 39 topics proposed by the GFMAM (2014) and are intended to constitute an asset management knowledge matrix for the asset management landscape.

Another important source of literature dealing with the full breath of engineering asset management derives from the works presented in the World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM), held annually since 2006.



The WCEAM is sponsored by the International Society of Engineering Asset Management (ISEAM). The ISEAM is a multidisciplinary professional learned society dedicated to the development and recognition of asset management as an integrated body of knowledge and a field of transdisciplinary research. These international congresses bring together academics, practitioners from many areas, and scientists, and promotes transdisciplinary research towards strengthening the links between these actors and enable the application of EAM in real case situations. The WCEAM is a refereed conference and a selection of peer reviewed contributions by a panel of international experts is frequently published by Springer (indexed by Scopus).

On the other hand, it is perfectly possible to track the contributions of highly influential individuals that inspire asset management practice in all types of organizations, worldwide, e.g., by engaging in the intellectual debates and the ground-breaking work pushing forward the successive development stages of international industry standards (e.g. ISO, BSI, etc.), namely those that are related to the thematic areas addressed in this journal: the ISO 55000 family of standards on asset management, above all, but also the ISO 31000 family of standards on risk management.

After the publication of the first ISO 55000 series of standards in 2014, several major publications in the field were revised in view of aligning with the principles and terminology established in those standards.

The Global Forum on Maintenance & Asset Management (GFAM) published the second version of the Asset Management Landscape in 2014 (GFAM, 2014). This became a foundational document for many organizations and businesses implementing the engineering asset management approach, including those external to GFAM. It provides guidance on the breadth of asset management covering 39 topics in six major areas, namely: (1) strategy & planning, (2) decision making, (3) lifecycle delivery, (4) asset information or knowledge enablers, (5) organization & people, and (6) risk & review.

The *Journal of Engineering Assets* (*RAE: Revista de Ativos de Engenharia*) recognizes the transdisciplinary nature of engineering asset management. Table 1 summarizes the set of contributions published so far in *RAE* according to the six major areas described above, plus a category for contributions referring to overarching or innovative themes. Each contribution is allocated to a single given aspect, although other relationships may exist.

It is the aim of *RAE* to continuously monitor and balance the major areas covered by the authors' contributions submitted to this journal.

The forthcoming numbers of this journal are expected to contain selected top-quality research and industry contributions presented in the 1<sup>st</sup> Ibero-American Congress of Engineering Asset Management (CONGREGA 2024), to be held in Lisbon from 3–5 July 2024.



TABLE 1: Distribution of publications of RAE per area of ENGINEERING ASSET MANAGEMENT.

AREAS OF ENGINEERING ASSET MANAGEMENT	RAE V1N1	RAE V1N2	RAE V2N1
<b>Generic/innovation</b>	FOUNDATIONS AND PROSPECTS OF INNOVATION IN THE MANAGEMENT OF ENGINEERING ASSETS	VALUE MANAGEMENT—A STANDARDISATION INSIGHT	PERSPECTIVES OF THE TECHNICAL AND SCIENTIFIC COMMUNITIES OVER THE ASSET MANAGEMENT BODY OF KNOWLEDGE
<b>Strategy and planning</b>	THE IMPACT OF THE PROGRESS OF THE RESILIENCE OF PUBLIC SCHOOL ARCHITECTURE	STRUCTURE AND CONTENTS OF AN ASSET MANAGEMENT PLAN  STRATEGIES FOR OPTIMIZING THE EXECUTION OF REAL ESTATE PROJECTS: APPLICATION TO THE REHABILITATION OF BUILDINGS IN UNFORESEEN SCENARIOS	
<b>Decision-making</b>	OPTIMIZATION OF INVESTMENTS IN ASSET MANAGEMENT OF WATER SUPPLY SYSTEMS USING THE INFRASTRUCTURE VALUE INDEX  LIFE CYCLE COST ANALYSIS OF A WATER TREATMENT PLANT FOR GYPSUM BOARDS PRODUCTION		
<b>Lifecycle activities</b>		EVALUATION OF THE IMPACT OF A COMPUTER MAINTENANCE MANAGEMENT SYSTEM TO SUPPORT THE IMPLEMENTATION OF ASSET MANAGEMENT SYSTEMS UNDER ISO 55001 STANDARD	IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO NA FASE DE CRIAÇÃO DE ATIVOS CONSTRUÍDOS  ANÁLISE COMPARATIVA DE BOMBAS DE CALOR AEROTÉRMICAS E GEOTÉRMICAS PARA A GESTÃO DE ATIVOS NO SISTEMA AVAC DE UM AMBIENTE CRÍTICO
<b>Asset information</b>	STRATEGIC DECISIONS IN THE LIFE CYCLE OF CONSTRUCTED ASSETS BASED ON TECHNICAL FUNCIONAL AND FINANCIAL INFORMATION	COMPARATIVE STUDY BETWEEN DIFFERENT TYPES OF INTEGRATION OF FACILITY MANAGEMENT AND BUILDING INFORMATION MODELING SYSTEMS	MANAGING PUBLIC INFRASTRUCTURES THROUGH BIM: MODELING RAILWAY TUNNELS FOR INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL  STANDARDIZATION OF TECHNICAL INFORMATION ON RAILWAY PROJECTS TO OBTAIN PERFORMANCE INDICATOR
<b>Organization and people</b>	HUMAN RESOURCES IN THE INDUSTRIAL REVOLUTION: SYSTEMATIC REVIEW OF THE LITERATURE ON COMPETENCIES FOR INDUSTRY 4.0	KEY SUCCESS FACTORS IN ASSET MANAGEMENT — JOURNEY AND ISO 55001 CERTIFICATION AT E-REDES  DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A METHODOLOGY TO RATE ASSET MANAGEMENT MATURITY	
<b>Risk and review</b>	STRATEGIC MODEL OF THE SIGNALING GANTRY MANAGEMENT SYSTEM OF INFRASTRUCTURES OF PORTUGAL, S.A.		THE SIMULATION OF THE RELIABILITY OF ASSETS USING THE MONTE CARLO METHOD: THE SPECIFIC CASE OF COMPLEX AND COHERENT SYSTEMS K-OUT-OF-N, WITH CENSORED DATA



## REFERENCES

- Almeida, N. (2023). FUNDAMENTOS E PERSPETIVAS DE INOVAÇÃO NA GESTÃO DE ATIVOS DE ENGENHARIA. *Revista de Ativos de Engenharia*, 1(1), 05–16. <https://doi.org/10.29073/rae.v1i1.644>
- Amadi-Echendu, J. E., Willett, R., Brown, K., Hope, T., Lee, J., Mathew, J., Vyas, N., & Yang, B.-S. (2010). *What Is Engineering Asset Management?* (pp. 3–16). Springer London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84996-178-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-178-3_1)
- Azevedo C. (2019). *Asset management insights: phases, practices and values*. Industrial Press.
- Dieter, J. (2020). *Asset Taxonomy: ALN proposal for ASTM E53*.
- Diop, I., Abdul-Nour, G. G., Komljenovic, D., Diop, I., Abdul-Nour, G. G., & Komljenovic, D. (2022). A High-Level Risk Management Framework as Part of an Overall Asset Management Process for the Assessment of Industry 4.0 and Its Corollary Industry 5.0 Related New Emerging Technological Risks in Socio-Technical Systems. *American Journal of Industrial and Business Management*, 12(7), 1286–1339. <https://doi.org/10.4236/AJIBM.2022.127071>
- GFMAM. (2014). *The Asset Management Landscape Second Edition*. Global Forum of Maintenance and Asset Management. [www.gfmam.org](http://www.gfmam.org)
- Márquez, A. C., de León, P. M., Fernandez, J. F. G., Márquez, C. P., & Campos, M. L. (2009). The maintenance management framework: A practical view to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15(2), 167–178. <https://doi.org/10.1108/13552510910961110>
- Martens, P., Moll, P., Swilling, M., & Thomas, C. J. (2012). Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. *Sustainability Science*, 7, 25–43. <https://doi.org/10.1007/s11625-011-0149-x>
- The IAM. (2022). The Case for Excellence in Asset Management. [www.theIAM.org](http://www.theIAM.org)
- Too, E. G. (2010). *A Framework for Strategic Infrastructure Asset Management* (pp. 31–62). Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84996-178-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-178-3_3)
- WoodhouseJohn. (2019). What is the value of asset management? 6(2), 102–108. <https://doi.org/10.1680/JINAM.17.00040>

## DECLARAÇÃO ÉTICA

**CONFLITO DE INTERESSE:** Nada a declarar. **FINANCIAMENTO:** Nada a declarar. **REVISÃO POR PARES:** Dupla revisão anónima por pares.



Todo o conteúdo da **RAE — REVISTA DE ATIVOS DE ENGENHARIA** é licenciado sob [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.



# ANÁLISE COMPARATIVA DE BOMBAS DE CALOR AEROTÉRMICAS E GEOTÉRMICAS PARA A GESTÃO DE ATIVOS NO SISTEMA AVAC DE UM AMBIENTE CRÍTICO


## COMPARATIVE ANALYSIS OF AIR-SOURCE AND GEOTHERMAL HEAT PUMPS FOR ASSET MANAGEMENT IN THE HVAC SYSTEM OF A CRITICAL ENVIRONMENT


[10.29073/rae.v2i1.784](https://doi.org/10.29073/rae.v2i1.784)


**RECEÇÃO:** 14 de julho de 2023.

**APROVAÇÃO:** 6 de dezembro de 2023.

**PUBLICAÇÃO:** 6 de fevereiro de 2024.

**AUTOR/A 1:** Pedro Barandier , CISE — Electromechatronic Systems Research Centre, University of Beira Interior, Portugal, [pedro.barandier@mail.com](mailto:pedro.barandier@mail.com).

**AUTOR/A 2:** Antonio Cardoso , CISE — Electromechatronic Systems Research Centre, University of Beira Interior, Portugal, [ajmcardoso@ieee.org](mailto:ajmcardoso@ieee.org).

**AUTOR/A 3:** Victor Cavaleiro , Department of Civil Engineering, University of Beira Interior, Portugal, [victorc@ubi.pt](mailto:victorc@ubi.pt).

### RESUMO

O presente trabalho aborda a gestão de ativos num ambiente crítico — o Biotério da Faculdade de Ciências da Saúde (FCS) da Universidade da Beira Interior (UBI), Portugal — uma instalação onde as condições ambientais devem ser mantidas ininterruptamente a uma temperatura de 21 °C e com uma humidade relativa de 50%. A manutenção de tais condições exige uma constante utilização do sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), sobretudo dos *chillers* e caldeiras para o arrefecimento e aquecimento, respetivamente. Consequentemente, devido à significativa variação climática ao longo do ano, uma avaria no sistema pode resultar em drásticas consequências para os ativos da instalação e também, para as atividades em curso.

Visto que, eventualmente, os *chillers* e caldeiras deverão ser encaminhados para o abate, o objetivo deste artigo é efetuar uma análise de possíveis alternativas para a substituição de tais equipamentos levando em conta os aspetos económicos e ambientais. Por esta razão, são aqui abordadas as Bombas de Calor (BC), que operam segundo o ciclo de compressão de vapor, pois são equipamentos que satisfazem ambos os aspetos ao promoverem quer o arrefecimento quer o aquecimento do ambiente de modo mais eficiente e sustentável. Deste modo, são discutidas as tecnologias de BC aerotérmicas e geotérmicas e os aspetos de operação intrínsecos às mesmas. Por fim, é realizada uma simulação, em linguagem Python, de ambos os equipamentos, para diversos cenários de aquecimento e arrefecimento do ambiente em questão, com vista a uma análise mais detalhada do tema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ambiente Crítico; Biotério; Bombas de Calor; Gestão de Ativos; Python; Sistema AVAC.

### ABSTRACT

The present work addresses the asset management in a critical environment — the Bioterium of the Faculty of Health Sciences (FCS) of the University of Beira Interior (UBI), Portugal — a facility where the environmental conditions must be uninterruptedly maintained at a temperature of 21 °C, and with a relative humidity of 50%. The maintenance of such conditions requires the constant use of the Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system, especially chillers and boilers for cooling and heating, respectively. Consequently, due to the significant weather variations throughout the year, a system failure may result in drastic consequences for the facility assets and for the ongoing activities as well.



Since, the chillers and boilers must be eventually replaced, the objective of this article is to carry out an analysis of possible alternatives for the replacement of such equipment, considering the economic and environmental aspects. For this reason, it is discussed here the Heat Pumps (HP) which operate according to the vapor compression cycle, as they are an equipment that satisfy both aspects by promoting both the cooling and heating of the environment in a more efficient and sustainable way. In this way, aerothermal and geothermal HP technologies and their intrinsic operational aspects are discussed. Finally, a simulation in Python of both equipment, for several scenarios of heating and cooling of the considered environment is performed, for a more detailed analysis of the subject.

**KEYWORDS:** Asset Management; Critical Environment; Heat Pumps; HVAC System; Python; Vivarium.

## 1. INTRODUÇÃO

Um biotério é uma área para a criação e manutenção de animais de laboratório utilizados para a pesquisa e/ou atividades de ensino. O principal objetivo de um biotério é assegurar as condições ambientais, nutricionais e do controlo da saúde dos animais (FMUC, n.d.; Institui & Oficial, 2019). Um biotério é, pois, um ambiente crítico onde as condições ambientais devem ser mantidas ininterruptamente em termos dos parâmetros de temperatura e humidade relativa do ar. Tais condições requerem uma utilização contínua do sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), e qualquer anomalia no seu funcionamento pode levar a sérios problemas quer para os seres vivos (cobaias) quer para as atividades em curso (Barandier & Cardoso, 2022).

O sistema AVAC analisado, para além de outros elementos, tais como, Unidades de Tratamento de Ar (UTA), Unidades de Tratamento de Ar Novo (UTAN), Bombas Hidráulicas de Circulação e Ventiladores-Convectores, é composto por dois chillers e duas Caldeiras para arrefecimento e aquecimento, respetivamente. Em ambos os casos, enquanto um equipamento opera, o outro encontra-se como backup para o caso de avaria e/ou manutenção. No entanto, tal sistema encontra-se sobredimensionado, pois o mesmo foi projetado para todas as instalações da Faculdade de Ciências da Saúde (FCS) e nos períodos de férias e de suspensão/interrupção das atividades letivas tal sistema opera unicamente para o biotério, o que eleva significativamente os custos referentes ao consumo de energia elétrica e de gás propano.

Os chillers e as caldeiras foram adquiridos no ano de 2005. Isto significa que os mesmos estão a caminho do fim da sua vida útil, considerando-se esta em cerca de 20 anos para ambos os equipamentos. Deste modo, devido à sua maturidade, os chillers e as caldeiras deverão ser encaminhados para abate e substituídos.

A fim de garantir uma fiável gestão dos ativos, levando em conta a criticidade do ambiente em questão, os chillers e as caldeiras devem ser, eventualmente, substituídos por outros equipamentos que cumpram os requisitos necessários, sejam eles de frio ou de calor. Deste modo, uma escolha satisfatória seria a sua substituição por Bombas de Calor (BC) e/ou até mesmo, a implementação de um sistema AVAC independente para o biotério.

A substituição por BC é justificada não apenas pelo maior rendimento destas, quando comparadas aos chillers e caldeiras, como também pelo facto de que as BC, quando reversíveis, unificam os sistemas de arrefecimento e aquecimento visto que executam ambas as funções. Além disso, de acordo com a Norma Europeia de Controlo e Gestão de Edifícios (Cen/Tc 247, 2006), esta unificação é uma característica de um alto desempenho de um sistema de controlo e automação de edifícios, e também, da gestão técnica de edifícios.

Numa perspetiva económica, um sistema de BC adequadamente projetado pode retornar o investimento num período de cinco anos devido ao seu baixo consumo. Após o retorno do investimento, o sistema proporciona um conforto térmico a mínimos custos e impactos ambientais (Heat Pump Technology: Systems Design, Installation, and Troubleshooting, n.d.; MacKay, 2008).

Um outro ponto a ser considerado fundamenta-se no pacote de diretivas da União Europeia que surgiu do Acordo de Paris para a redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE). De acordo com este pacote, diversas medidas foram tomadas (Barandier & Cardoso, 2022), entre elas, o Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (APA, 2019) e o Roteiro para a Neutralidade Carbónica (Portuguesa, n.d.). Deste modo, todos os equipamentos que utilizam quaisquer fontes energéticas que resultem na emissão de algum tipo de GEE devem ser substituídos nos próximos anos.

Consequentemente, com base nas informações supracitadas e por meio de uma simulação desenvolvida em Python, este trabalho analisa e discute as BC que operam segundo o ciclo de compressão de vapor aerotérmicas e geotérmicas, levando em conta o seu desempenho em relação às temperaturas do ar e do solo. Tudo isto, com o propósito de identificar as melhores e mais viáveis alternativas para a substituição dos atuais equipamentos e, assim, garantir uma fiável gestão dos ativos das instalações.

Visto que a carga térmica das instalações ainda deve ser estimada a fim de garantir um dimensionamento correto do sistema, as análises comparativas apresentadas entre os dois tipos de equipamento, no presente artigo, são realizadas tomando em consideração uma potência térmica de 1 kW, quer para arrefecimento, quer para aquecimento. Deste modo, ao considerar equipamentos com uma mesma potência elétrica, independentemente da carga térmica do local, os resultados manter-se-ão válidos. Isto ocorre uma vez que o desempenho das BC é adimensional, sendo este a razão entre a potência térmica e a potência elétrica como será elucidado no capítulo 3. A manutenção destes parâmetros é realizada por meio dos já referidos chillers e caldeiras.

## 2. DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES

O biotério da Faculdade de Ciências da Saúde (FCS) da Universidade da Beira Interior (UBI), localiza-se na cidade da Covilhã, Portugal (Figura 1). Com uma área de 630 m<sup>2</sup>, o seu principal propósito é abrigar algumas espécies de animais, tais como coelhos e ratos, empregues para as atividades de ensino e investigação. Visto que a Covilhã se encontra na região da Beira Interior, há uma significativa variação climática ao longo de todo o ano, com uma temperatura média máxima de 34 °C e uma temperatura mínima de -4 °C. Apesar do clima e temperatura no exterior, o biotério necessita que as condições internas sejam mantidas ininterruptamente a uma temperatura e humidade relativa constantes de 21 °C e 50%, respetivamente.

**FIGURA 1:** Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior.



## 3. BOMBAS DE CALOR

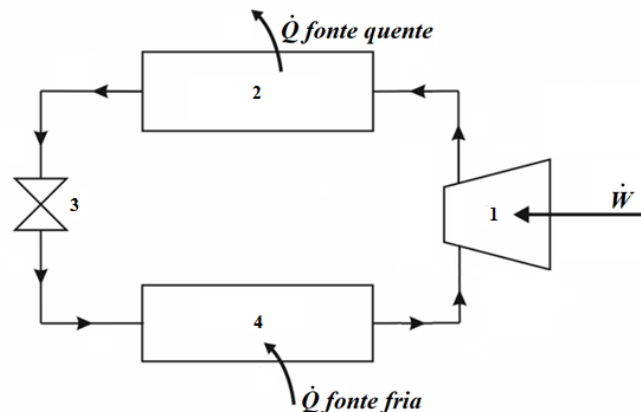
As bombas de calor podem ser categorizadas como químicas, de absorção ou de compressão (Osterman & Stritih, 2021). No entanto, serão analisadas no presente trabalho apenas as BC de compressão. As BC baseiam-se fundamentalmente num ciclo de Carnot Inverso, isto é, em vez de transformar energia térmica em energia mecânica,

faz o oposto, converte a energia mecânica em energia térmica. Deste modo, com base na segunda lei da termodinâmica, mais precisamente o enunciado de Clausius, as BC transferem calor de uma fonte fria para uma fonte quente através de um fluido denominado fluido refrigerante, possibilitando, conseqüentemente, o arrefecimento e o aquecimento de espaços e produção de águas quentes sanitárias (AQS) (Staffell et al., 2012; Osterman & Stritih, 2021).

De acordo com Duarte (2013), as BC que operam de acordo com o ciclo de compressão de vapor são compostas por quatro componentes principais, sendo estes o compressor, o condensador, a válvula de expansão e o evaporador. Outros componentes auxiliares podem, ou não, estar presentes, tais como, acumulador, recetor, separador de óleo, filtro, secador, válvula de retenção e válvula solenóide. Um ciclo básico de compressão de vapor com os seus quatro componentes fundamentais é apresentado na Figura 2. Este ciclo termodinâmico pode ser descrito do seguinte modo:

1. **Compressor:** que eleva a pressão e, conseqüentemente, a temperatura do fluido refrigerante já previamente aquecido após sair do evaporador. Devido ao gradiente de pressão gerado, o compressor faz com que o fluido refrigerante circule por todo o ciclo termodinâmico;
2. **Condensador:** que transfere a energia térmica do fluido refrigerante durante a sua compressão para a fonte quente, podendo esta ser o ambiente ou a água a ser aquecida;
3. **Válvula de Expansão:** que reduz a pressão do fluido refrigerante para, assim, reduzir a temperatura do mesmo para uma temperatura inferior à do ambiente;
4. **Evaporador:** que transfere a energia térmica da fonte fria para o fluido refrigerante e o encaminha para o compressor, a fim de reiniciar o ciclo termodinâmico.

**FIGURA 2:** Ciclo Básico de Compressão de Vapor.



A principal vantagem destes equipamentos é a sua reversibilidade, isto é, a capacidade de tanto aquecer como arrefecer. Isto só é possível devido à capacidade de inverter o ciclo termodinâmico e, deste modo, inverter a direção do fluxo do fluido refrigerante por meio de uma válvula inversora, ou válvula de quatro vias, como também é conhecida. Dependendo do modo de operação, aquecimento ou arrefecimento, as funções dos permutadores de calor externo e interno são alteradas. Por outras palavras, no caso do aquecimento, o permutador de calor interno é o condensador e o externo o evaporador. No caso do arrefecimento, o permutador de calor interno torna-se o evaporador e o externo o condensador (Staffell et al., 2012; Osterman & Stritih, 2021).

É importante enfatizar o facto de que o compressor é o elemento mais importante de todo o sistema, principalmente no que se refere ao tamanho, custos e consumo energético. As bombas de calor mais básicas apresentam



compressores de velocidade fixa, isto é, o seu funcionamento ocorre apenas para a potência total. Deste modo, o compressor do sistema deve ser ligado e desligado frequentemente para, assim, manter uma determinada temperatura interna. Estes arranques e paragens do sistema implicam uma redução do rendimento do sistema e podem causar variações indesejadas na temperatura pretendida, como por exemplo, ultrapassar a temperatura desejada no aquecimento ou reduzi-la no arrefecimento (Staffell et al., 2012).

O desempenho de uma bomba de calor é caracterizado pelo Coefficient of Performance (COP), que é estimado pela razão da energia térmica fornecida ao ambiente pela energia elétrica utilizada. De acordo com Osterman & Stritih (2021), alguns autores consideram apenas a energia elétrica utilizada pelo compressor, no entanto, a energia elétrica utilizada pelos equipamentos auxiliares, tais como, bombas circuladoras e ventiladores adicionais também deveriam ser considerados (Equação 1). É importante salientar que o COP de aquecimento pode ser diferente do de arrefecimento, de modo que é necessário analisar os dois separadamente.

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}_{compressor} + \dot{W}_{auxiliares}} \quad (1)$$

O COP de qualquer BC é inversamente proporcional ao gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ) entre a fonte fria e a fonte quente, isto é, quanto maior for o diferencial de temperatura entre os ambientes nos quais se encontram o evaporador e o condensador, respetivamente, menor será o desempenho do sistema (Staffell et al., 2012; Osterman & Stritih, 2021).

Apesar de existirem diversos tipos de Bombas de Calor, tais como Ar-Água, Água-Água, Salmoura-Água, Ar-Ar, Água-Ar, Salmoura-Ar, as BC podem ser divididas em duas categorias principais de acordo com a localização do permutador de calor externo, sendo estas as BC aerotérmicas e as BC geotérmicas (Staffell et al., 2012; Carroll et al., 2020).

### 3.1. BOMBAS DE CALOR AEROTÉRMICAS

As BC aerotérmicas, são aquelas que utilizam o ar externo como fonte fria ou fonte quente, conforme a operação em curso. As BC aerotérmicas são extremamente populares em muitos países e muito utilizadas devido à sua ampla variedade de aplicações, à sua flexibilidade e ao seu menor custo de investimento (Staffell et al., 2012; Osterman & Stritih, 2021).

Esta flexibilidade resulta da facilidade de instalação em edifícios já existentes e com pouco espaço disponível, onde outras alternativas seriam inviáveis, como é o caso de apartamentos e outras áreas com uma alta densidade urbana (Carroll et al., 2020). Além disso, numa perspetiva económica, Jenkins et al. (2008) conduziu uma análise económica, no Reino Unido, da qual resulta que as BC aerotérmicas podem apresentar uma redução de quase 60% dos custos anuais em comparação com sistemas de caldeiras e ar-condicionado.

Este tipo de bombas de calor pode ser subdividido em duas categorias, os sistemas Ar-Ar e os sistemas Ar-Água. Na primeira categoria, a energia térmica é distribuída através das condutas de ar do local; já na segunda categoria, a energia térmica é distribuída através de ventilo-convetores, radiadores ou de pisos radiantes (Carroll et al., 2020). Apesar da segunda categoria ser mais utilizada para o aquecimento de ambientes e de águas sanitárias, também é possível a sua utilização para o arrefecimento de ambientes.

As bombas de calor aerotérmicas apresentam, contudo, algumas desvantagens. Devido ao facto de que um maior gradiente de temperatura implica uma redução do desempenho do equipamento, o rendimento das BC aerotérmicas é, geralmente, reduzido nos períodos de maior necessidade de climatização, principalmente no que se refere ao

aquecimento, em virtude de uma maior variação da temperatura do ar ao longo do dia e ao longo do ano (Deng et al., 2019).

Além disso, durante os períodos de aquecimento em locais mais frios e com uma elevada humidade relativa do ar, a exposição do permutador de calor externo acarreta o risco de congelamento do mesmo. Este risco pode, porém, ser amenizado ao instalar o equipamento num local resguardado ou ensolarado (Carroll et al., 2020; Osterman & Strith, 2021).

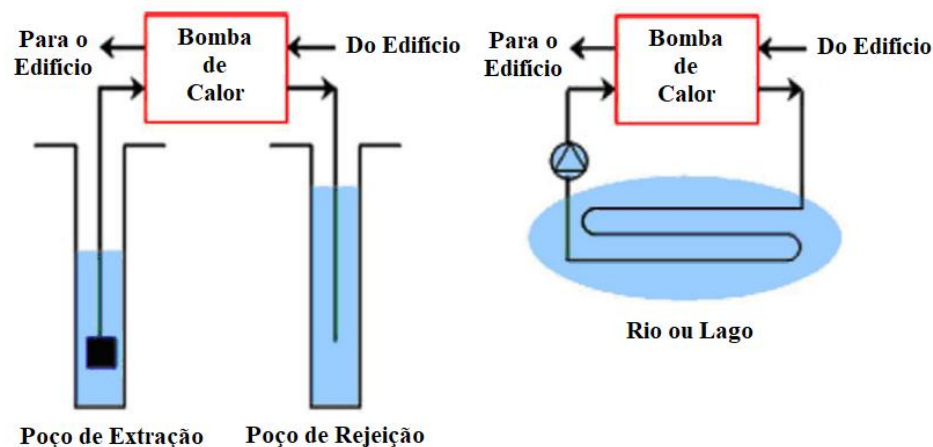
### 3.2. BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS

As bombas de calor geotérmicas, utilizam a terra como fonte quente ou fonte fria, de acordo com a operação em curso. Isto é concretizado por meio de permutadores de calor enterrados no subsolo, o que permite a exploração de uma ótima fonte térmica, podendo esta ser o solo, propriamente dito, ou a água subterrânea. No entanto, a instalação de um sistema geotérmico é significativamente mais dispendiosa e disruptiva, visto que necessita de mais espaço (Mustafa Omer, 2008; Staffell et al., 2012).

As BC geotérmicas são compostas por três subsistemas, sendo estes o subsistema de conexão geotérmico, o subsistema da BC e o subsistema de distribuição. Visto que tais equipamentos podem utilizar a água subterrânea ou o solo, estas são também categorizadas de acordo com o seu subsistema de conexão com a fonte térmica, podendo este ser de circuito aberto ou de circuito fechado. Quando a fonte térmica utilizada é a água subterrânea, a conexão pode ser tanto mediante um circuito aberto quanto fechado. Quando a fonte térmica utilizada é o solo, a conexão é exclusivamente de circuito fechado (Sarbu & Sebarchievici, 2014; Atam & Helsen, 2016).

Nos sistemas de circuito aberto utiliza-se a água de poços artesianos, rios ou lagos (Figura 3). Estes sistemas extraem a água, utilizam-na na troca térmica e, em seguida, rejeitam-na de volta para os recursos hídricos de origem. Embora seja uma opção geotérmica mais barata, visto que pode ser implementada com poços artesianos simples, esta é limitada por fatores como disponibilidade dos recursos hídricos, impurezas na água que podem danificar o sistema e até mesmo as regulações ambientais vigentes relativas ao uso da água subterrânea (Staffell et al., 2012).

**FIGURA 3:** Circuitos Abertos de Bombas de Calor Geotérmicas. Adaptado de: Sarbu & Sebarchievici (2014).

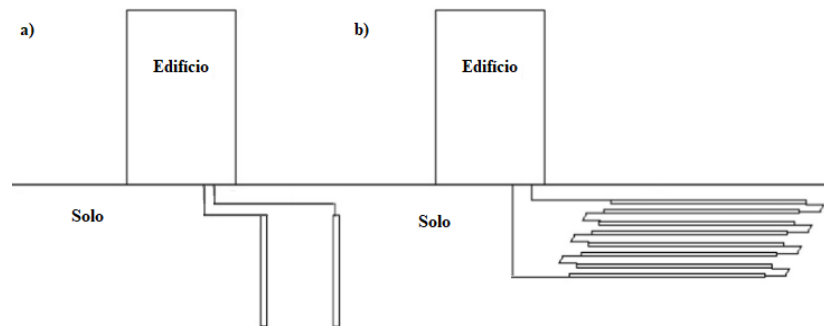


Os circuitos fechados podem ser verticais ou horizontais (Figura 4). Estes circuitos constituem os sistemas mais comuns. Tais sistemas podem ser de expansão direta ou indireta. Nos sistemas de expansão direta o fluido refrigerante circula por tubos de cobre permitindo, assim, uma transferência de calor diretamente entre os tubos e a fonte térmica. Os sistemas de expansão indireta realizam a troca térmica mediante um permutador de calor secundário, no qual circula água ou salmoura. Apesar dos sistemas de expansão direta apresentarem um rendimento relativamente mais elevado, tais sistemas são limitados pelo facto de que o circuito deve ser inteiramente soldado

no mesmo local e requer uma maior carga de fluido refrigerante, cerca de 3 a 10 vezes a carga de um sistema de expansão indireta. Deste modo, tais sistemas caíram num maior desuso devido às regulamentações vigentes, no que se refere às fugas de fluidos refrigerantes. A maior desvantagem dos circuitos fechados, quer verticais quer horizontais, é que, requerem, para além de um estudo geológico do local, a escavação no local, o que eleva significativamente os custos de instalação (Staffell et al., 2012; Lucia et al., 2017).

Apesar dos custos de instalação dos sistemas geotérmicos serem significativamente mais elevados, quando comparados com os sistemas aerotérmicos, aqueles apresentam um rendimento substancialmente maior. Isto deve-se ao facto da temperatura da terra, ao contrário da do ar, dispor de uma maior constância não só ao longo de todo o dia, mas também de todo o ano (Atam & Helsen, 2016; Osterman & Strith, 2021).

**FIGURA 4:** Circuitos Fechados de Bomba de Calor Geotérmica. a) Circuito Vertical b) Circuito Horizontal. Adaptado de: Lucia et al. (2017).



#### 4. COMPARAÇÃO ENTRE AS BC AEROTÉRMICAS E GEOTÉRMICAS NA LITERATURA

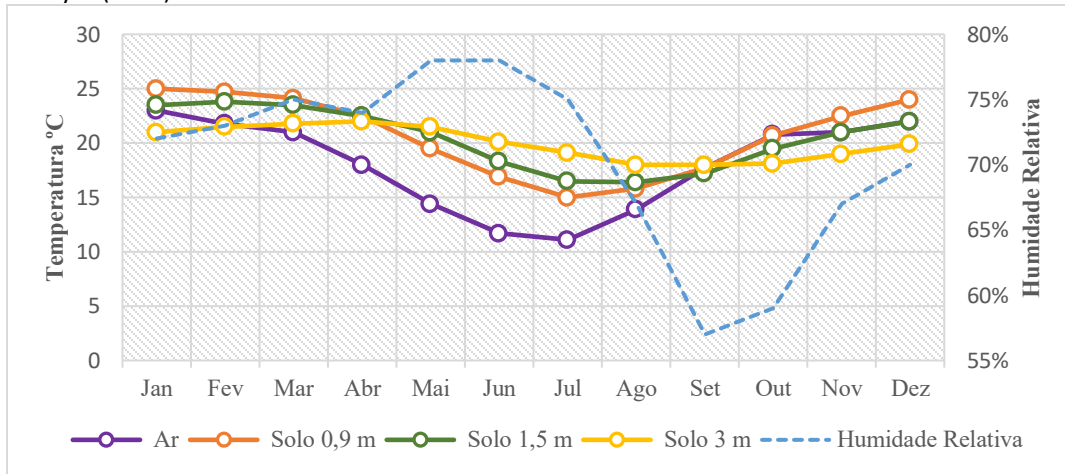
De Swardt e Meyer (2001) conduziram um estudo no qual foi efetuada uma análise comparativa entre o desempenho de BC aerotérmicas e geotérmicas de circuito fechado, sendo ambos os equipamentos reversíveis. Nesse estudo foi analisada, ao longo de todo um ano, a relação entre parâmetros referentes às temperaturas do ar e do solo em diversas profundidades, e também, a humidade relativa do ar, e o desempenho dos equipamentos. O gradiente dos valores medidos pode ser visto no gráfico apresentado na Figura 5, onde é possível perceber que a profundidade do solo é diretamente proporcional a constância da temperatura ao longo do ano.

Atendendo a que, conforme mencionado anteriormente, o gradiente térmico entre a fonte fria e a fonte quente, tem um impacto direto no desempenho do equipamento, e a que o solo apresenta uma maior invariabilidade na temperatura quando comparado ao ar, no referido estudo as BC geotérmicas apresentam um COP consideravelmente maior, de aproximadamente 19% para o arrefecimento e 13% para o aquecimento, tal como pode ser visto nas Figuras 6 e 7, respetivamente (De Swardt & Meyer, 2001). É importante salientar que o estudo foi realizado na África do Sul, de modo que os períodos de arrefecimento e aquecimento são contrários aos do hemisfério norte.

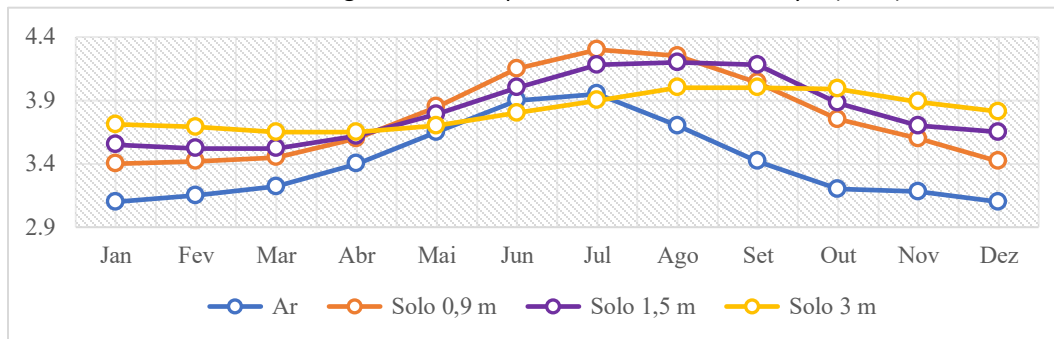
Visto que os sistemas geotérmicos, apesar de requererem um maior investimento inicial, apresentam um rendimento consideravelmente maior, em virtude de uma menor variação do gradiente térmico, os custos operacionais destes acabam por serem inferiores aos dos sistemas aerotérmicos (De Swardt & Meyer, 2001), o que pode justificar a sua aquisição em determinados casos, como é, possivelmente, o caso do biotério, uma vez que requer uma utilização constante do sistema AVAC.



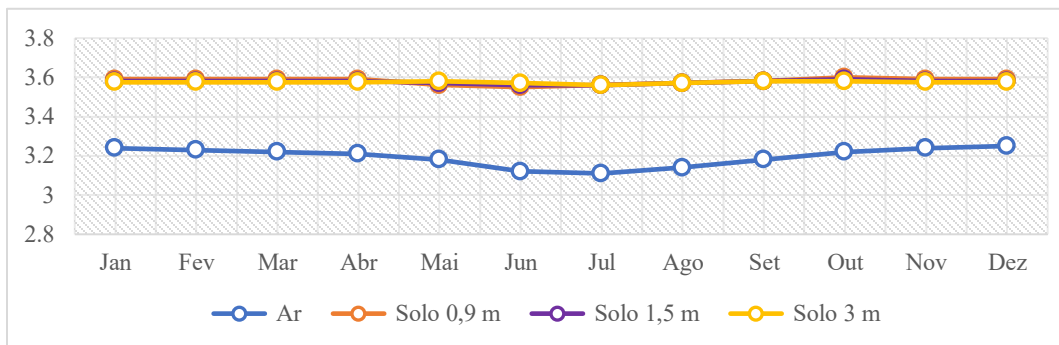
**FIGURA 5:** Propriedades mensais do ar e do solo (Pretoria, África do Sul) ao longo de um ano. Adaptado de: De Swardt & Meyer (2001).



**FIGURA 6:** COP de arrefecimento ao longo do ano. Adaptado de: De Swardt & Meyer (2001).



**FIGURA 7:** COP de aquecimento ao longo do ano. Adaptado de: De Swardt & Meyer (2001).



## 5. CASO DE ESTUDO

O presente caso estudo justifica-se pelo facto de que somente o sistema AVAC representa 70% da eletricidade consumida no biotério. E este, apesar de corresponder a menos de 3% da área da FCS, representa cerca de 7% do consumo total das instalações. Além disso, o consumo médio por metro quadrado do biotério representa mais do que o triplo do resto das instalações, sendo estes 218 kWh/m<sup>2</sup> e 70 kWh/m<sup>2</sup>, respetivamente (Barandier, 2020; Barandier & Cardoso, 2022).

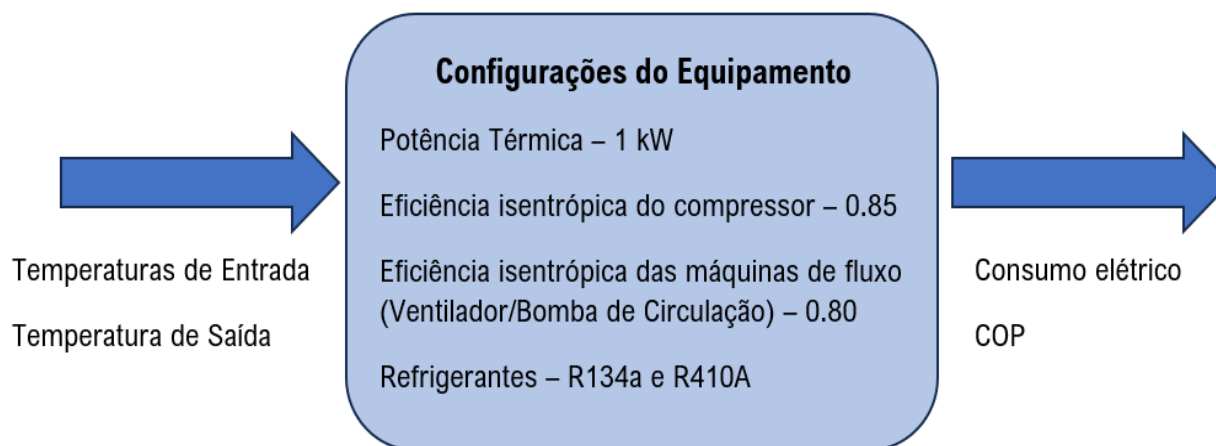
Visto que os *chillers* e caldeiras, responsáveis pelo arrefecimento e aquecimento, respetivamente, se encontram, atualmente, no fim da sua vida útil, deverão ser consideradas alternativas para uma eficiente gestão destes ativos. Além disso, uma vez que se trata de um ambiente crítico, tais equipamentos devem funcionar ininterruptamente a fim de manter as condições internas, o que acaba por elevar o consumo energético das instalações.



Com o propósito de avaliar qual a melhor solução para o local, duas BC com a mesma configuração, com exceção da fonte externa, foram consideradas. As modelações de uma BC aerotérmica e de uma BC geotérmica foram realizadas em Python por meio do pacote TESPpy, *Thermal Engineering Systems in Python*, (Witte & Tuschy, 2020) e ambos os equipamentos foram simulados quer para o aquecimento quer para o arrefecimento do local. Uma melhor exemplificação do algoritmo encontra-se ilustrada na Figura 8, onde os dados de entrada referem-se às temperaturas da fonte quente e da fonte fria a fim de fornecer ou retirar 1 kW de carga térmica nas operações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

Para a BC geotérmica, foi selecionado um circuito fechado dado que uma análise hidrológica do local ainda deverá ser realizada para verificar a disponibilidade da utilização dos recursos hídricos. Ainda que possam possuir outros componentes que melhorem o COP, tais como acumuladores, depósitos de líquido e sistemas de armazenamento térmico, o ciclo termodinâmico básico de compressão de vapor mencionado anteriormente foi selecionado para uma maior simplicidade do sistema.

**FIGURA 8:** Fluxograma do Algoritmo.



Os dados relativos às temperaturas do ar utilizados na simulação da BC aerotérmica correspondem às temperaturas médias mínimas e máximas, registadas durante o inverno e o verão, uma vez que são os períodos de maior utilização do equipamento. Já os dados relativos às temperaturas do solo na simulação da BC geotérmica foram coletados a diversas profundidades como se descreve na secção 5.1. As temperaturas consideradas neste estudo podem ser encontradas nas Tabelas 1 e 2.

**TABELA 1:** Temperatura do Ar Externo.

TEMPERATURA DO AR EXTERNO, NO INVERNO (°C)	TEMPERATURA DO AR EXTERNO, NO VERÃO (°C)
-4	26
-2	28
0	30
2	32
4	34
6	36
8	38
10	40



### 5.1. RECOLHA DE DADOS GEOTÉRMICOS

Procedeu-se à realização de 12 furos com uma profundidade de 100 metros, numa zona de afloramento granítico, no Vale do rio Alva, no concelho de Oliveira do Hospital. Ainda que o local de perfuração não corresponda exatamente ao local de estudo, por se encontrarem na mesma região, os valores de temperatura podem ser considerados homogêneos. Todas as captações apresentam características idênticas de furação. Apresenta-se um exemplo típico:

- Furos com inclinação vertical.
- Método de furação: Rotopercurssão.
- Profundidade máxima: 100 m.
- Diâmetro: iniciou-se com 12" até 6 m, continuou com 10" até 80 m, e finalizou-se com 6,5" até aos 100 m, sendo necessário o estrangulamento por conta de pressões laterais.
- Embuquilhamento: Um tubo liso de PVC com densidade 12,5 kg/m<sup>2</sup> e 190 mm de diâmetro foi inserido até uma profundidade de 64 m. Em seguida, com o propósito de impedir eventuais misturas com água de aquíferos superiores e do Rio Alva, foi aplicado maciço filtrante em material impermeável (cimentação).
- Sequência geológica atravessada: terreno vegetal de 0,3 m, granito essencialmente biotítico, porfiróide de grão grosseiro, até aos 100 m com diferentes estágios de alteração e de fraturação.

De todos estes furos apenas um se apresenta produtivo, com água mineral natural do tipo sulfúrea, com um caudal da ordem de 10 l/s. Este recurso hidromineral embora de baixa entalpia, constitui uma ótima reserva energética que se conserva de forma permanente ao longo do ano.

As temperaturas em todos os furos, produtivos ou não, foram registadas com o auxílio de uma sonda multiparamétrica. As temperaturas efetuadas ao longo do ano apontam para um gradiente de temperatura constante entre os 15 °C (mais próximo à superfície) e os 28 °C até aproximadamente 20 metros, apresentando 33 °C até aos 100m.

Os furos sem produtividade, permaneceram em *open hole*, isto é, abertos. Nestes furos, os registos de temperatura apresentam valores entre os 15 e os 100 m de profundidade, nos quais a temperatura registada é constante e de cerca de 26 °C.

**TABELA 2:** Temperatura do solo.

PROFUNDIDADE (M)	TEMPERATURA DO SOLO (°C)
1	15
2	18
4	21
8	24
16	26
20	28

O sistema/equipamento preconizado pressupõe a instalação de uma bomba de calor geotérmica, com sistema de captação vertical no furo, com recuperação de calor através de um segundo condensador, possibilitando desta forma a produção de água quente e de água fria em simultâneo. De referir que a água fria produzida será, em termos energéticos, praticamente gratuita, aproveitando para tal, a energia despendida na produção de água quente. Em complemento às bombas de calor geotérmicas serão instalados depósitos de acumulação de água quente e água fria. Estes irão funcionar como acumuladores de inércia térmica permitindo que em situações de cargas parciais, previsivelmente um quarto do período de funcionamento da instalação, não será necessário o recurso ao funcionamento das bombas de calor geotérmicas, ficando a instalação a funcionar apenas com a energia acumulada nos depósitos de inércia — funcionamento a carga parcial.



A bomba de calor geotérmica faz trocas de calor com o recurso, tirando partido da temperatura aproximadamente constante a que ele se encontra em sistema fechado. No Verão é energeticamente mais eficiente conseguir a temperatura confortável de 22 °C, partindo do sistema projetado em recuperação de energia, já que a carga térmica necessária para manter as temperaturas desejadas é similar às necessidades de arrefecimento do edifício. Existe apenas permuta entre o recurso hidromineral quando o sistema deixa de estar em equilíbrio.

Com base nestes dados o COP das BC para diversas temperaturas foi calculado. Ainda que seja possível calculá-lo para os mais diversos fluidos refrigerantes, as simulações do presente estudo foram efetuadas utilizando o R134a e o R410A. Estes fluidos, apesar de serem hidrofluorcarbonetos que nos próximos anos serão descontinuados em virtude das vigentes regulações, ainda são utilizados em muitos sistemas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como pode ser visto a seguir, o desempenho das BC geotérmicas é superior ao das aerotérmicas em ambas as operações de aquecimento e arrefecimento quer com o fluido refrigerante R134a quer com o R410A.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os COP das BC geotérmica e aerotérmica com R134a como fluido refrigerante. Os cenários considerados foram quer o modo de aquecimento quer de arrefecimento em diversas temperaturas do solo e do ar. No modo de aquecimento, Figura 9, considerando-se as temperaturas mínimas do solo e do ar, 15 e -4 °C, respetivamente, o COP da BC geotérmica (3,97) revelou-se 48% superior ao da BC aerotérmica (2,69). No modo de arrefecimento com o mesmo fluido, Figura 10, e com as temperaturas máximas do solo e do ar de 28 e 40 °C, respetivamente, o COP da BC geotérmica (3,70) também se revelou superior (2,71). Desta vez, em cerca de 37%.

Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os COP das BC geotérmica e aerotérmica, desta vez com R410A como fluido refrigerante. Os cenários considerados foram os mesmos. No modo de aquecimento, Figura 11, considerando-se as temperaturas mínimas do solo e do ar, 15 e -4 °C, respetivamente, o COP da BC geotérmica (3,70) revelou-se cerca de 44% superior ao da BC aerotérmica (2,57). No modo de arrefecimento, Figura 12, com o mesmo fluido e com as temperaturas máximas do solo e do ar de 28 e 40 °C, respetivamente, o COP da BC geotérmica (3,38) também se revelou superior (2,34). Desta vez, em cerca de 44%.

**FIGURA 9:** COP de aquecimento x temperatura do ar e do solo — R134a.

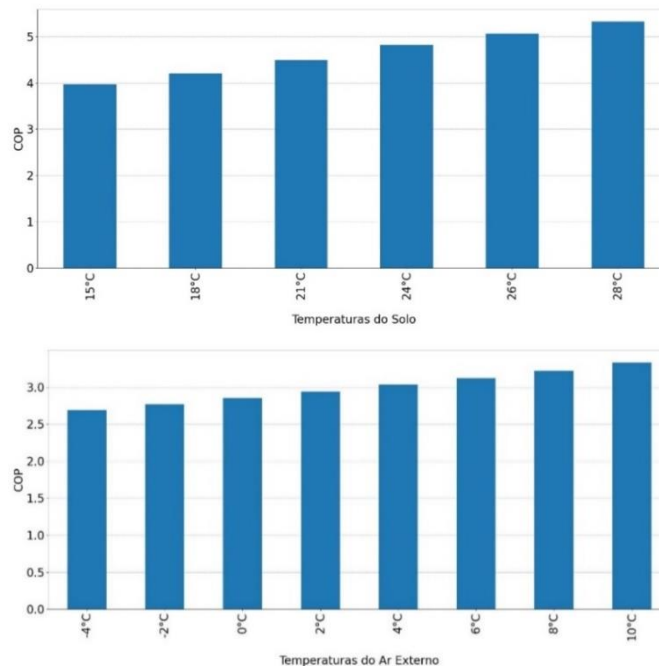




FIGURA 10: COP de Arrefecimento x Temperaturas do Ar e do Solo — R134a.

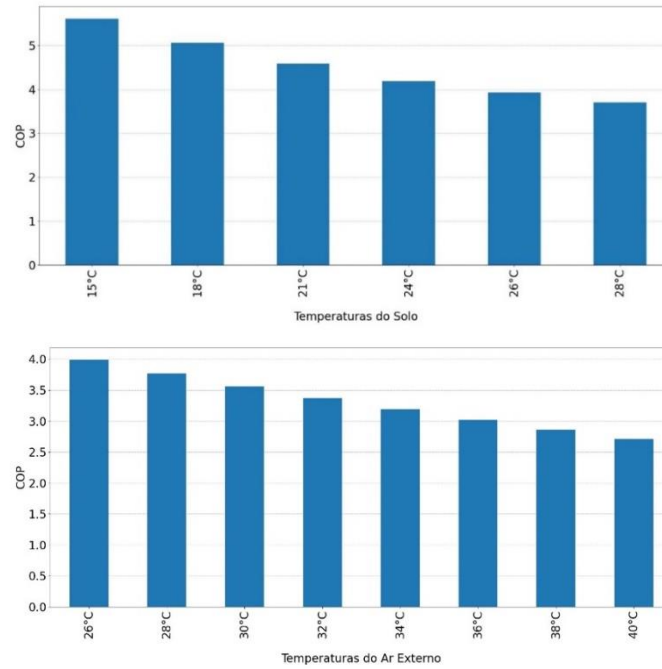


FIGURA 11: COP de Aquecimento x Temperaturas do Ar e do Solo — R410A.

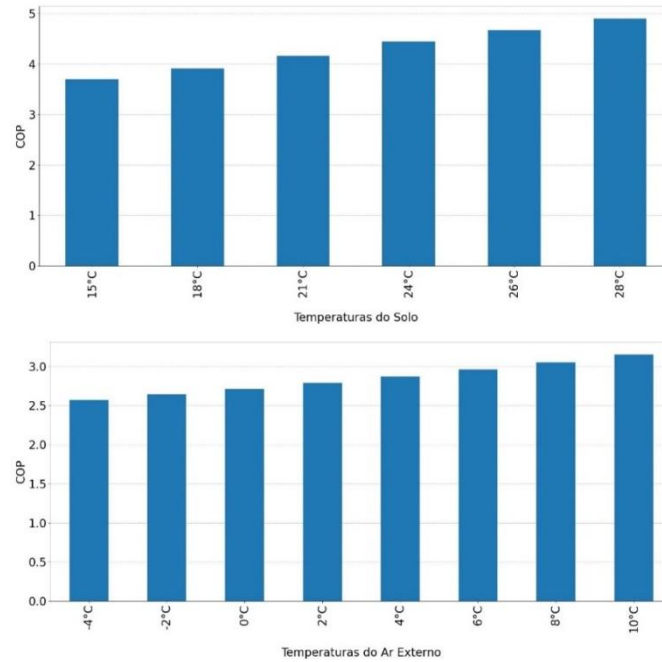
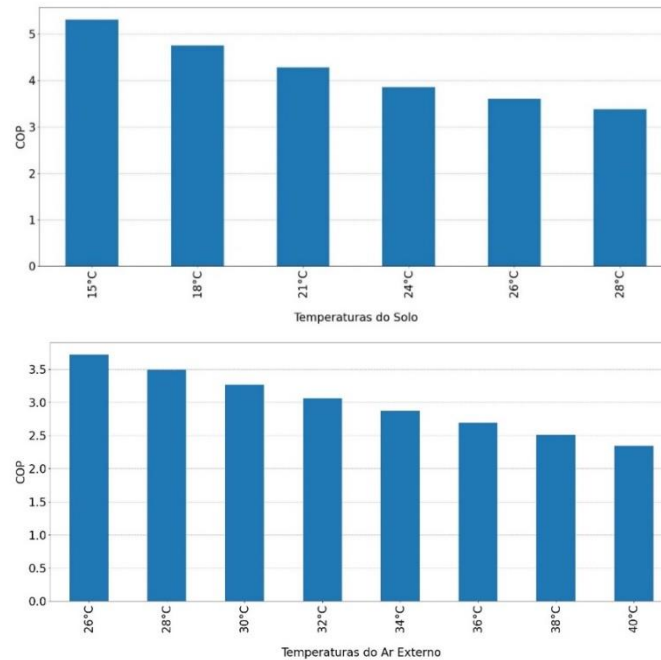




FIGURA 12: COP de Arrefecimento x Temperaturas do Ar e do Solo — R410A.



## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma breve discussão e análise no que se refere às tecnologias de bombas de calor aerotérmicas e geotérmicas. Esta análise insere-se na tomada de decisão acerca de alternativas de projetos de investimento relativos à substituição de equipamentos AVAC, *chillers* para o arrefecimento e caldeiras para o aquecimento, que já se encontram num período de fim de vida útil. Tal gestão de ativos reveste-se de suma importância, visto que a mesma se refere a um ambiente crítico, concretamente um biotério, onde o sistema AVAC é ininterruptamente utilizado e qualquer anomalia no seu funcionamento pode assumir consequências drásticas.

Apesar das bombas de calor aerotérmicas, quando comparadas às geotérmicas, apresentarem uma maior vantagem no que se refere aos custos de aquisição, por constituir um investimento inicial mais reduzido, esta tecnologia também se revela particularmente vulnerável às alterações climáticas e propriedades do ar, o que pode afetar negativamente o seu desempenho e, por consequência, os seus custos operacionais, restringindo, assim, a viabilidade do investimento.

No que se refere à tecnologia geotérmica, a qual pode apresentar diversos tipos, para além da necessidade de um investimento inicial relativamente maior, é também necessário tomar em consideração a instalação do subsistema de conexão geotérmico, visto que requer mais espaço, caso a conexão geotérmica seja diretamente no solo, ou a disponibilidade de recursos hídricos, caso a conexão geotérmica seja efetuada com recurso a poços, rios ou outra fonte hídrica. No entanto, para além de um recurso renovável, a energia geotérmica apresenta diversas vantagens relativamente a outras fontes de energia renováveis e tradicionais, visto não sofrer, nomeadamente, da intermitência e inconstância de fatores meteorológicos que condicionam, por exemplo, a energia eólica, solar térmica e fotovoltaica ou hídrica. Deste modo, a tecnologia geotérmica apresenta um desempenho consideravelmente maior, e por consequência, menores custos operacionais.

Embora seja ainda necessário efetuar um cálculo exaustivo da carga térmica de todo o biotério, para determinar de forma adequada os requisitos de aquecimento e arrefecimento, as tecnologias de bombas de calor geotérmicas revelam-se, porventura, mais vantajosas, numa perspetiva económica, o que constituirá um dos trabalhos a serem desenvolvidos futuramente. Isto deve-se ao facto de que, dependendo das circunstâncias, o equipamento pode ter



um COP superior em mais de 100% em relação às bombas de calor aerotérmicas. Deste modo, a aquisição das BC geotérmicas pode ser justificada pelo facto de que estas apresentam custos operacionais consideravelmente menores e que estarão num regime de funcionamento ininterrupto.

Atendendo a que o local dispõe de espaço suficiente de implantação, bem como de recursos hídricos, conclui-se que há diversas possibilidades para a implementação de um sistema de tecnologia geotérmica. Por forma a determinar o tipo mais adequado de sistema, está prevista a realização a curto-prazo de um estudo geológico e hidrológico do local. Antevê-se, no entanto, que circuitos fechados verticais, conectados diretamente no solo, se podem revelar como uma ótima solução, dado que o local não sofreria uma disrupção tão intensa devido ao processo de escavação e não seria necessária a utilização de recursos hídricos.

Em conclusão, para além dos fatores económicos, também fatores operacionais e ambientais, como a unificação dos sistemas de aquecimento e arrefecimento e a redução das emissões de GEE, respetivamente, a substituição dos atuais equipamentos de AVAC, ainda que apenas para a zona do biotério, por bombas de calor de compressão de vapor, revela-se como uma solução promissora para uma eficiente estratégia na gestão dos ativos do sistema AVAC de um ambiente crítico.

### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), no âmbito do Projeto POCI-01-0145-FEDER-029494; e por Fundos Nacionais através da FCT — Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito dos Projetos PTDC/EEI-EEE/29494/2017, UIDB/04131/2020 e UIDP/04131/2020.

### REFERÊNCIAS

APA. (2019). *Plano Nacional Energia e Clima. Plan Nacional de Energia y Clima 2021–2030 (PNIEC), 2030(Pnec 2030)*, 1–200. <https://energia.gob.es/es-es/Participacion/Paginas/DetalleParticipacionPublica.aspx?k=236>

Atam, E., & Helsen, L. (2016). Ground-coupled heat pumps: Part 1 — Literature review and research challenges in modeling and optimal control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1653–1667. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.007>

Barandier, P. H. N. C. W. (2020). *O Controlo da Qualidade e Manutenção na Gestão Energética Associada à Redução de Custos Mediante a Implementação de Princípios Lean e Ferramentas da Qualidade*. MSc Thesis, Universidade da Beira Interior (Portugal).

Barandier, P., & Cardoso, A. J. M. (2022). *Asset Management and Energy Improvements in a Critical Environment — The Case of a University Bioterium* (pp. 364–373). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96794-9\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96794-9_33)

Carroll, P., Chesser, M., & Lyons, P. (2020). Air Source Heat Pumps field studies: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110275>

CEN/TC 247. (2006). *prEN 15232 (official 2007)*. Energy performance of buildings — Impact of Building Automation Control and Building Management. 00247046, 1–63.

De Swardt, C. A., & Meyer, J. P. (2001). A performance comparison between an air-source and a ground-source reversible heat pump. *International Journal of Energy Research*, 25(10), 899–910.



- Deng, J., Wei, Q., Liang, M., He, S., & Zhang, H. (2019). Does heat pumps perform energy efficiently as we expected: Field tests and evaluations on various kinds of heat pump systems for space heating. *Energy and Buildings*, 182, 172–186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.014>
- Duarte, M. V. (2013). *Estudo da bomba de calor — Fluidos de trabalho e eficiência energética* (Master's dissertation). Retrieved from Ubi Thesis.
- FMUC. (n.d.). *Biotério*. Biotério. Retrieved December 10, 2020, from <https://www.uc.pt/fmuc/bioterio>
- Institui, A., & Oficial, J. (2019). ► *B DIRECTIVA 2010/63/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 22 de Setembro de 2010 relativa à protecção dos animais utilizados para fins científicos*. 19, 1–61.
- Jenkins, D., Tucker, R., Ahadzi, M., & Rawlings, R. (2008). The performance of air-source heat pumps in current and future offices. *Energy and Buildings*, 40(10), 1901–1910. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.04.015>
- Langley, B. C. (1989). *Heat Pump Technology: Systems Design, Installation, and Troubleshooting* (2.<sup>a</sup> ed.). Prentice Hall.
- Lucia, U., Simonetti, M., Chiesa, G., & Grisolia, G. (2017). Ground-source pump system for heating and cooling: Review and thermodynamic approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 867–874. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.268>
- MacKay, D. J. C. (2008). *Sustainable Energy—without the hot air*. UIT cambridge.
- Mustafa Omer, A. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344–371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>
- Osterman, E., & Stritih, U. (2021). Review on compression heat pump systems with thermal energy storage for heating and cooling of buildings. *Journal of Energy Storage*, 39, 102569.
- Portuguesa, R. (n.d.). *ROTEIRO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA 2050 (RNC2050) ESTRATÉGIA DE LONGO PRAZO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA DA ECONOMIA PORTUGUESA EM 2050 PT Ambiente*.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 70, 441–454. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>
- Staffell, I., Brett, D., Brandon, N., & Hawkes, A. (2012). A review of domestic heat pumps. *Energy and Environmental Science*, 5(11), 9291–9306. <https://doi.org/10.1039/c2ee22653g>
- UBI. (2017). *Inauguração do BioBanco da Faculdade de Ciências da Saúde*. <https://www.ubi.pt/Noticia/5899>
- Witte, F., & Tuschy, I. (2020). Tespy: Thermal engineering systems in python. *Journal of Open Source Software*, 5(49), 2178.



### DECLARAÇÃO ÉTICA

**CONFLITO DE INTERESSE:** Nada a declarar. **FINANCIAMENTO:** Este trabalho foi suportado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), no âmbito do Projeto POCI-01-0145-FEDER-029494; e por Fundos Nacionais através da FCT — Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito dos Projetos PTDC/EEI-EEE/29494/2017, UIDB/04131/2020 e UIDP/04131/2020. **REVISÃO POR PARES:** Dupla revisão anónima por pares.



Todo o conteúdo da **RAE — REVISTA DE ATIVOS DE ENGENHARIA** é licenciado sob [Creative Commons](#), a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.




**PERSPETIVA DAS COMUNIDADES TÉCNICA E CIENTÍFICA SOBRE O CORPO DE  
CONHECIMENTO DA GESTÃO DE ATIVOS**  
***PERSPECTIVES OF THE TECHNICAL AND SCIENTIFIC COMMUNITIES OVER THE  
ASSET MANAGEMENT BODY OF KNOWLEDGE***


[10.29073/rae.v2i1.794](https://doi.org/10.29073/rae.v2i1.794)


**RECEÇÃO:** 4 de outubro de 2023.


**APROVAÇÃO:** 6 de outubro de 2023.


**PUBLICAÇÃO:** 6 de fevereiro de 2024.

**AUTOR/A 1:** Joana Torcato , Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal, [joana.estevao.torcato@tecnico.ulisboa.pt](mailto:joana.estevao.torcato@tecnico.ulisboa.pt).

**AUTOR/A 2:** Daniel Gaspar , Instituto Politécnico de Viseu, Portugal, [daniel.gaspar@tecnico.ulisboa.pt](mailto:daniel.gaspar@tecnico.ulisboa.pt).

**AUTOR/A 3:** Francielle dos Santos , Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Brasil, [francielle.santos@ifg.edu.br](mailto:francielle.santos@ifg.edu.br).

**AUTOR/A 4:** João Vieira , Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal, [joao.cardoso.vieira@tecnico.ulisboa.pt](mailto:joao.cardoso.vieira@tecnico.ulisboa.pt).

**AUTOR/A 5:** Nuno Almeida , Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal, [nunomarquesalmeida@tecnico.ulisboa.pt](mailto:nunomarquesalmeida@tecnico.ulisboa.pt).

## RESUMO

Este artigo apresenta um estudo sobre a perceção da importância dos vários temas do corpo de conhecimento da gestão de ativos. O estudo baseia-se em resultados obtidos através de inquéritos realizados envolvendo uma amostra de representantes de instituições de ensino superior, de centros de investigação, da indústria, da gestão pública e da sociedade civil, que exercem atividades ou estão de alguma forma relacionadas com a gestão de ativos. Esta amostra inclui participantes em congressos nacionais (CongrEGA) e internacionais (WCEAM) sobre gestão de ativos de engenharia, membros da comissão técnica nacional de normalização sobre gestão de ativos (CT 204) e também instituições de ensino superior com programas de ensino sobre o tema. Os resultados são apresentados numa escala de valores de 1 a 5, para descrever a importância relativa percebida em relação às diferentes áreas de gestão de ativos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gestão De Ativos; Corpo De Conhecimento; Perceção.

## ABSTRACT

This article presents a study on the perceived importance of the various themes of the asset management body of knowledge. The study is based on the results of surveys conducted involving a sample of representatives from higher education institutions, research centers, industry, public management, and civil society who carry out activities related to asset management. This sample includes participants in the national (CongrEGA) and international (WCEAM) congresses on engineering asset management, members of the national standardization technical committee on asset management (CT 204), and higher education institutions with teaching programs on the subject. The results are presented on a scale of values 1 to 5 to describe the perceived relative importance of different asset management areas.

**KEYWORDS:** Asset Management; Body of Knowledge; Perception.



## 1. INTRODUÇÃO

A gestão de ativos é uma matéria cada vez mais debatida e estudada e que está a ganhar uma expressão cada vez mais significativa em vários países, tanto em organizações do sector público como privado, e em diferentes setores de atividade e áreas de aplicação (Almeida, 2023).

A partir sobretudo da década de 80 do século passado, começaram a realizar-se estudos científicos sobre o conceito e as técnicas da gestão de ativos, tanto focados em questões financeiras como em questões de engenharia e de modo mais ou menos integrado. Com a experiência acumulada e a implementação prática desses conceitos e técnicas, o termo gestão de ativos passou a ser utilizado para expressar as atividades coordenadas e o alinhamento das funções financeiras e não financeiras envolvidas na realização de valor a partir dos ativos das organizações (Almeida, 2023).

O percurso de consolidação do corpo de conhecimento científico sobre a gestão de ativos conta já com várias décadas e atingiu um marco importante em 2014 com a publicação das primeiras versões das normas internacionais ISO 55000, 55001 e 55002 sobre gestão de ativos (Almeida, 2021). As normas da família ISO 5500x, apesar de estarem orientadas principalmente para os ativos físicos, podem ser aplicadas a qualquer tipo de ativos, assim como, a qualquer tipo de organização, independentemente da sua dimensão (Hodkiewicz, 2015).

Fruto dos desenvolvimentos paralelos em diferentes áreas, a perceção da importância dos diferentes tópicos abrangidos pelo corpo de conhecimento da gestão de ativos tende a variar dentro da comunidade técnico-científica, quer a nível internacional, quer a nível nacional, como foi observado no trabalho desenvolvido por Almeida et al. (2023). Por este motivo, considera-se relevante analisar e comparar os resultados de questionários realizados com o intuito de captar as diferentes perceções das comunidades técnica e científica sobre a relevância desses mesmos tópicos.

O artigo está estruturado da seguinte forma. Na Secção 2, é apresentada a metodologia de investigação deste estudo. A Secção 3 apresenta e discute os resultados dos inquéritos relativos a perceção da relevância dos tópicos de gestão de ativos a nível nacional e internacional, o contexto organizacional e a perspetiva académica. A Secção 4 identifica as lacunas de conhecimento e as direções futuras da investigação, concluindo este artigo.

## 2. METODOLOGIA

Realizaram-se inquéritos às comunidades técnicas e científicas nacionais e internacionais que exercem atividades relacionadas com a gestão de ativos. Os participantes foram agrupados em 5 amostras distintas (Tabela 1):

- questionários distribuídos entre os membros da comissão técnica nacional de normalização CT 204 Gestão de Ativos (comité nacional “espelho” da ISO/TC 251 Gestão de Ativos), em 2020 e em 2022 (Almeida et al., 2021 e 2022);
- questionários distribuídos entre os participantes com trabalhos submetidos no 1.º Congresso Nacional de Gestão de Ativos de Engenharia (CongrEGA), realizado em 2022;
- inquéritos rápidos realizados a participantes no World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM) em 2017
- grupo decisório sobre o esquema de reconhecimento de programas académicos do ensino superior em gestão de ativos de engenharia proposto pela International Society of Engineering Asset Management (ISEAM), conduzido em 2019.



TABELA 1: Organização dos inquiridos e percentagens de resposta.

	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS				
	AMOSTRA PORTUGAL			AMOSTRA INTERNACIONAL	
	CONGREGA (2022)	CT 204 (2022)	CT 204 (2020)	IES (2019)	WCEAM (2017)
Dimensão da amostra	98	60	42	4	22
Percentagem de respostas	18%	38%	60%	100%	100%

Para coletar a perceção a relevância dos tópicos da gestão de ativos, os questionários foram elaborados na plataforma Google Forms e divididos em 2 blocos. O primeiro bloco, compostos por grupos de perguntas, com o propósito de descrever as organizações e os inquiridos no contexto das mesmas (Parte A). O segundo bloco foi concebido para captar a relevância percecionada dos 39 tópicos divididos em seis áreas principais (Parte B), a saber: (1) estratégia e planeamento, (2) tomada de decisões, (3) atividades do ciclo de vida, (4) conhecimento dos ativos, (5) organização e pessoas, e (6) risco e revisão. Os 39 tópicos de gestão de ativos foram organizados segundo as orientações do GFMAM Asset Management Landscape (GFMAM, 2014). A classificação da importância de cada tópico foi feita por recurso a uma escala entre 1 a 5 pontos, em que 1 correspondia a “não relevante”, 2 a “ligeiramente relevante”, 3 a “moderadamente relevante”, 4 a “relevante” e 5 a “muito relevante”. Os dados de resposta foram posteriormente extraídos para o programa Excel e analisados com as ferramentas disponíveis neste mesmo programa.

A perspetiva académica sobre o ensino da gestão de ativos foi obtida, em 2019, com representantes de 4 Instituições de Ensino Superior (IES), por meio de um grupo decisório dedicado a implementar o esquema proposto pelo International Society of Engineering Asset Management (ISEAM) para o reconhecimento de programas académicos do ensino superior em gestão de ativos. O esquema de reconhecimento pressupõe que os elementos do programa de ensino numa IES, tais como os conteúdos programáticos, os métodos implementação e as formas de ensino (à distância, presencial ou híbrida), sejam validados por uma entidade respeitada no âmbito profissional, tal como o ISEAM (Almeida et al., 2023). Foi solicitado a cada participante do grupo de foco que atribuisse uma classificação às iniciativas de ensino sobre gestão de ativos nas respetivas IES, para cada um dos 39 tópicos.

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS INQUIRIDO

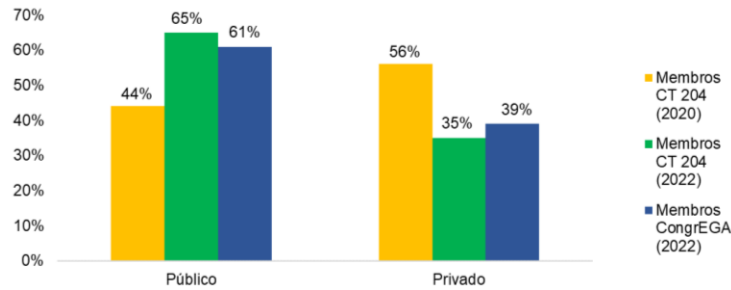
Com base na Figura 1, é de notar que os inquiridos em Portugal asseguram uma boa representação, quer do setor público, quer do setor privado.

Na Figura 2 apresenta-se a distribuição desses mesmos inquiridos segundo 5 grupos de atividades económicas, agregados a partir do sistema de codificação usado pela Classificação das Atividades Económicas (CAE) usada em Portugal. Bem como a caracterização global da atividade económica portuguesa em 2020.

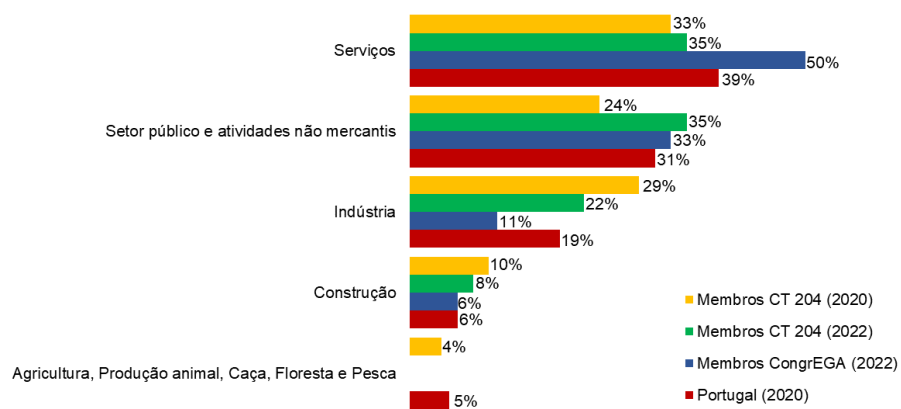
Os resultados obtidos para a questão “Como caracteriza a missão ou atividade principal da sua organização” estão representados na Figura 3. Os resultados confirmam uma presença importante de entidades gestoras de ativos na maioria das amostras, seguidas de organizações que fornecem ou prestam serviços. A participação de organizações com um papel de influência na sociedade também é significativa no meio das comunidades técnicas e científicas portuguesas inquiridas.



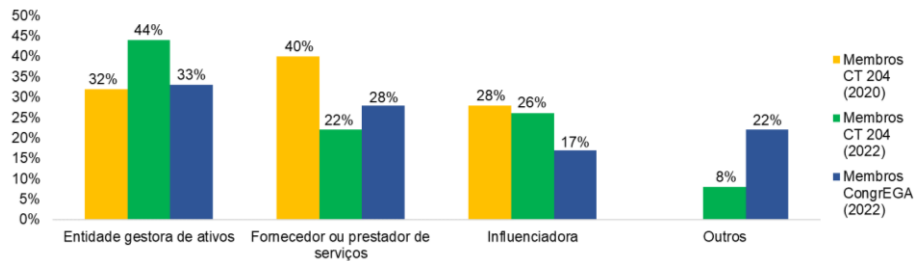
**FIGURA 1:** Setor de atuação dos inquiridos.



**FIGURA 2:** Comparação da distribuição dos inquiridos por grupos de atividades económicas com a distribuição nacional.



**FIGURA 3:** Classificação da atividade principal das organizações em matéria de gestão de ativos.



A Figura 4 caracteriza o portefólio de ativos das organizações abrangidas. Como se pode observar, existe uma maior incidência em ativos físicos, mas também se identificam ativos não-físicos. Como referido anteriormente, apesar das normas da família ISO 5500x estarem orientadas principalmente para os ativos físicos, as mesmas podem ser aplicadas a qualquer tipo de ativos, assim como, a qualquer tipo de organização, independentemente da sua dimensão.

Na Figura 5 apresentam-se a distribuição de resultados relativos à questão “Como caracteriza as atividades de gestão de ativos que desempenha na sua organização?”. As 5 funções que os inquiridos mais desempenham, de uma forma geral, estão relacionadas com engenharia, investigação, desenvolvimento e inovação, ensino e formação, gestão de ativos e manutenção.



FIGURA 4: Classificação do portfólio de ativos das organizações.

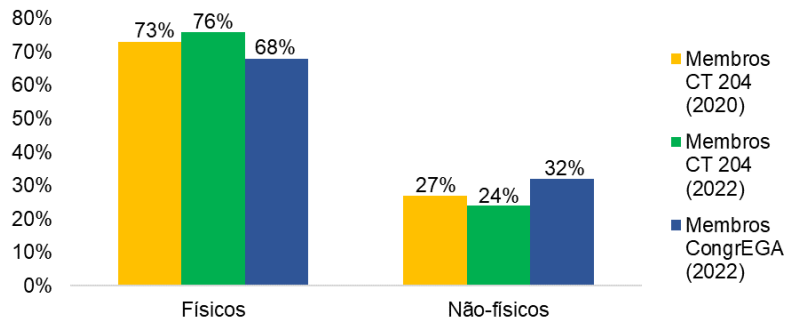
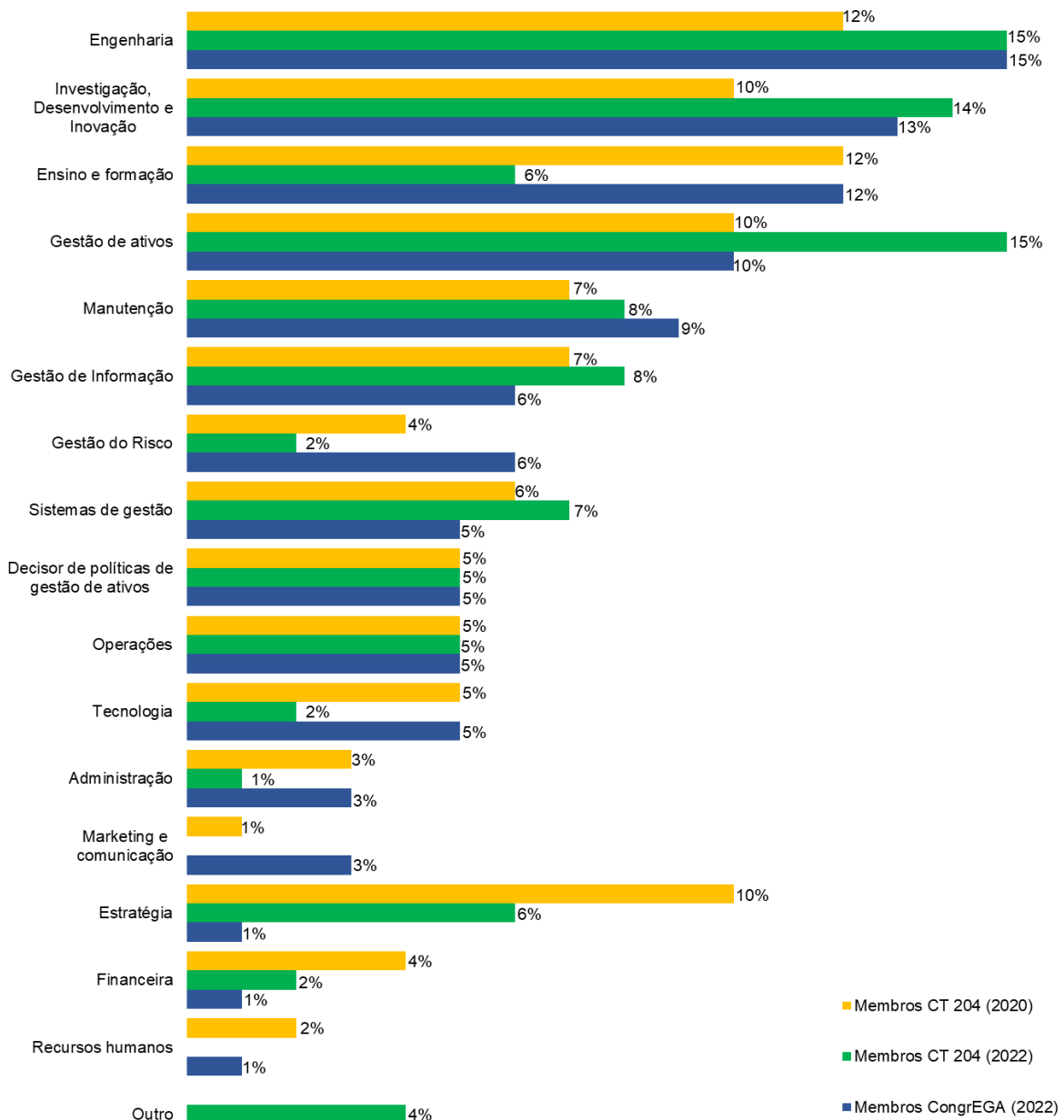


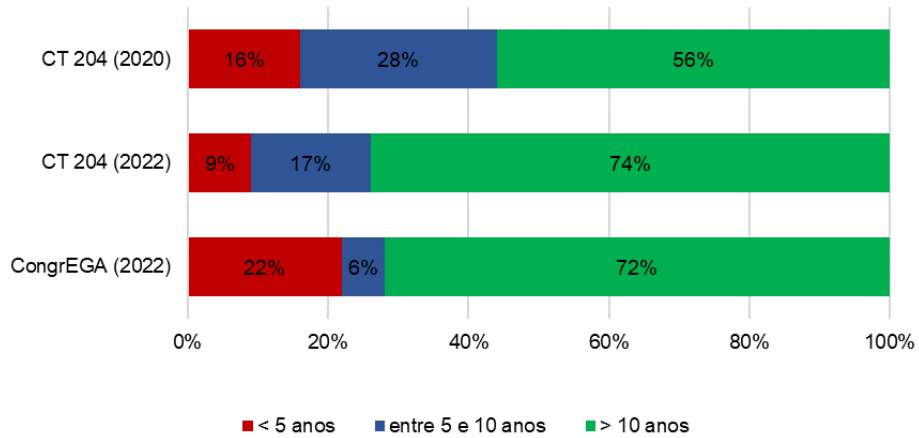
FIGURA 5: Funções desempenhadas pelos inquiridos nas organizações.



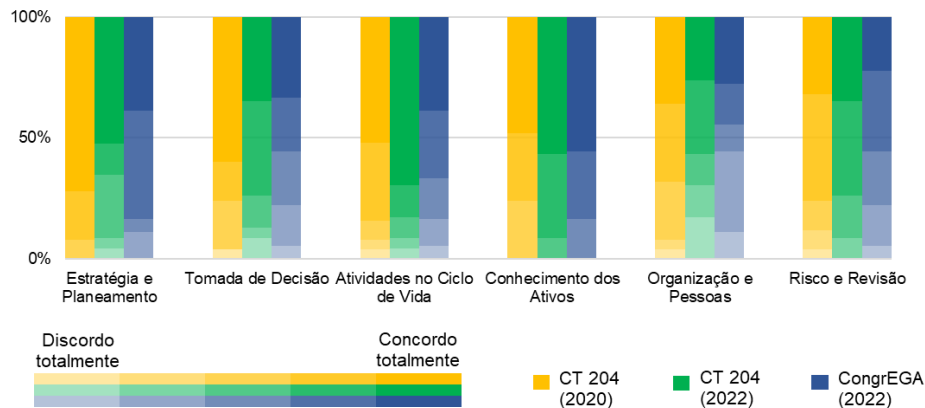


Os mesmos inquiridos foram ainda questionados sobre a sua experiência no desempenho das respetivas funções. Foram ainda questionados sobre a sua perceção relativa às áreas da gestão de ativos em que as suas funções se enquadravam. Como se pode constatar nas Figuras 6 e na Figura 7, a maioria tem uma experiência superior a 10 anos e a atuação predominante dos inquiridos incide nas áreas de “Estratégia e Planeamento”, de “Conhecimentos dos Ativos” e de “Atividades no Ciclo de Vida”.

**FIGURA 6:** Experiência dos inquiridos nas funções desempenhadas.



**FIGURA 7:** Área da Gestão de Ativos em que os inquiridos desempenham funções profissionalmente.



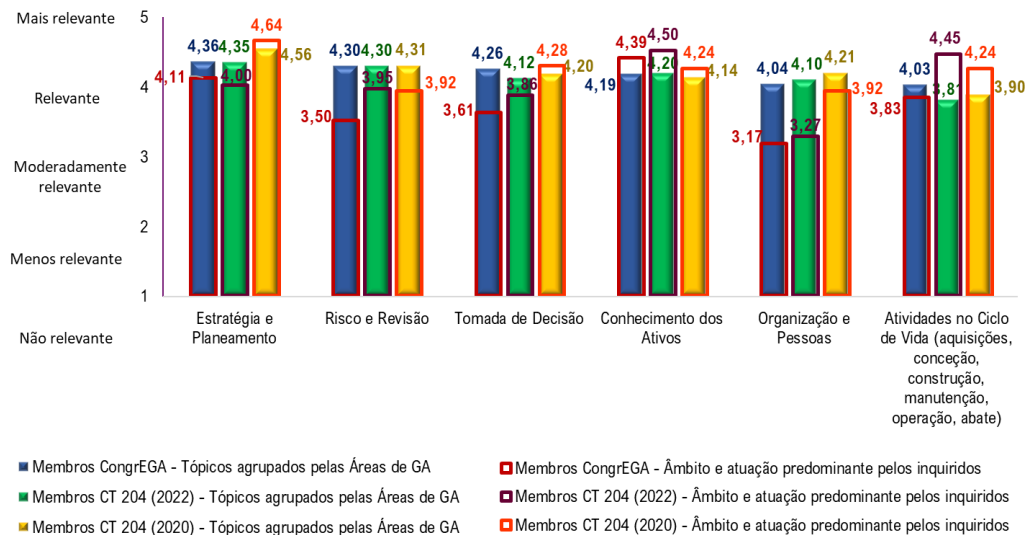
A Figura 8 sobrepõe a perceção da importância dos 39 tópicos da gestão de ativos (perceção agregada por áreas da gestão de ativos apresentada em barras preenchidas) e o âmbito de atuação predominante pelos inquiridos (barras só com contorno).

Não foi realizada uma caracterização individual dos participantes nos inquéritos rápidos realizados no World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM) em 2017. Os inquéritos foram realizados online por um grupo decisório mobilizado durante a realização do congresso.

O participante no grupo decisório sobre o esquema de reconhecimento de programas académicos do ensino superior em gestão de ativos era constituído por 4 académicos com responsabilidades de lecionação em unidades curriculares cujos programas abrangem tópicos da gestão de ativos.



**FIGURA 8:** Nível de relevância agregado dos grupos de tópicos da gestão de ativos e âmbito e atuação predominante pelos inquiridos em valores médios.



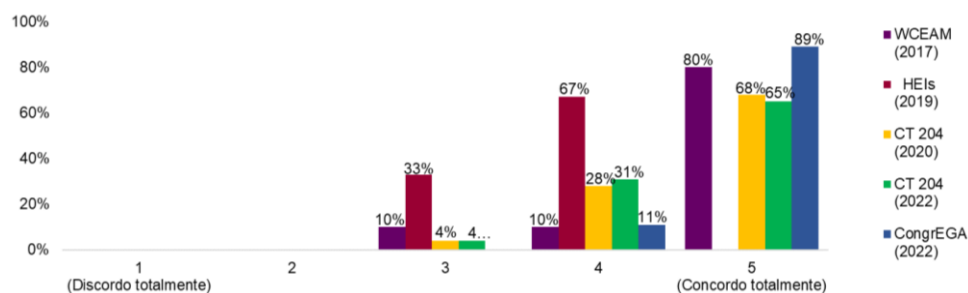
### 3.2. PERCEÇÃO DA RELEVÂNCIA DOS TÓPICOS DA GESTÃO DE ATIVOS

De modo a obter-se inicialmente a perceção do conceito de gestão de ativos por parte dos inquiridos, foi colocado no questionário a definição de ativo (requisito 2.3 NP ISO 55000:2016): “Um ativo é um bem, uma coisa ou uma entidade, que tem um valor potencial ou real para uma organização. O valor variará conforme as diferentes organizações e partes interessadas, e pode ser tangível ou intangível, financeiro ou não financeiro”. A Figura 9 indica o grau de concordância com a mesma.

Solicitou-se também aos inquiridos que, com base na definição anterior, atribuissem igualmente um grau de relevância aos 39 tópicos existentes. Os resultados são apresentados de forma agrupada, por áreas da gestão de ativos, nas Figuras de 10 a 15.

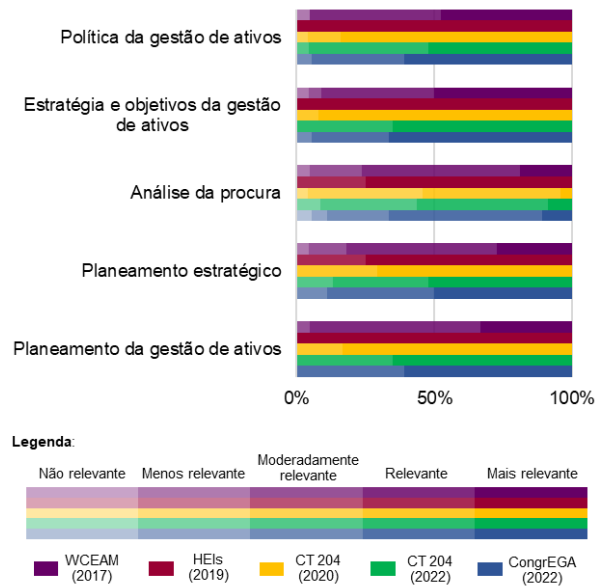
Como se pode constatar através das figuras anteriores, praticamente todos os tópicos são considerados como “relevantes” ou “mais relevantes”. Para permitir uma melhor diferenciação, a Tabela 2 apresenta, para cada amostra de inquiridos, a azul-claro, os 10 tópicos que são percecionados como relativamente menos relevantes e, a azul-escuro, os 10 tópicos que são percecionados como relativamente mais relevantes. Na generalidade das amostras, constata-se que os tópicos considerados relativamente mais relevantes pertencem maioritariamente às áreas de “Estratégia e Planeamento”, “Tomada de Decisão” e “Risco e Revisão”. Já os tópicos considerados relativamente menos relevantes pertencem na sua maioria à área de “Atividades no Ciclo de Vida”.

**FIGURA 9:** Nível de concordância dos inquiridos com a definição do requisito 2.3 NP ISO 55000:2016.

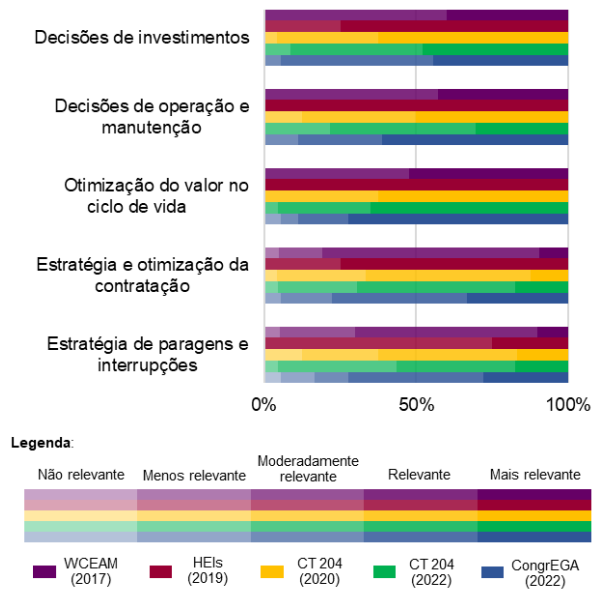




**FIGURA 10:** Nível de relevância atribuído pelos inquiridos aos tópicos da gestão de ativos que compõem a área Estratégia e Planeamento.



**FIGURA 11:** Nível de relevância atribuído pelos inquiridos aos tópicos da gestão de ativos que compõem a área Tomada de Decisão.

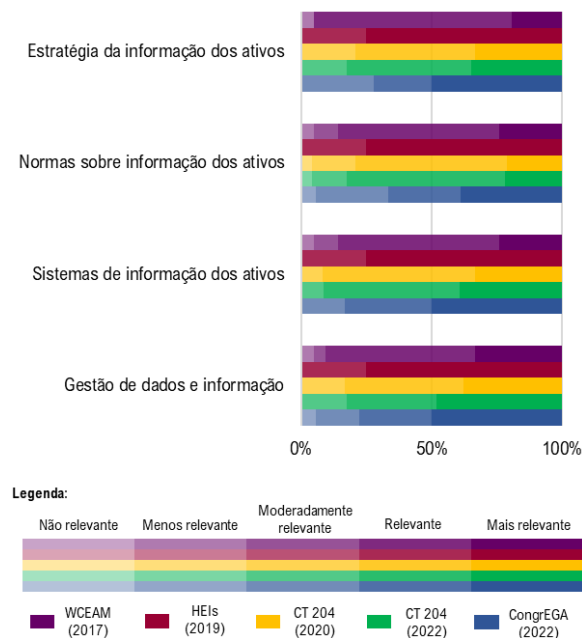




**FIGURA 12:** Nível de relevância atribuído pelos inquiridos aos tópicos da gestão de ativos que compõem a área Atividades no Ciclo de Vida.

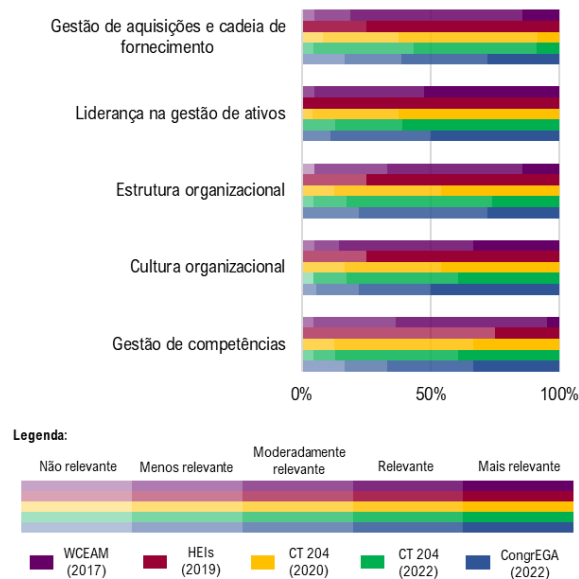


**FIGURA 13:** Nível de relevância atribuído pelos inquiridos aos tópicos da gestão de ativos que compõem a área Conhecimento dos Ativos.





**FIGURA 14:** Nível de relevância atribuído pelos inquiridos aos tópicos da gestão de ativos que compõem a área Organização e Pessoas.



**FIGURA 15:** Nível de relevância atribuído pelos inquiridos aos tópicos da gestão de ativos que compõem a área Risco e Revisão.

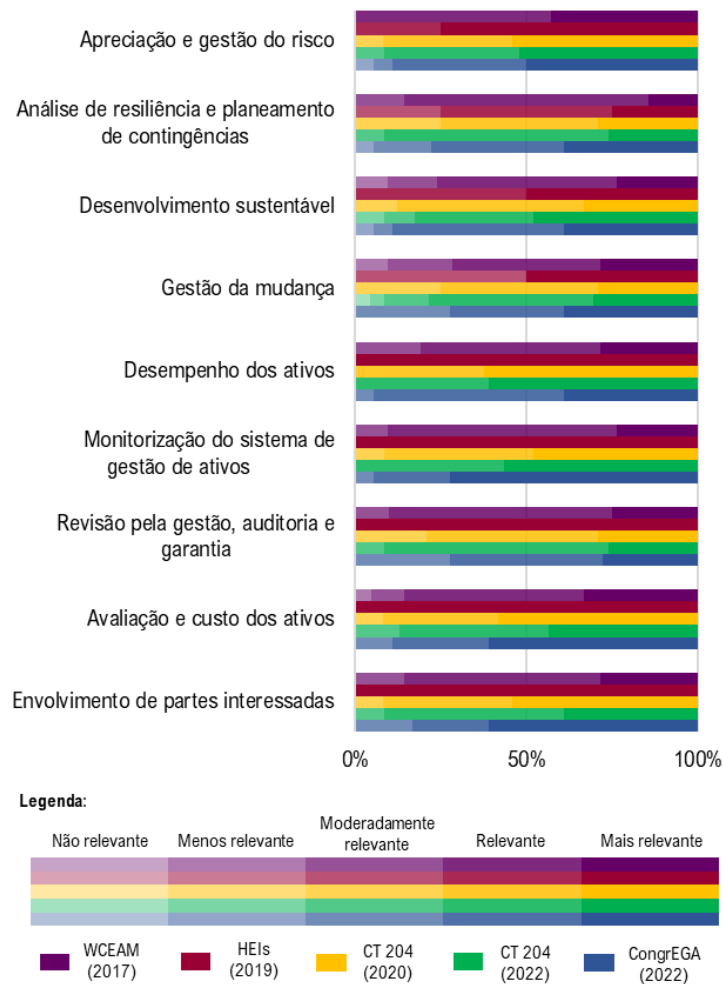




TABELA 2: Grau de relevância de cada tópico para cada amostra.

COMUNIDADE PREDOMINANTE		CIENTÍFICA	CIENTÍFICA	TÉCNICA	TÉCNICA	MISTA
AMOSTRAS		WCEAM (2017)	HEIS (2019)	CT 204 (2020)	CT 204 (2022)	CONGREGA (2022)
Estratégia e Planejamento	Política da gestão de ativos	4	5	5	5	5
	Estratégia e objetivos da gestão de ativos	4,5	5	5	5	5
	Análise da procura	4	5	4	4	4
	Planeamento estratégico	4	5	5	5	4,5
	Planeamento da gestão de ativos	4	5	5	5	5
Tomada de Decisão	Decisões de investimentos	4	5	5	4	4
	Decisões de operação e manutenção	4	5	4,5	4	5
	Otimização do valor no ciclo de vida	5	5	5	5	5
	Estratégia e otimização da contratação	4	5	4	4	4
	Estratégia de paragens e interrupções	4	4	4	4	4
Atividades no Ciclo de Vida	Normas e regulamentação técnica	4	4,5	4	4	4
	Criação e aquisição de ativos	4	5	4	4	4
	Engenharia de sistemas	4	5	4	4	4,5
	Gestão da configuração	4	4	4	4	4
	Estratégias de manutenção	4	4	4	4	5
	Engenharia de fiabilidade	4	5	4	4	4
	Operações	4	4	4	4	4
	Gestão de recursos	4	3,5	4	4	4
	Gestão de paragens e interrupções	4	4	4	4	4
	Resposta a falhas e incidentes	4	3	4	4	4
	Racionalização e abate de ativos	4	4	4	4	4
Conhecimento dos ativos	Estratégia da informação dos ativos	4	5	4	4	4,5
	Normas sobre informação dos ativos	4	5	4	4	4
	Sistemas de informação dos ativos	4	5	4	4	4,5
	Gestão de dados e informação	4	5	4	4	4,5
Organização e Pessoas	Gestão de aquisições e cadeia de fornecimento	4	5	4	4	4
	Liderança na gestão de ativos	5	5	5	5	4,5
	Estrutura organizacional	4	5	4	4	4
	Cultura organizacional	4	5	4	4	4,5
	Gestão de competências	4	3	4	4	4
Risco e Revisão	Apreciação e gestão do risco	4	5	5	5	4,5
	Análise de resiliência e planeamento de contingências	4	4	4	4	4
	Desenvolvimento sustentável	4	4,5	4	4	4
	Gestão da mudança	4	4	4	4	4
	Desempenho dos ativos	4	5	5	5	4
	Monitorização do sistema de gestão de ativos	4	5	4	5	5
	Revisão pela gestão, auditoria e garantia	4	5	4	4	4
	Avaliação e custo dos ativos	4	5	5	4	5
Envolvimento de partes interessadas	4	5	5	4	5	



Através da Tabela 2 é também possível observar 3 tópicos com um contorno preto. Esse destaque indica o facto de, em todas as amostras de inquiridos, se verificar que o tópico “Otimização do valor no ciclo de vida” é unanimemente posicionado entre os 10 tópicos relativamente mais relevantes. Por outro lado, os tópicos “Estratégia de paragens e interrupções” e “Gestão de paragens e interrupções”, são unanimemente classificados como os 10 tópicos relativamente menos relevantes.

### 3.3. PERCEÇÕES NO ENSINO DA GESTÃO DE ATIVOS EM INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR

Conforme explicado por Almeida et al. (2023), é importante fazer uma distinção entre o reconhecimento de uma sociedade profissional, como o ISEAM, e a aprovação de um programa de ensino de gestão de ativos em uma instituição de ensino superior, bem como a subsequente acreditação desse programa pelas entidades competentes.

A intenção do estudo realizado junto de uma pequena amostra de universidades internacionais foi o de captar a relevância percebida dos tópicos e temas da gestão de ativos, tal como eles são apresentados nos programas de ensino de escolas de engenharia. Os resultados deste estudo apoiam o desenvolvimento de um esquema experimental de reconhecimento a ser aplicado em instituições de ensino superior. Este esquema pontua o conteúdo, os resultados da aprendizagem, os métodos de ensino, o impacto atingido em termos de publicações e no contacto com a indústria e, bem com as qualificações e prémios associados a essas iniciativas de ensino.

O esquema de reconhecimento, mais do que a acreditação estatutária, tem dois objetivos fundamentais (Almeida et al., 2023): i) assegurar que os programas académicos reconhecidos reconhecem de forma integral o corpo de conhecimento da gestão de ativos, e ii) encorajar as instituições assim reconhecidas a influenciar novos avanços no corpo de conhecimento da gestão de ativos.

Vale a pena mencionar que, em 2019, o comité de normalização internacional ISO TC 251 Asset Management estudou uma proposta interna com o objetivo de discutir diretrizes para o ensino da gestão de ativos. Essas discussões foram úteis para estabelecer uma visão geral do estado da instrução em gestão de ativos, promover uma melhor compreensão dos materiais de ensino que estão a ser utilizados atualmente e que materiais novos ou melhorados são necessários, e identificar dificuldades conceptuais na compreensão da gestão de ativos por professores e alunos.

Estas iniciativas do ISEAM e do ISO/TC 251, acima referidas, sugerem que o capital intelectual subjacente e os programas internacionais de desenvolvimento académico e profissional nesta área irão provavelmente aumentar consideravelmente nos próximos anos.

## 4. CONCLUSÕES

A Gestão de Ativos é um tema que se tem relevado de grande interesse para muitos setores e grupos de atividade económica e as próprias organizações desejam implementá-lo. Este artigo descreve a percepção das comunidades técnicas e científicas sobre a importância dos vários tópicos da gestão de ativos.

Um dos pontos principais que ressalta do estudo é um grau elevado de concordância com o conceito de “ativo”, tal como definido na norma ISO 55000. Outra conclusão geral é que, os tópicos considerados relativamente mais relevantes, pertencem maioritariamente às áreas de “Estratégia e Planeamento”, “Tomada de Decisão” e “Risco e Revisão”. Já os tópicos considerados relativamente menos relevantes pertencem na sua maioria à área de “Atividades no Ciclo de Vida”.

O artigo destaca ainda iniciativas do ISEAM e do ISO/TC 251 que ajudam a promover a melhoria dos programas internacionais de desenvolvimento académico e profissional nesta área da gestão de ativos.



Em última análise, o estudo permite confirmar que é muito importante afirmar e confirmar a abrangência do corpo de conhecimento integral da gestão de ativos.

## 5. REFERÊNCIAS

Almeida, N. (2021). Infrastructure and Building Asset Management: Fundamentals and overview of applications for asset-intensive organizations. In Course of Advanced Topics in Construction, PhD Program in Civil Engineering, Instituto Superior Técnico.

Almeida, N. et al. (2023). Perceived Relevance of Asset Management Topics in Industry and Academia. In: Crespo Márquez, A., Gómez Fernández, J.F., González-Prida Díaz, V., Amadi-Echendu, J. (eds.) 16<sup>th</sup> WCEAM Proceedings. WCEAM 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25448-2\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25448-2_65)

Almeida, N. Gaspar, D. Sobral, J. Alegre, H. Brito, R. Ribeiro, M. Ramos, L. Patrício, H. Cabrita, A. Barreto, P. Ganilho, E. Neves, C. Ramalho, P. Duarte, M. Reguenga, D. Costa, P. Clara, J. A gestão de ativos e o papel da normalização em Portugal. APMI (2021); Revista “Manutenção”, N. 149 (2.º Trimestre de 2021), Ano 39, Associação Portuguesa de Manutenção Industrial, Editora Publindústria, ISSN 0870-0702

Almeida, N. Gaspar, D. Vieira, J. Torcato, J. Perceção da relevância dos tópicos do corpo de conhecimento da gestão de ativos. Relatório Final do Grupo Ad hoc 1. CT 204, 20 de janeiro de 2021.

Almeida, N. M. (2023). Fundamentos e perspectivas de inovação na gestão de ativos de engenharia. Revista de Ativos de Engenharia, 1(1), 5–16. <https://doi.org/10.29073/rae.v1i1.709>

GFMAM, Global Forum on Maintenance & Asset Management (2014). The Asset Management Landscape Second Edition. ISBN 978-0-9871799-2-0. Toronto, Canada.

Hodkiewicz, M. R. (2015). The Development of ISO 55000 Series Standards. In Engineering Asset Management — Systems, Professional Practices and Certification (Vol. 19, pp. 427–438). Springer Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09507-3\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09507-3_37)

IAM, The Institute of Asset Management (2015). Asset Management — an anatomy (version 3). ISBN 978-1-908891-12–9. Bristol, UK.

IPQ (2016) ISO 55000:2016 — Gestão de ativos — Visão geral, princípios e terminologia. Monte da Caparica, Portugal.

IPQ (2016) ISO 55001:2016 — Gestão de ativos — Sistemas de gestão — Requisitos. Monte da Caparica, Portugal.

IPQ (2016) ISO 55002:2016 — GESTÃO DE ATIVOS — SISTEMAS DE GESTÃO — LINHAS DE ORIENTAÇÃO PARA A APLICAÇÃO DA IS.

## DECLARAÇÃO ÉTICA

**CONFLITO DE INTERESSE:** Nada a declarar. **FINANCIAMENTO:** Nada a declarar. **REVISÃO POR PARES:** Dupla revisão anónima por pares.



Todo o conteúdo da **RAE — REVISTA DE ATIVOS DE ENGENHARIA** é licenciado sob [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.



# GESTÃO DE INFRAESTRUTURAS PÚBLICAS ATRAVÉS DO BIM: MODELAÇÃO DE TÚNEIS FERROVIÁRIOS DAS INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL

## MANAGING PUBLIC INFRASTRUCTURES THROUGH BIM: MODELING RAILWAY TUNNELS FOR INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL

[10.29073/rae.v2i1.796](https://doi.org/10.29073/rae.v2i1.796)

**RECEÇÃO:** 14 de novembro de 2023.

**APROVAÇÃO:** 20 de novembro de 2023.

**PUBLICAÇÃO:** 6 de fevereiro de 2024.

**AUTO/A 1:** Inês Caetano , BUILT CoLAB / INESC-ID, Portugal, [ines.caetano@builtcolab.pt](mailto:ines.caetano@builtcolab.pt).

**AUTO/A 2:** Débora Pinto , BUILT CoLAB, Portugal, [debora.pinto@builtcolab.pt](mailto:debora.pinto@builtcolab.pt).


**AUTO/A 3:** João Silva , BUILT CoLAB, Portugal, [joao.silva@builtcolab.pt](mailto:joao.silva@builtcolab.pt).


**AUTO/A 4:** Yessica Barbosa, BUILT CoLAB, Portugal, [yessica.barbosa@builtcolab.pt](mailto:yessica.barbosa@builtcolab.pt).


**AUTO/A 5:** Luís Sanhudo , BUILT CoLAB, Portugal, [luis.sanhudo@builtcolab.pt](mailto:luis.sanhudo@builtcolab.pt).


**AUTO/A 6:** João Poças Martins , BUILT CoLAB / FEUP / CONSTRUCT, Portugal, [pocas.martins@builtcolab.pt](mailto:pocas.martins@builtcolab.pt).

**AUTO/A 7:** Margarida Amândio , BUILT CoLAB, Portugal, [margarida.amandio@builtcolab.pt](mailto:margarida.amandio@builtcolab.pt).

**AUTO/A 8:** Miguel Azenha , Universidade do Minho / ISISE / ARISE, Portugal, [miguel.azenha@civil.uminho.pt](mailto:miguel.azenha@civil.uminho.pt).

**AUTO/A 9:** José Granja , Universidade do Minho / ISISE / ARISE, Portugal, [granja@civil.uminho.pt](mailto:granja@civil.uminho.pt).

**AUTO/A 10:** Mohammad El Sibai , Universidade do Minho / ISISE / ARISE, Portugal, [mohamadelsibai@gmail.com](mailto:mohamadelsibai@gmail.com).

**AUTO/A 11:** Hugo Patrício , Infraestruturas de Portugal, Portugal, [hugo.patricio@infraestruturasdeportugal.pt](mailto:hugo.patricio@infraestruturasdeportugal.pt).

### RESUMO

O setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) necessita de processos de suporte à digitalização do património construído que facilitem o desenvolvimento de modelos *as-is* a partir de repositórios de informação alfanumérica e geométrica existentes e consequentemente tornem a gestão dessa informação mais eficiente ao longo do ciclo de vida do ativo representado. Uma metodologia frequentemente aplicada no setor AEC é o *Building Information Modelling* (BIM), que permite criar réplicas digitais do património construído. Com o objetivo de testar as vantagens da metodologia BIM para as estratégias de manutenção das infraestruturas ferroviárias existentes, foi desenvolvida uma extensão de aplicação em plataformas de base BIM de suporte à gestão de um repositório de modelos de túneis ferroviários e uma interface gráfica para facilitar a sua manipulação. O artigo elabora sobre a metodologia adotada no desenvolvimento da extensão BIM, assim como no processo de gestão por esta suportado. Também são discutidas as vantagens de centralizar vários tipos de informação num modelo 3D partilhado, não só em termos da comunicação e partilha de dados entre vários colaboradores, mas também relativamente à tomada de decisão e ao planeamento de ações de inspeção/intervenção ao longo do ciclo de vida do ativo representado.

**PALAVRAS-CHAVE:** BIM; Gestão de Ativos; Repositório BIM; Túneis Ferroviários.

### ABSTRACT

The Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry requires strategies to digitalize the built environment. These strategies need to facilitate the development of *as-is* models from existing repositories and databases, making the management of this information more efficient throughout the asset's life cycle. One methodology frequently applied in AEC is Building Information Modeling (BIM), which allows the creation of digital replicas of the built environment. To test the advantages of BIM in the management of railway infrastructures, a BIM-based plugin was



developed to facilitate the visualization and manipulation of a repository containing BIM models of several railway tunnels. The article elaborates on the methodology adopted in the development of the plugin, as well as the management process it supports. The advantages of centralizing various types of data in a shared 3D model are also discussed, not only in terms of communication and data sharing between various stakeholders, but also regarding decision-making processes and the planning of inspection/intervention activities throughout the assets' life cycle.

**KEYWORDS:** Asset Management; BIM; BIM Repository; Railway Tunnels.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) está em constante evolução. Atualmente, existe uma crescente pressão para adotar novas tecnologias digitais e novas metodologias de projeto, como a metodologia *Building Information Modelling* (BIM). Esta metodologia visa uniformizar os processos de projeto e construção, minimizando potenciais desvios entre estes. Esta abordagem envolve a criação de um modelo virtual contendo toda a informação relevante para suportar o projeto, construção e operação de obras de Engenharia Civil (Eastman et al., 2008). O resultado é um modelo tridimensional da obra que serve como suporte visual aos vários intervenientes no processo, desde clientes a fabricantes, e atua como repositório central de informação de onde é possível extrair a informação necessária às diferentes tarefas técnicas. Adicionalmente, a metodologia BIM facilita a colaboração entre diferentes especialistas, assim como a automatização de processos de análise e fabricação. Esta metodologia também permite planejar as tarefas de construção e manutenção de modo a evitar potenciais conflitos e divergências de informação e a otimizar os recursos temporais, materiais e humanos existentes (Garber, 2014; Sharples, 2009). Estas vantagens são críticas para responder às métricas impostas nos últimos anos para melhorar a gestão do património construído (Evins, 2013) e aproximar o setor AEC dos objetivos propostos pela Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável (UN, 2015). Este fato motivou a implementação da metodologia BIM no setor AEC, dando origem a sistemas de normalização como a série ISO 19650, a qual disponibiliza diretrizes para a gestão de informação através desta metodologia ao longo do ciclo de vida dos ativos (ISO 19650, 2018; ISO 55000, 2014; UN, 2015).

A implementação da metodologia BIM no setor das infraestruturas ferroviárias tem crescido nas últimas décadas, principalmente em fases de projeto, construção e reabilitação. Neste contexto, a sua aplicação mais frequente tem sido a visualização e coordenação de informação, estimativa de custos e quantidades, planeamento e simulação dos processos de construção, e apoio à pré-fabricação (Acerra et al., 2022; Bensalah et al., 2019; Neves et al., 2019; Zhanping et al., 2019; Zhou et al., 2021). Contudo, a metodologia BIM ainda é pouco utilizada na fase de gestão de ativos neste tipo de infraestruturas (Xu et al., 2020), sendo por isso importante realizar projetos piloto que permitam ao setor perceber as suas vantagens.

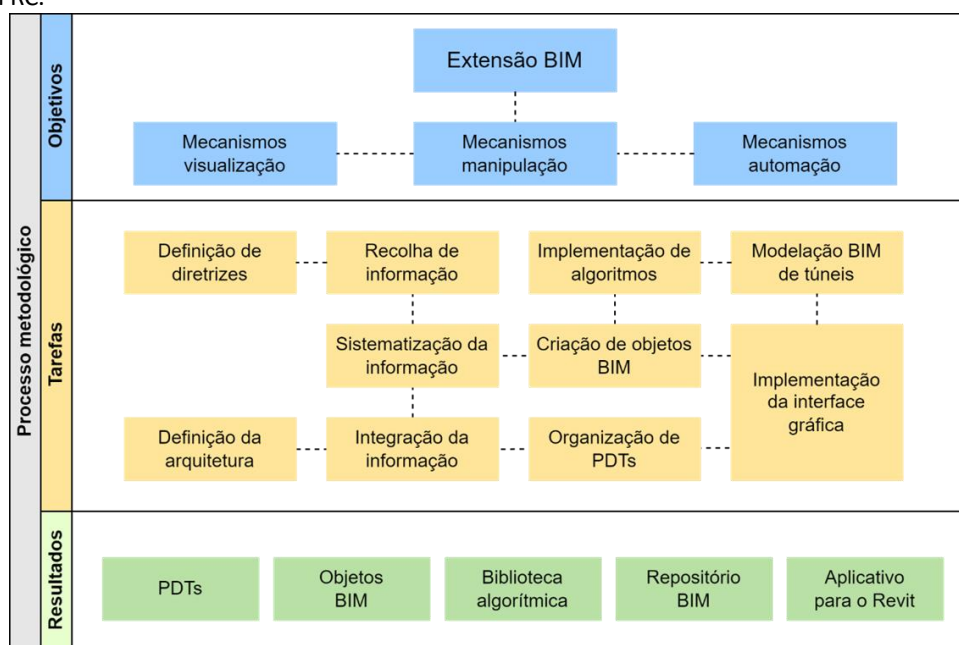
O projeto *RoboShot@FRC: Sistema Robotizado para Projeção Otimizada de Betão Reforçado com Fibras em Túneis Ferroviários* (Patrício, 2023) é um projeto de inovação e desenvolvimento (I&D) financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) da União Europeia através do POCI — Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) do Portugal 2020 que visa contribuir para a estratégia europeia climática através da melhoria de utilização e gestão das infraestruturas ferroviárias nacionais. Para tal, foram desenvolvidas estratégias de suporte à digitalização da rede ferroviária gerida pela empresa pública Infraestruturas de Portugal (IP), facilitando a sua monitorização ao longo do ciclo de vida. Isto envolveu tecnologias e ferramentas avançadas de digitalização e modelação capazes de coordenar diferentes tipos de informação (e.g., informação estrutural e dados de levantamentos e inspeções) de forma integrada e intuitiva, facilitando o planeamento de tarefas de manutenção e reabilitação, assim como o dimensionamento de estruturas de reforço com novos materiais, como por exemplo o betão reforçado com fibras (BRF).

O artigo foca-se numa das atividades deste projeto, nomeadamente o desenvolvimento de uma extensão BIM para a ferramenta Autodesk Revit para a caracterização e gestão integrada da rede de túneis ferroviários da IP. As secções seguintes explicam o processo metodológico por detrás desta atividade (Secção 2), os elementos que compõem a extensão BIM (Secção 3), e os resultados obtidos (Secção 4). Por fim, são discutidos os contributos da extensão BIM desenvolvida para as ações de monitorização e manutenção da IP (Secção 5).

## 2. METODOLOGIA

A atividade do projeto RoboShot@FRC em foco teve como objetivo testar a integração da metodologia BIM no contexto de trabalho da IP. Para tal, desenvolveu-se uma extensão BIM para potenciar a gestão integrada da rede de túneis ferroviários gerida por esta empresa, facilitando a visualização e a manipulação de informação relativa à componente estrutural destes elementos. A Figura 1 sumariza o processo metodológico adotado para atingir estes objetivos, identificando as tarefas executadas e os resultados necessários para a construção da extensão BIM.

**FIGURA 1:** Processo metodológico adotado no desenvolvimento da extensão BIM no âmbito do projeto RoboShot@FRC.



### 2.1. TAREFAS

A complexidade e abrangência do objetivo proposto levou ao estabelecimento das seguintes tarefas:

1. Definição da arquitetura da extensão BIM;
2. Normalização e sistematização da informação da IP numa base de dados única;
3. Criação de objetos BIM para os elementos ferroviários a representar nos modelos;
4. Criação de *Product Data Templates* (PDTs);
5. Implementação de algoritmos de suporte à modelação BIM e análise estrutural;
6. Modelação BIM dos túneis ferroviários com diferentes níveis de informação necessários;
7. Integração dos resultados das tarefas 3, 4 e 5 na extensão BIM;
8. Implementação de uma interface gráfica para a extensão BIM.

Na tarefa 1 estabeleceu-se a arquitetura da extensão BIM com base no seu propósito de utilização, nomeadamente a visualização e extração de informação dentro de um ambiente de modelação BIM. Para tal definiram-se as fontes de informação da extensão BIM (base de dados e repositório de modelos BIM) e os fluxos entre essa informação.



Na tarefa 2 definiu-se a estrutura e o conteúdo da base de dados tendo em conta a informação fornecida pela IP, e as diretrizes para a construção dos modelos BIM, como por exemplo os níveis de informação necessários, tendo em conta: (i) a EN 17412-1, *Building Information Modelling — Level of Information Need — Part 1: Concepts and principles*; (ii) os objetivos da IP; e (iii) os propósitos de utilização dos modelos. Esta tarefa serviu de base às tarefas seguintes, estruturando os dados para a criação de objetos BIM e PDTs no contexto da ferrovia (tarefas 3 e 4) e para a implementação dos algoritmos mencionados (tarefa 5).

Os algoritmos desenvolvidos na tarefa 5 foram em seguida aplicados na geração dos modelos BIM do repositório (tarefa 6), automatizando o processamento e a materialização das nuvens de pontos dos túneis em superfícies paramétricas, assim como a criação de objetos BIM tendo em conta o nível de informação necessário. O resultado desta tarefa foi um conjunto de modelos BIM com diferentes níveis de informação necessários, onde o nível mais baixo (Nível 0) representa a forma do túnel através de uma casca regular com dimensões aproximadas e o nível mais alto (Nível 3) apresenta os detalhes e irregularidades dos seus elementos estruturais.

Por último, organizaram-se os elementos desenvolvidos nas tarefas anteriores na extensão BIM (tarefa 7) e implementou-se uma interface gráfica para simplificar o acesso, visualização, e manipulação dos modelos existentes no repositório por parte da IP (tarefa 8).

## 2.2. RECURSOS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste projeto requereu a utilização de diversas ferramentas computacionais, nomeadamente (1) os aplicativos do Office Excel e Word para produzir documentação de suporte; (2) o sistema de gestão de bases de dados relacionais MySQL para criar a base de dados da extensão BIM; (3) a ferramenta ReCAP, para limpar e dizimar as nuvens de pontos fornecidas, (4) a biblioteca algorítmica Khepri (Sammer et al., 2019), para manipular e converter as nuvens de pontos em superfícies paramétricas com diferentes graus de detalhe geométrico, (5) as ferramentas de modelação da Autodesk AutoCAD, para gerar essas superfícies, e Revit, para gerar os modelos BIM dos túneis, (6) o ambiente de programação Dynamo, para automatizar tarefas de modelação e instanciação de objetos BIM, e (7) a linguagem de programação C# para desenvolver a extensão BIM.

Em termos das estratégias aplicadas, as tarefas 2 a 4 (normalização da informação e criação de PDTs e objetos BIM) apoiaram-se em elementos como: (i) a série ISO 19650; (ii) o sistema de classificação de informação construtiva SECClasS (Sustainability Enhanced Construction Classification System) adotado no contexto nacional; e (iii) no esquema normalizador de informação geométrica em vigor à data do projeto, nomeadamente o IFC4 ADD2 TC1. A tarefa 5 (implementação da biblioteca algorítmica para automatização de tarefas de modelação), baseou-se em estratégias de programação visual (Dynamo) e textual (Julia), e a tarefa 6 (modelação BIM dos túneis) aplicou estas estratégias na modelação dos objetos constituintes das infraestruturas em causa e no processamento da informação existente na base de dados.

## 2.3. RESULTADOS OBTIDOS

O cumprimento das tarefas anteriores originou os seguintes resultados:

- Uma base de dados central que sistematiza e coordena as diferentes fontes de informação da IP;
- Um conjunto de PDTs para normalizar os parâmetros associados a elementos ferroviários;
- Um conjunto de objetos BIM para representar elementos de túneis ferroviários;
- Um repositório de modelos BIM de túneis ferroviários com diferentes níveis de informação necessários;
- Uma extensão para a ferramenta Autodesk Revit para gerir o repositório de modelos BIM;
- Uma biblioteca algorítmica para automatizar tarefas de modelação e de processamento de dados.



Estes resultados prometem contribuir para uma gestão de ativos mais integrada. Dado o propósito de utilização da extensão BIM desenvolvida, estas vantagens vão ser mais evidentes nas tarefas de monitorização da componente estrutural dos túneis, assim como no planeamento de ações de inspeção, manutenção e reforço estrutural.

### 3. EXECUÇÃO

#### 3.1. NORMALIZAÇÃO DA INFORMAÇÃO

Tal como referido na Secção 2, a implementação da extensão BIM envolveu a sistematização de diversas fontes de informação numa base de dados única. Dado o objetivo da extensão BIM em facilitar a visualização dessa informação através de modelos 3D dos túneis, foi também necessário definir:

1. Os elementos essenciais dos túneis e as suas relações composicionais com base no sistema de classificação SECCLasS e no esquema IFC4 ADD2 TC1;
2. Os níveis de informação necessários adequados para a modelação desses elementos tendo em conta o propósito de utilização do modelo;
3. Os formatos para a apresentação dos resultados obtidos;
4. A nomenclatura dos blocos de informação;
5. O sistema de unidades;
6. O processo de georreferenciação.

Parte do resultado deste processo é apresentado na Tabela 1, a qual identifica: (i) os elementos essenciais dos túneis considerados nos modelos; (ii) os níveis de informação necessários onde estes elementos são incluídos; e (iii) as respetivas classificações SECCLasS e tipologias *Industry Foundation Classes* (IFC). Tal como é visível na tabela, foi possível relacionar todos os elementos com produtos existentes no sistema de classificação SECCLasS, com exceção das anomalias, as quais foram classificadas como Ss\_37\_50. Como não existia uma classificação referente a estes elementos, procurou-se relacioná-los com o contexto dos túneis ferroviários. Ao nível do esquema IFC, atribuiu-se às anomalias a categoria genérica `ifcBuidingElementProxy`, uma vez que não existia um elemento construtivo que as representasse.

#### 3.2. OBJETOS BIM

Paralelamente às diretrizes e documentação de apoio, desenvolveu-se um conjunto de objetos BIM para representar os elementos dos túneis representados nos modelos, os quais estão ilustrados na Tabela 2 nos diferentes níveis de informação necessários. A quantidade e o nome dos parâmetros atribuídos a cada objeto BIM dependeu da informação disponibilizada pela IP, o seu preenchimento sendo feito de forma automática e de acordo com a quantidade de informação estabelecida para cada nível de informação necessário.

A diferença entre objetos BIM nos diferentes níveis de informação necessários teve em conta o propósito de utilização (1) da extensão BIM, que visa suportar a monitorização e a inspeção da componente estrutural dos túneis digitalizados, e (2) dos modelos BIM gerados, os quais podiam servir apenas para visualizar o enquadramento do túnel ou inspecionar a sua estrutura. O primeiro ponto explica o fato das anomalias e das camadas de sustimento e betão projetado apresentarem maiores quantidades de informação e detalhe geométrico comparativamente aos restantes elementos do túnel, e.g., carris e balastro, em todos os níveis de informação necessários. O segundo ponto justifica as diferenças na representação do mesmo objeto BIM nos diferentes níveis de informação necessários, a sua geometria sendo mais simplificada quando o objetivo é apenas visualização e mais detalhada quando o objetivo é monitorizar o estado físico do elemento representado.



**TABELA 1:** Elementos essenciais dos túneis com os respetivos níveis de informação necessários, classificações e tipologias.

ELEMENTO	NÍVEL 0	NÍVEL 1	NÍVEL 2	NÍVEL 3	SECCLASS	IFC IFC4 ADD2 TC1
Camada de Sustimento	✓	✓	✓	✓	Pr_20_93_90 Pr_20_93_90_15	ifcSlabType
Camada de Betão Projetado		✓	✓	✓	Pr_20_31_16_84	ifcCoveringType
Plataforma	✓	✓	✓	✓	Pr_20_85_88 Pr_20_85_88_07 Pr_20_85_88_17	ifcSlabType
Carril		✓	✓	✓	Pr_20_76_70 Pr_20_76_70_30	ifcBeamType
Travessa			✓	✓	Pr_20_85_72 Pr_20_85_72_18 Pr_20_85_72_21 Pr_20_85_72_22 Pr_20_85_72_85 Pr_20_85_72_89	ifcBeamType
Anomalias		✓	✓	✓	Ss_37_50	ifcBuidingElementProxy
Nichos			✓	✓	Pr_20_93_52	ifcWallType
Catenária			✓	✓	Pr_65_72_60_56	ifcCableSegmentType
Zona de Testa				✓	Pr_20_93_52	ifcWallType
Terreno				✓	Pr_15_31_26	ifcSite

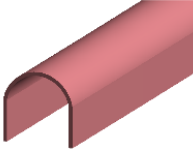
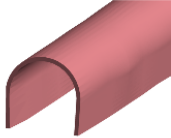
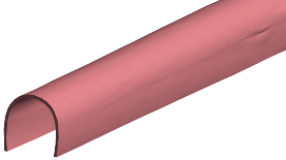
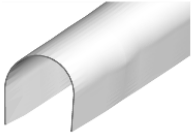

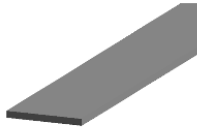

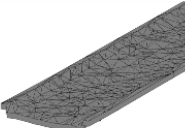
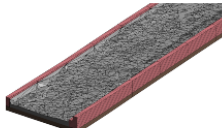

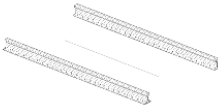
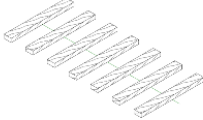



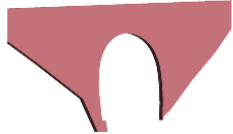

### 3.3. ESTRUTURA DE DADOS PDT

Os PDTs são estruturas de dados normalizados para produtos de construção. Estes normalizam a informação alfanumérica e a respetiva nomenclatura dos dados considerados relevantes para o acompanhamento do ciclo de vida dos produtos. Para a sua construção recorre-se a diversas fontes de informação como normas harmonizadas, declarações de desempenho de produtos, declarações ambientais de produtos e orientações internacionais do setor referente aos produtos em questão (Sibaii et al., 2022).

Tendo em consideração a inexistência de PDTs sobre produtos relacionados com a ferrovia a nível nacional e internacional, desenvolveu-se uma versão base para alguns destes elementos, nomeadamente, para a camada de sustimento, camada de betão projetado com fibras, carril, travessa, sistema de fixação do carril, balastro e anomalias. Estes PDTs foram desenvolvidos de acordo com as diretrizes estabelecidas nas recentes normas EN ISO 23387 e EN ISO 23386 relativas aos PDTs. Os referidos PDTs encontram-se atualmente disponíveis na plataforma online Portuguesa de PDTs (<https://pdts.pt/>), onde podem ser consultados e melhorados através dos contributos de especialistas do sector ferroviário. Desta forma o setor passa a ter uma referência normalizada sobre que informação alfanumérica poderá inserir dentro dos objetos BIM desenvolvidos dentro desta temática.



**TABELA 2:** Objetos BIM para representar os túneis ferroviários e as suas instâncias em diferentes níveis de informação necessários.

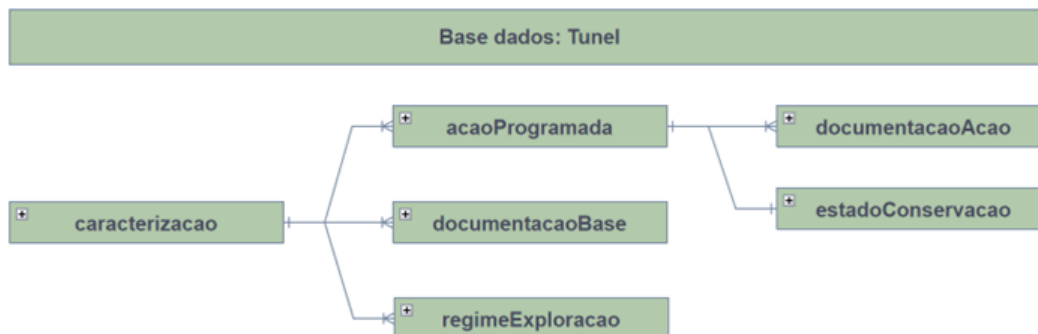
Objeto BIM	Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Camada de sustimento	 Geometria de secção uniforme ao longo do túnel.	 Geometria baseada em perfis simplificados e com espaçamentos de 3m.	 Geometria baseada em perfis mais detalhados e com espaçamentos de 1,5m.	
Camada de betão projetado		 Geometria baseada em perfis simplificados e com espaçamentos de 3m.	 Geometria baseada em perfis mais detalhados e com espaçamentos de 1,5m.	
Plataforma	 Plataforma representada por uma superfície uniforme.	 Plataforma representada pelas superfícies simplificadas do balastro, gerada a partir de perfis com espaçamentos de 6m.	 Plataforma representada por uma superfície a acompanhar as irregularidades do balastro.	 Plataforma composta pela fundação e o balastro do túnel a acompanhar as irregularidades existentes.
Sistema carril-travessa		 Representação do carril.	 Representação do carril e da travessa.	
Catenária				
Anomalia		 Anomalias representadas por ponto.	 Anomalias representadas de acordo com as suas características/tipologia.	
Muro de testa				
Nicho				



### 3.4. BASE DE DADOS

A base de dados que alimenta a extensão BIM foi estruturada de acordo com as necessidades operacionais da IP e os requisitos para o processamento da informação dentro da extensão BIM. O objetivo era centralizar toda a informação relevante para a gestão do sistema de túneis ferroviários da IP e para gerar os respetivos modelos BIM. Na Figura 2 apresentam-se as entidades que compõem a base de dados da extensão BIM.

**FIGURA 2:** Estrutura da base de dados gerida pela extensão BIM.



A entidade *caracterizacao* inclui informação sobre (1) a localização dos túneis, e.g., o concelho onde se localizam e as suas coordenadas geográficas; (2) a terminologia adotada, e.g., designação dos túneis e o ID da linha e troço ferroviário ao qual pertencem; e (3) as características físicas dos túneis, e.g., altura, largura e material da camada de sustimento.

A entidade *acaoProgramada* contém informação sobre as inspeções feitas aos túneis, as datas em que estas foram realizadas, e o estado de conservação da camada de sustimento dos túneis. Adicionalmente, esta entidade relaciona-se com a entidade *documentacaoAcao*, a qual disponibiliza as hiperligações para os relatórios das inspeções.

Por último, as entidades *documentacaoBase* e *regimeExploracao* incluem, no primeiro caso, hiperligações para elementos como peças escritas e desenhadas dos projetos, levantamentos topográficos e nuvens de pontos dos túneis e, no segundo caso, o tipo e data do regime de exploração em vigor.

As designações dos atributos da base de dados foram definidas tendo por base a informação disponibilizada pela IP, a qual estava armazenada em diferentes ficheiros e plataformas. Por exemplo, os dados relativos à localização do túnel e às suas dimensões foram apresentados num ficheiro PDF, a informação sobre o material das camadas de sustimento, o ID do troço e a existência ou não de eletrificação estava organizada num ficheiro Excel, e a informação relativa às inspeções estava distribuída por dois ficheiros, um em formato Excel e outro em formato DXF.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. MODELOS E OBJETOS BIM

As tarefas descritas na Secção 3 serviram de base para a modelação BIM de um conjunto de túneis ferroviários, fornecendo a informação necessária para (1) a representação geométrica dos seus elementos essenciais, (2) a criação de objetos BIM com parâmetros adequados ao processo de gestão da IP, e (3) a integração de informação de acordo com o propósito de utilização dos modelos (neste caso a monitorização e manutenção estrutural dos túneis). O processo de modelação também beneficiou (4) dos objetos BIM para o contexto da ferrovia, e (5) da biblioteca algorítmica para processar e converter informação em elementos BIM.

Na prática, a informação existente na entidade *caracterizacao* é fornecida ao algoritmo Dynamo para criar e preencher os parâmetros essenciais do projeto no modelo BIM. Com exceção dos modelos de Nível 0, a nuvem de pontos do túnel é convertida numa superfície paramétrica através do algoritmo Scan-to-BIM, que por sua vez é

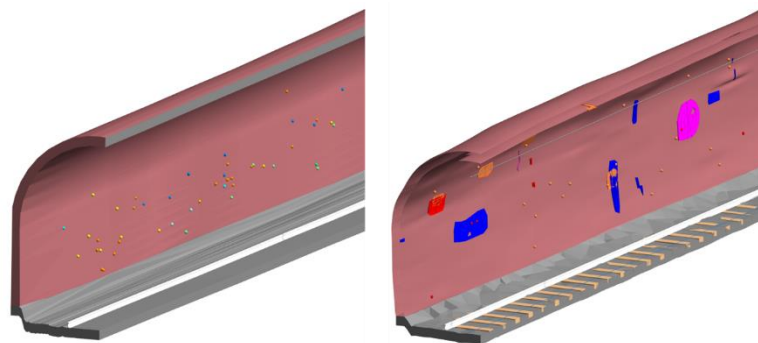
fornecida a um algoritmo Dynamo para gerar os elementos BIM das camadas de sustimento e betão projetado do túnel com o nível de informação necessário e os respetivos parâmetros preenchidos.

Em seguida, a informação disponível na entidade *acaoProgramada* é fornecida a outro algoritmo Dynamo para atribuir parâmetros e valores referentes às ações programadas realizadas a estas camadas (e.g. inspeções), como por exemplo as datas e os responsáveis por estas ações, dados descritivos sobre o estado de conservação da camada e a hiperligação para a documentação associada à ação. Por fim, as anomalias identificadas na camada de sustimento são modeladas através de outro algoritmo Dynamo tendo em conta o nível de informação necessário selecionado (Figura 3).

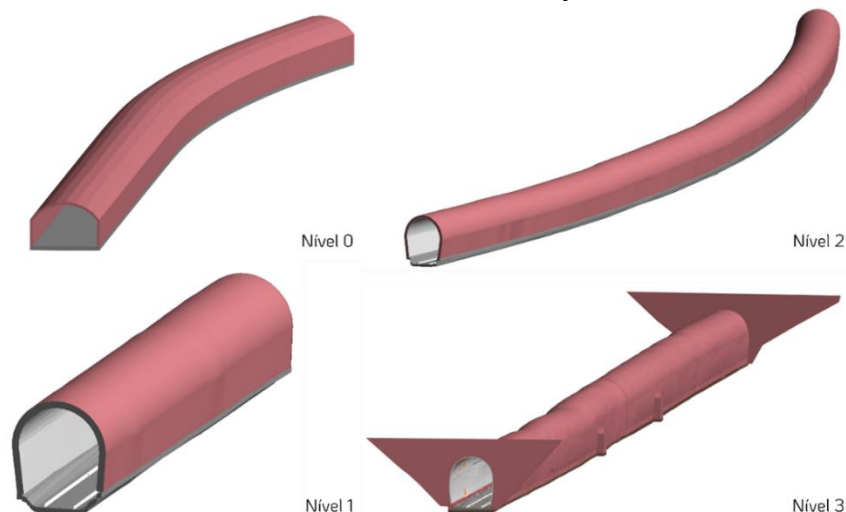
No caso do Nível 0, a volumetria do túnel é gerada automaticamente a partir do levantamento topográfico através de outro algoritmo Dynamo. A Figura 4 apresenta alguns dos modelos BIM gerados nos quatro níveis de informação necessários estabelecidos.

Adicionalmente, a biblioteca algorítmica também suporta a geração de dados relevantes para a manutenção e requalificação da componente estrutural dos túneis. Um exemplo é a possibilidade de se extrair automaticamente malhas de pontos para o dimensionamento de camadas de reforço estrutural.

**FIGURA 3:** Túnel modelado em Nível 1 (esquerda) e Nível 2 (direita).



**FIGURA 4:** Quatro túneis modelados com diferentes níveis de informação necessários.

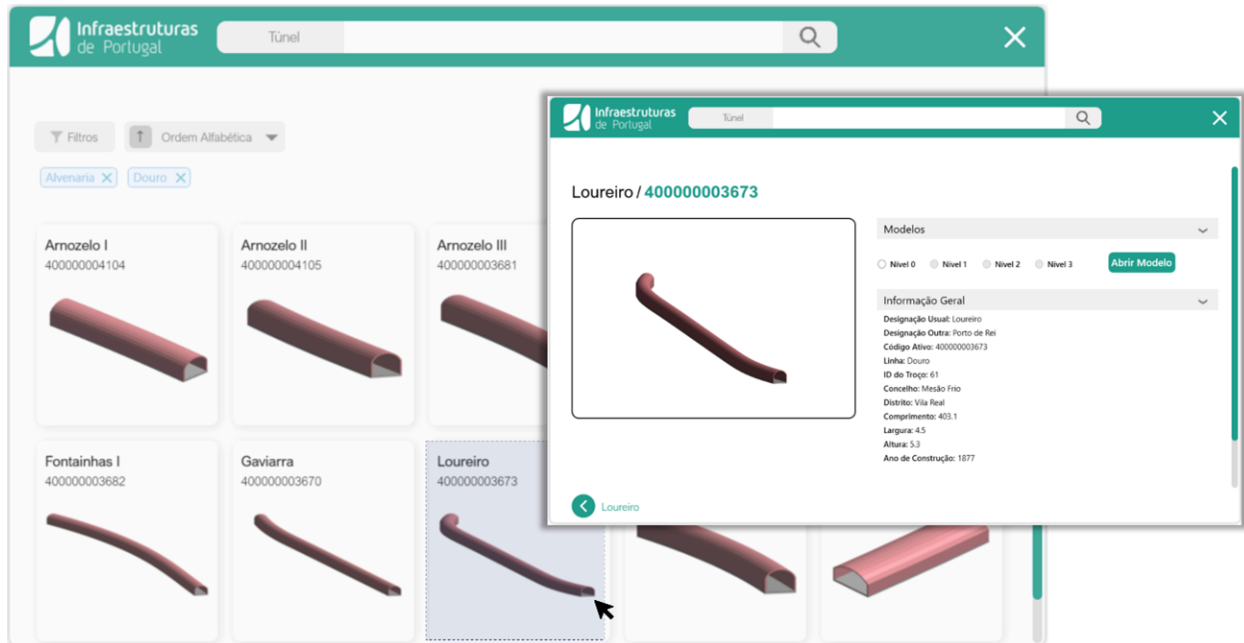


#### 4.2. INTERFACE GRÁFICA

De modo a tornar o uso da extensão BIM mais intuitivo e acessível, desenvolveu-se uma interface gráfica para estabelecer a ligação entre a sua base de dados e o seu repositório BIM e a ferramenta Autodesk Revit. Para tal, utilizou-se a linguagem de programação C# e a framework de interfaces gráficas Windows Presentation Foundation (WPF) devido à sua compatibilidade com a API desta ferramenta.

A extensão BIM desenvolvida, acessível através da ferramenta Autodesk Revit, permite ao utilizador ter acesso a um menu inicial com a lista dos túneis existentes na base de dados e os respetivos modelos BIM (Figura 5). Ao selecionar um dos túneis dessa lista, o utilizador pode visualizar informação relativa a esse túnel, como por exemplo localização, dimensão, ID da linha, anomalias identificadas, entre outros, assim como descarregar o respetivo modelo BIM com diferentes níveis de informação necessários. Esta possibilidade permite ao utilizador navegar dentro do modelo BIM para inspecionar os seus elementos e consultar a informação nestes contida, assim como editar o modelo através da manipulação dos seus dados e dos elementos construtivos.

**FIGURA 5:** Interface gráfica da extensão BIM.



## 5. DISCUSSÃO

O projeto RoboShot@FRC teve como objetivo testar a integração da metodologia BIM no contexto da IP, identificando assim as vantagens desta metodologia nas atividades de gestão da empresa. Para tal, desenvolveu-se uma extensão BIM composta por um repositório de modelos BIM e uma base de dados de apoio, assim como uma biblioteca algorítmica para automatizar a modelação e o processamento desses dados tendo em conta atividades de monitorização estrutural. No sentido de facilitar a visualização e a manipulação do conteúdo da extensão BIM, implementou-se uma interface gráfica acessível através da ferramenta Autodesk Revit.

As vantagens da extensão BIM são diversas. Por um lado, a sistematização e a centralização de toda a informação relevante para a monitorização dos túneis garante uma gestão de dados mais eficiente e coordenada, eliminando trabalho duplicado e inconsistências. Por outro lado, a natureza gráfica da metodologia adotada e da sua implementação facilita não só a visualização dessa informação, mas também a sua interpretação e manipulação. Sendo o objetivo da extensão BIM monitorizar a componente estrutural dos túneis geridos pela IP, destacam-se as vantagens apresentadas em seguida.

### 5.1. PLANEAMENTO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO

A obtenção de modelos 3D com informação detalhada sobre o estado da componente estrutural do túnel, nomeadamente o tipo de anomalias existentes e as suas dimensões e localizações na camada de sustimento do túnel, e as ações programadas, e.g., inspeções periódicas e pontuais e intervenções de reforço, permite à IP inspecionar as anomalias existentes nos túneis e, com base nisso, ajustar o planeamento das inspeções periódicas e, eventualmente, agendar novas intervenções de reparação pontual ou de reforço estrutural. Dada a facilidade em integrar novos



dados nos modelos BIM da extensão, por exemplo levantamentos resultantes de inspeções ou intervenções de reparação ou reforço estrutural, é possível garantir a constante atualização da informação sobre o estado dos elementos estruturais dos túneis digitalizados. Isto permite controlar a sua evolução ao longo do ciclo de vida dos túneis, não só possibilitando a análise visual das anomalias existentes através dos modelos BIM, mas também facilitando o planeamento de inspeções e atividades de reforço estrutural.

## 5.2. INTERVENÇÕES ESTRUTURAIS

A existência de mecanismos para extrair informação relativa à camada de sustimento dos túneis, nomeadamente a forma detalhada das suas secções e a malha de pontos que descreve a sua superfície, aumenta a perceção sobre as características físicas destas camadas e as irregularidades nestas existentes ao longo de todo o comprimento do túnel. Isto facilita tarefas de cálculo estrutural e dimensionamento de camadas de reforço, permitindo definir a abrangência das intervenções necessárias (i.e., local ou integral) de forma mais informada e eficiente. Também permite gerir os recursos despendidos nestas intervenções, quer estes sejam humanos, temporais, ou materiais, de forma otimizada e sustentável.

Ao atualizar a informação relativa às intervenções planeadas, por exemplo, data da ação programada e custos associados, e à(s) camada(s) de reforço estrutural dimensionada(s), é possível gerar a(s) camada(s) de betão projetado no modelo 3D do túnel e associar-lhes os respetivos parâmetros de forma automática.

## 5.3. INTEGRAÇÃO DE NOVOS ATIVOS

A arquitetura da extensão BIM permite gerir um sistema de ativos de dimensão variável, facilitando, neste caso, a integração de novos túneis e, eventualmente, a remoção de túneis da base de dados. Esta possibilidade deve-se à flexibilidade da estrutura da base de dados, a qual foi desenhada para facilmente receber campos adicionais relativos a novos túneis ferroviários, e à existência de algoritmos para sincronizar o repositório BIM com a informação adicionada, automatizando a geração dos modelos correspondentes.

Note-se que a centralização da informação sobre infraestruturas em modelos BIM não é uma opção adequada para todo o tipo de dados. Em situações em que o volume de dados for significativamente maior ou quando houver dados cujo acesso esteja dependente de permissões a atribuir, entre outras, poderá ser necessário optar por um modelo de dados federado. Neste caso optou-se por uma arquitetura de dados centralizada de modo a simplificar a gestão do repositório de informação.

## 5.4. SINCRONIZAÇÃO E VISUALIZAÇÃO DE DADOS EM MODELOS BIM

A existência de um sistema centralizado de informação capaz de alimentar um repositório de modelos BIM de forma automática garante uma melhor sincronização entre diferentes tipos de dados, promovendo estratégias de gestão mais integradas e eficientes. Também permite atualizar o repositório de modelos BIM de acordo com novos dados obtidos em ações de levantamento e/ou inspeções ao túnel, assim como intervenções pontuais ou de reforço executadas. Por exemplo, a propagação de novos dados resultantes das ações programadas para os modelos BIM vai (1) originar novas anomalias na camada de sustimento dos túneis, (2) alterar as características das já existentes, ou até (3) criar novas categorias de anomalias ou parâmetros adicionais.

Adicionalmente, o uso da metodologia BIM facilita a visualização e a interpretação dos diferentes tipos de dados geridos pela extensão BIM, centralizando-os e relacionando-os em modelos digitais de fácil acesso a utilizadores com e sem experiência em modelação 3D. Isto permite a qualquer colaborador da IP navegar os modelos BIM de modo a inspecionar e a manipular a informação requerida. Qualquer alteração feita fica imediatamente disponível aos restantes colaboradores, garantindo assim decisões baseadas no estado mais atual dos túneis.



## 6. CONCLUSÃO

No sentido de melhorar o processo de gestão de ativos por parte da IP e testar as vantagens da metodologia BIM para atingir esse objetivo, desenvolveu-se uma extensão BIM para facilitar a partilha de modelos digitais dos ativos geridos por esta empresa contendo toda a informação necessária para a sua monitorização ao longo do ciclo de vida. A proposta de uma extensão baseada na metodologia BIM adveio da necessidade da IP de (1) centralizar e coordenar várias fontes de informação, como por exemplo levantamentos topográficos, nuvens de pontos, e dados recolhidos em inspeções, e (2) facilitar a visualização e a manipulação dessa informação através de modelos digitais partilhados.

Na prática, a extensão BIM permite que vários colaboradores acessem aos modelos para consultar a informação nestes inserida e, caso façam alterações, que estas fiquem disponíveis aos restantes colaboradores. A atualização constante dos modelos é crítica para garantir o acesso de todos os utilizadores à sua versão mais recente, minimizando assim potenciais erros e dessincronização de dados. Adicionalmente, a centralização e materialização de várias bases de dados em modelos 3D facilita não só a visualização e a interpretação desses dados, mas também a sua coordenação e manipulação, evitando trabalho duplicado e minimizando a ocorrência de erros e perdas de informação. Estas vantagens são críticas para suportar tomadas de decisão, assim como o planeamento de inspeções e intervenções ao longo do ciclo de vida dos ativos. Assim, é expectável que a extensão BIM apoie a melhoria dos processos de gestão de ativos por parte da IP, promovendo:

1. Uma representação atualizada e fidedigna das infraestruturas através da atualização automática da informação geométrica e alfanumérica inserida nos modelos, efetivamente originando *Digital Twins* dos túneis ferroviários;
2. Uma monitorização mais informada, prevenindo ocorrências indesejadas e antecipando a necessidade de intervenções;
3. Um planeamento mais realístico das atividades de manutenção e reforço, facilitando a consideração de vários cenários e a obtenção de previsões mais fidedignas;
4. A otimização dos recursos utilizados nas atividades de gestão e manutenção;
5. Estratégias de gestão mais preventivas e sustentáveis, reduzindo a ocorrência de situações extremas que necessitem de reparações mais dispendiosas.

Relativamente aos desafios encontrados durante o projeto, destacam-se as limitações do hardware disponível, principalmente no processamento e materialização das nuvens de pontos dos túneis em superfícies paramétricas e na modelação BIM de túneis muito irregulares e/ou extensos. Nestes casos, foi por vezes necessário seccionar os túneis em troços de modo a obter elementos como a camada de sustimento, plataforma e anomalias. Estas dificuldades refletem a necessidade de se definir o nível de informação necessário do modelo de acordo com o seu propósito de aplicação, evitando a geração de modelos com níveis de detalhe acima do necessário.

Em termos da aplicabilidade do protótipo desenvolvido no contexto da IP, este requer (1) a aquisição de software compatível com o seu uso, (2) conhecimento das ferramentas de modelação utilizadas para continuar a estender/atualizar o repositório, e (3) experiência mínima em abordagens algorítmicas de modo a beneficiar da biblioteca algorítmica desenvolvida.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto de inovação e desenvolvimento (I&D) RoboShot@FRC — Robotized system for the shotcrete of optimized fibre reinforced concrete in railway tunnels com referência POCI-01-0247-FEDER-047075; pelo PRR — Plano de Recuperação e Resiliência e União Europeia — [www.recuperarportugal.gov.pt](http://www.recuperarportugal.gov.pt) (PRR — Investimento RE-C05-i02: Missão Interface — CoLAB); pela FCT / MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) sob a unidade de investigação 'Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em



Estruturas de Engenharia' (ISISE) com referência UIDB/04029/2020, e sob o Laboratório Associado 'Advanced Production and Intelligent Systems' (ARISE) com referência LA/P/0112/2020; pela FCT através da bolsa com referência MPP2030-FCT-2022 e ainda por: Financiamento Base — UIDB/04708/2020 DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 e Financiamento programático — UIDP/04708/2020 DOI 10.54499/UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT — Instituto de I&D em Estruturas e Construções.

## REFERÊNCIAS

- Acerra, E., et al. (2022). Building Information Modeling (BIM) Application for a Section of Bologna's Red Tramway Line. *Infrastructures*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/infrastructures7120168>
- Bensalah, M., Elouadi, A., & Mharzi, H. (2019). Overview: the opportunity of BIM in railway. *Smart and Sustainable Built Environment*, 8(2), 103–116. <https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2017-0060Xu>
- Eastman, C., et al. (2008). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors* (1<sup>st</sup> edition), John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/2007029306>
- Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>
- Garber, R. (2014). *UNStudio: Knowledge Architecture for a Life (Cycle)*. In *BIM Design: Realising the Creative Potential of Building Information Modelling*, 224–241, John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118914694.ch15>
- ISO 19650. (2018). *ISO 19650:2018(en) Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling*. ISO (the International Organization for Standardization).
- ISO 55000. (2014). *Asset management — Overview, principles and terminology* (Project Committee ISO/PC 251, Ed.). ISO (the International Organization for Standardization).
- Neves, J., Sampaio, Z., & Vilela, M. (2019). A Case Study of BIM Implementation in Rail Track Rehabilitation. *Infrastructures*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/infrastructures4010008>
- Patrício, H. (2023). *Projeto Roboshot@FRC no 1.º WORKSHOP BIM/SIG*. [https://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/inline-files/Roboshot%20Workshop\\_BIM\\_SIG\\_2023.pdf](https://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/inline-files/Roboshot%20Workshop_BIM_SIG_2023.pdf).
- Sammer, M., Leitão, A., & Caetano, I. (2019). From Visual Input to Visual Output in Textual Programming. In *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CAADRIA Conference*, 645–654.
- Sharples, C. (2009). Unified frontiers: Reaching out with BIM. *Architectural Design Magazine*, 79(2), 42–47. <https://doi.org/10.1002/ad.849>
- Sibaii, M. E., et al. (2022). *Rumo à definição de 'Product Data Templates' nacionais para aplicação generalizada em contexto BIM: Esforços da CT197*. In B. Figueiredo, J. P. Martins, J. Granja, J. C. Lino, & M. Azenha (Eds.), *4.º congresso português de 'Building Information Modelling'*, 245–256, UMinho Editora.
- UN, U. N. (2015). *Sustainable Development Goals*. United Nations.
- Xu, X., Wang, G., Cao, D., & Zhang, Z. (2020). BIM Adoption for Facility Management in Urban Rail Transit: An Innovation Diffusion Theory Perspective. *Advances in Civil Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8864221>



Zhanping, S., et al. (2019). Research on management and application of tunnel engineering based on BIM technology. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25, 785–797. <https://doi.org/10.3846/jcem.2019.11056>

Zhou, Y., et al. (2021). Research on Visual Management Technology of Tunnel Construction Process Based on BIM Technology. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2021/9738820>

### DECLARAÇÃO ÉTICA

**CONFLITO DE INTERESSE:** Nada a declarar. **FINANCIAMENTO:** Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto de inovação e desenvolvimento (I&D) RoboShot@FRC — Robotized system for the shotcrete of optimized fibre reinforced concrete in railway tunnels com referência POCI-01-0247-FEDER-047075; pelo PRR — Plano de Recuperação e Resiliência e União Europeia — [www.recuperarportugal.gov.pt](http://www.recuperarportugal.gov.pt) (PRR — Investimento RE-C05-i02: Missão Interface — CoLAB); pela FCT / MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) sob a unidade de investigação ‘Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia’ (ISISE) com referência UIDB/04029/2020, e sob o Laboratório Associado ‘Advanced Production and Intelligent Systems’ (ARISE) com referência LA/P/0112/2020; pela FCT através da bolsa com referência MPP2030-FCT-2022 e ainda por: Financiamento Base — UIDB/04708/2020 DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 e Financiamento programático — UIDP/04708/2020 DOI 10.54499/UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT — Instituto de I&D em Estruturas e Construções. **REVISÃO POR PARES:** Dupla revisão anónima por pares.



Todo o conteúdo da **RAE — REVISTA DE ATIVOS DE ENGENHARIA** é licenciado sob [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.



## STANDARDIZATION OF TECHNICAL INFORMATION ON RAILWAY PROJECTS TO OBTAIN PERFORMANCE INDICATORS

### *NORMALIZAÇÃO DA INFORMAÇÃO TÉCNICA DE PROJETOS DE INFRAESTRUTURAS FERROVIÁRIAS PARA OBTENÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO*

[10.29073/rae.v2i1.865](https://doi.org/10.29073/rae.v2i1.865)

**RECEÇÃO:** 14 de julho de 2023.

**APROVAÇÃO:** 15 de dezembro de 2023.

**PUBLICAÇÃO:** 6 de fevereiro de 2024.

**AUTOR/A 1:** Filipa Salvado , LNEC, Portugal, [asalvado@lnec.pt](mailto:asalvado@lnec.pt).

**AUTOR/A 2:** Maria Falcão , LNEC, Portugal, [mjoaofalcao@lnec.pt](mailto:mjoaofalcao@lnec.pt).

**AUTOR/A 3:** Paula Couto , LNEC, Portugal, [pcouto@lnec.pt](mailto:pcouto@lnec.pt).

**AUTOR/A 4:** Simona Fontul , LNEC, Portugal, [simona@lnec.pt](mailto:simona@lnec.pt).

#### ABSTRACT

During the last decades, there has been a significant evolution of rail transport. The need to standardize technical and economic information is emphasized to guarantee the optimization of construction and operation activities, as well as the challenge of developing databases with robust and reliable information that can be transferred and used throughout the whole life cycle of constructed assets. ProNIC (Portuguese abbreviation for Protocol for the Standardization of Construction Technical Information) is a research project that developed a methodology (into a computer tool) to standardize information for the lifecycle of constructed assets, while enabling the benchmarking of similar types of construction projects. This methodology has already been implemented in the building subsector. The present paper shows the results of the implementation of ProNIC methodology in railway infrastructures. Based on the analysis of different real projects, a normalized work breakdown structure (WBS) for railway works is developed, leading to the updating of the characterization of railway infrastructures in ProNIC. All documentation produced is implemented in ProNIC. To validate this method, a case study (section of a ballast railway with 29 km) is used to conceptualize the WBS proposed and the created technical contents and specifications. These developments, provided the conception of standard elements capable of being adapted to any case of railway works, based on the Portuguese and European legal standards and frameworks. A national referential, to be used in all types of public railway infrastructure projects, is defined.

**KEYWORDS:** Performance Indicators; ProNIC; Railway Projects; Standardized Information.

#### RESUMO

Durante as últimas décadas, houve uma evolução significativa do transporte ferroviário. Enfatiza-se a necessidade de normalização da informação técnica e económica para garantir a otimização das atividades de construção e operação, bem como o desafio de desenvolver bases de dados com informação robusta e fiável. O ProNIC (Protocolo de Normalização da Informação Técnica da Construção) é um projecto de investigação que desenvolveu uma metodologia (numa ferramenta informática) de normalização da informação, já implementada no subsector dos edifícios, e que permite análises comparativas de projetos com base em indicadores de desempenho. O presente artigo apresenta os resultados da implementação da metodologia ProNIC no subsector de infraestruturas ferroviárias. Com base na análise de diferentes projetos reais, é desenvolvida uma estrutura analítica de projeto (*work breakdown*



*structure, WBS*) normalizada para obras ferroviárias que conduziu à caracterização da infraestrutura ferroviária no ProNIC. Toda a documentação produzida é implementada no ProNIC. Para validar este método, é utilizado um caso de estudo (trecho de uma ferrovia com 29 km) para conceituar a WBS proposta e os conteúdos técnicos e especificações desenvolvidas. Estes desenvolvimentos proporcionaram a conceção de elementos normalizados adaptáveis a qualquer caso de obra ferroviária, com base nas normas e enquadramentos legais portugueses e europeus. É também definido um referencial nacional, a utilizar em todos os tipos de projetos de infraestruturas ferroviárias públicas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Indicadores de Desempenho; Normalização da Informação; Projetos de Infraestruturas Ferroviárias; ProNIC.

---

## 1. INTRODUCTION

---

A significant evolution in rail transport, over the last decades, is noted, especially in passenger transport with high-speed trains. Such development has occurred due to the increase of the fossil fuel cost, the concern with the environmental impact of road and aeronautical transport and the fact that rail transport intends to become more competitive [1].

As in other subsectors of AECO (Architecture, Engineering, Construction and Operation) sector, in railway infrastructures subsector, there is an increasing concern with the normalization and uniformization of processes in order to guarantee the quality and sustainability of their activities (e.g., design, construction, maintenance, operation, rehabilitation, deconstruction), the choice of suitable materials and processes and the control of life-cycle costs. The interest of extending these standards to railway infrastructures is relevant [2].

Following audits carried out on public railway projects, it appears that there are weaknesses that have discredited Portuguese construction (e.g., deadlines for the works execution, exceeded budgets, deficient safety and lack of technical quality and information) [3]. The need to develop a database supported by real projects statistics (technical and economic performance indicators) is highlighted, in order to allow benchmarking similar projects [4]. It is also emphasized that the standardization of technical and economic information in AECO sector should be carry out, namely the development of the ProNIC (Portuguese abbreviation for Protocol for the Standardization of Construction Technical Information) methodology [5] to railway infrastructures.

The increase of the project's complexity, the related information and the high number of stakeholders involved, conduct to a high production of information in AECO sector [6,7]. It empathizes the need to develop new forms of efficient communication during all the process [4]. In the current context, the technical documentation that is produced in the several types of works, comes in different formats and with very different contents, thus creating weaknesses throughout the process. ProNIC represents a way to overcome this challenge [5].

Using a statistical process with the information available in ProNIC database, it is possible to obtain performance indicators (according to options, type of construction, work relevance, work region, among others). It is also possible to obtain strategic performance indicators for work groups, chapters, design specialties and construction entities [5].

It should be noted that, according to the Portuguese Strategic Plan for Transport and Infrastructure, an investment about 2.6 million euros in public railway infrastructures are planned for the next years [8].

The purpose of this paper is to develop a systematic and integrated set of credible and standardized information (technical and economic), supported by ProNIC methodology, with the aim of constituting a reference for the entire Portuguese AECO sector specifically for the railway infrastructure subsector.

## 2. METHOD

To achieve the objective of the present research study the method used is divided in the following four steps:

- STEP 1 — Gather background knowledge about railway infrastructure works (see section 3).
- STEP 2 — Gather the background knowledge about ProNIC methodology and related computer tool (see section 4).
- STEP 3 — Selection the contents of information available in ProNIC, to develop a systematic and integrated set of standardized information related to railway infrastructure (see Section 5.1).
- STEP 4 — Selection of a case study to apply the contents developed in STEP 3 (section 5.2).

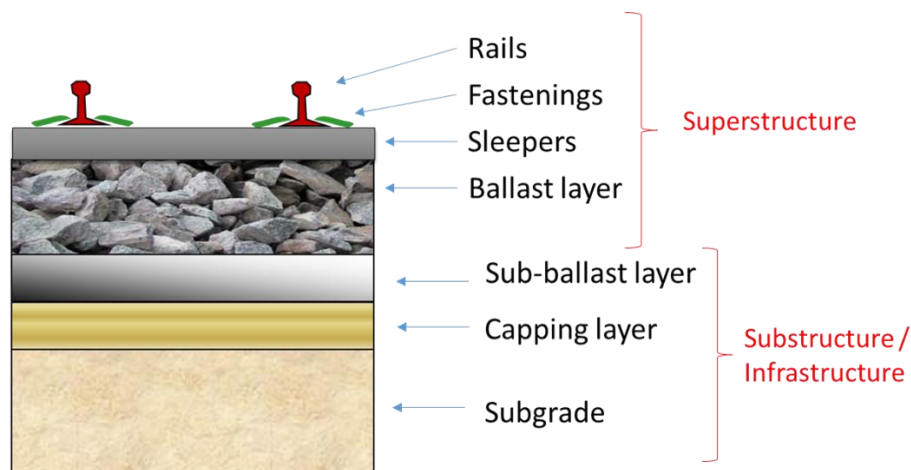
## 3. RAILWAY INFRASTRUCTURE

### 3.1. RAILWAY CHARACTERISTICS

Three types of railways are highlighted: ballasted, non-ballasted and mixed support. The ballast track, in addition to being the oldest solution, is also the most used on railway lines. The adoption of a ballasted track solution presents several advantages [9–12]: i) extensive experience regarding the applied materials, life-cycle costs, and duration; ii) rapid construction, maintenance, and rehabilitation; iii) relatively low construction costs; iv) good conditions for dissipating noise and vibrations; v) easy correction of the track geometry; vi) inspection methodologies to detect track defects and causes.

The structure of the ballasted railway (see Figure 1) is divided into superstructure (rails, fastening system, sleepers, and ballast layer) and substructure or infrastructure (subballast layer, capping layer, and subgrade) [9,11]:

**FIGURE 1:** Ballasted railway structure adapted from [11].



Rails are steel profiles, being considered one of the most important elements of the railway and having the highest cost. Its main functions are [11–14]: i) support and transfer the wheels —train loads to the sleepers, without excessive bending; ii) guide train wheels; and iii) conduct the electricity of the traction or signaling systems.

The fastening system aims to fix the sleepers to the rails, transmit the forces applied on the rails and dampen the vibrations and impacts caused by the train wheels [9,11]. Metallic supports are used on wooden sleepers. Resilient elements are placed on concrete sleepers to dampen vibrations caused by the wheels, to reduce the friction between the rail and the sleepers and to promote the electrical insulation of the track circuits [15].

Sleepers are elements placed between the rails and the ballast, usually spaced on 0.6 m. Its main functions are [9]: i) receive the loads from the rails and distribute them to the ballast layer with acceptable stress levels; ii) support the



rail fastening system; iii) prevent vertical, lateral, and longitudinal displacements of the rails; iv) preserve the track gauge and slope; and v) ensure electrical isolation between the two rails. The sleepers can be made of wood, metal or concrete, being concrete sleepers the most used ones [9,11,14].

Ballast layer forms the intermediate layer between the sleepers and the subballast layer and consists of granular material resulting from stone crushing, with high resistance to wear and to fragmentation [10]. The characteristics required for the ballast are defined in the European standard EN 13450 [16] and are defined by type of ballast, namely ballast type I (for rail systems with speed above 250 km/h) and ballast type II (for the conventional network of lower speed). The ballast layer behavior is one of the main concerns of railway administrations, due to its high importance in guaranteeing the proper functioning of the infrastructure in terms of safety and comfort [11].

Subballast layer is the layer on which the ballast is laid, built with the objective of ensuring the good behavior of the track, regarding its geometry maintaining. This layer contributes to the correct distribution of loads and vibrations transmitted in depth, and to water drainage at its surface, preventing ballast fouling (migration of soil particles into the ballast layer) and the erosion of the natural ground [15,17].

Capping layer is built when it is necessary to improve the bearing capacity of the railway track. It consists of limestone unbound granular material or soil treated with different materials (e.g., cement, lime, bitumen) [10].

Subgrade consists of the natural soil on which the capping, subballast or ballast are placed. It is treated with different materials aiming to increase its bearing capacity if traffic loads are higher. It consists of local soils that has a lower quality than the material used in the capping and subballast layer. It serves as a support for the entire railway and transmits the loads from traffic to the terrain [18]. The international railway classification system, through the UIC 719R [19], classifies platforms according to their bearing capacity.

### 3.2. TRANSITION ZONES

Transition zones or technical blocks are structures to ensure the transition between landfills and bridges or viaducts, to reduce differential settlements, and to allow the progressive variation of the stiffness modulus, between these two track sections. Thus, the vertical stiffness of the transition zone should gradually increase until near to the structure, to make compatible vertical displacements, as close as possible, between the transition zone and the bridge [20].

However, along the life cycle, the differential settlement between landfill and adjacent structure increases [21,22].

This leads to increased maintenance costs, affects the availability of the track, and causes disruption to the railway operation. To mitigate this situation, the railway public administrations have been elaborating design specifications for the construction of these transition zones.

The adoption of transition zones (technical blocks) with well-defined dimensions, built with well-compacted layers of granular materials, subgrade treated with cement or binder, exhibiting high values of stiffness modulus and low permanent deformation, when compared with traditional landfill materials, has been a widely used solution [20,22].

## 4. PRONIC

ProNIC is a research project that develop a systematic and integrated set of credible technical and economic content, supported by a computer tool, to constitute a reference for the entire Portuguese construction sector. ProNIC is a standard work breakdown structure (WBS) for construction works, technical specifications, cost scenarios and software-based features to manage all the information and systematize the processes throughout the project, since design to the deconstruction (Construction Information System for Portugal). It gives a contribution to technical information standards and sustainability of the processes. Its fundamental aspects are the standardization of the



construction processes and the collaborative work (cloud based). It allows the management and articulation of technical contents and the automatic generation of documents such as detailed measurements, technical specification, bill of quantities (BQ), budget estimates, which present technical information relating to guidelines, regulations, standards, and costs [3,20].

ProNIC presents potentialities that are integrated in the requirements of the recent Portuguese public procurement legislation and associated regulation. It presents in its structure a knowledge database in two major subsectors: buildings and road infrastructures [23,24].

Contrarily to what occurs in other systems, ProNIC WBS, being the basis of all information produced, has been the object of a structured and comprehensive development to achieve a higher degree of detail. The task of defining the structure desegregation has been one of the main works. The ProNIC work classification criterion presents a division by chapters, subchapters and articles assigned to a particular code (the same code is always assigned to the same construction work). An article presents the description of the construction work, which will be edited and integrated on the BQ and BE. Linked with the articles there are files with work and material technical specifications such as: work execution sheets (WES) and material sheets (MATS). These files are individual and seek the principle that each type of work has a description of how it is performed (a work specification file), and files with specifications for each different used material.

The concept of Construction Units (CU), introduced in the international standard ISO 12006-2 [25], defines a CU as an independent basic unit (e.g. physical division, constitution, construction organization, operation, maintenance, cost division). Its purpose is to identify the constituent parts of a project and break them into manageable items [26].

ProNIC comprehends the entire construction life cycle. From the above, it is verifiable that it serves first the designer and the work owner need, mainly during the construction design and procurement. However, its structure contains features that are transversal to all the constructive process, as the work contract process (designer and contractor/sub-contractors), construction (contractor and technical supervision) and use (maintenance and operation provisions). It is expected that, in Portugal, ProNIC will be mandatory for use in public works process [5].

## 5. RESULTS

### 5.1. CONTENTS FOR RAILWAY INFRASTRUCTURE

To acquire knowledge about the characteristics of railway infrastructure works, several case studies are analyzed in a global way [2,29,30].

One of the main objectives is to develop a WBS that is applicable to any type of railway work. The BQ and the WBS proposed by Campos [27], and the existing WBS in ProNIC are analyzed.

The first stage comprises the organization of the railway infrastructure works, analyzed according to construction models. Thus, the BQ works are organized according to construction units (CU) and to Design Specialties (DS). A comparison is also made between the BQ works of the railway works and the works already exist in ProNIC database. In addition, work descriptions and respective parameters should be developed to define WES and MATS.

The analysis carried out in the case study according to the model of the work organization (UC and SD) contributes to a better perception and interpretation of the information available.

After the definition of the standardized WBS for the railway work, articles, WES, MATS, CU and DE are formatted according to the assumptions established by ProNIC and implemented on the computer tool.



### 5.1.1. WORK BREAKDOWN STRUCTURE

After analyzing several case studies from different points of view, it was then possible to elaborate a new proposal for a complete standardized WBS that includes: i) the existing chapters in ProNIC; ii) the chapters proposed by Campos [27] and iii) the chapters proposed in the present work, that is, a new standardized WBS that is capable of being used in any railway work. Table 1 presents the results for the WBS developed.

### 5.1.2. ARTICLES

The articles correspond to the most detailed level of the WBS and consist of a generic work description, associated parameters (fill options) and units of measurement. In this study, articles related to i) technical blocks (TB), ii) capping layer, and iii) subballast layer are developed (see two examples in Table 2).

For the preparation of these articles, Portuguese regulations and normative documentation related to railway infrastructures are analyzed in order to obtain standardized descriptions and parameters [2].

### 5.1.3. WORKS EXECUTION SHEETS AND MATERIAL SHEETS

The set of all WES and MATS compile the construction specifications, which are automatically generated according to the articles selected in ProNIC.

In the present research study, three WES are developed for the execution of: i) technical blocks; ii) capping layer; and iii) subballast layer. Regarding MATS, two sheets are elaborated: i) aggregates for railway works and ii) aggregates for the subballast layer. In addition, the MATS for water and the FMAT for cement are reviewed (they are already in ProNIC database, but this review intends to incorporate the requirements of railway works) [2]. Table 3 shows the generic topics filled in all WES and MATS.

### 5.1.3. DESIGNS SPECIALITIES

Organizing construction works according to the Design Specialities (DS) allows to separate the design diversity into specific areas [33]. In the present study the design specialties considered are: i) geotechnics and geology; ii) topography; iii) earth movements and containments; iv) demolitions; v) architecture; vi) drainage; vii) water and sewage facilities, equipment and systems; viii) stability; ix) electrical facilities, equipment and systems; x) HVAC facilities, equipment and systems; xi) railway; xii) catenary and traction energy; xiii) communications facilities, equipment and systems; xiv) signaling; xv) integrated security; xvi) environment; and xvii) acoustic conditioning.

### 5.1.4. CONSTRUCTION UNITS

The CU aims to identify the constituent parts of a DS and proceed to its division, which can be carried out considering factors such as: i) physical division; ii) constitution; iii) construction organization; iv) operation; v) maintenance and vi) cost sharing. Organizing construction works into CU provides a global point of view.

## 5.2. CASE STUDY CHARACTERIZATION

The case study under analysis is related to a new construction of a 29 km ballasted railway in Portugal [2,20,30].

This new constructed track section was designed with the objectives of 28: i) improve the railway transport conditions of passenger and products in terms of accessibility, safety, comfort, and speed, increasing its competitive capacity with road transport; ii) create a line of fast trains, in variant.



TABLE 1: WBS for railway infrastructure.

CHAPTER	WBS
1. Earthworks	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.1. Preparatory work;                             <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1.1. Demolition and removal of railway infrastructure elements;                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1.1.1. Track removal;   <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1.1.1.1. Rails;</li> <li>1.1.1.1.2. Sleepers;</li> <li>1.1.1.1.3. Ballast;</li> </ul> </li> <li>1.1.1.2. Railway switch removal;</li> <li>1.1.1.3. Catenary removal;</li> </ul> </li> <li>1.1.2. Deforestation;</li> <li>1.1.3. Elements demolition;</li> <li>1.1.4. Wall demolition;</li> <li>1.1.5. Stripping;</li> </ul> </li> <li>1.2. Excavation;                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>1.2.1. In line excavation;</li> <li>1.2.2. Transportation of land — landfill;</li> <li>1.2.3. Transportation of land — placement in a licensed landfill;</li> <li>1.2.4. Excavation of soils to be discarded; 1.2.5. Regulation;</li> </ul> </li> <li>1.3. Landfill;                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>1.3.1. Landfill with soil from reuse;</li> <li>1.3.2. Landfill with soil from a loan stain;</li> </ul> </li> <li>1.4. Complementary works;                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>1.4.1. Draining mask;</li> <li>1.4.2. Draining spurs;</li> <li>1.4.3. Sub horizontal land on slopes;</li> </ul> </li> <li>1.5. Technical Blocks;                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>1.5.1. Technical blocks type I;</li> <li>1.5.2. Technical blocks type II;</li> </ul> </li> <li>1.6. Other works</li> </ul>
2. Drainage	<ul style="list-style-type: none"> <li>2.1. Works to guarantee the continuity of surface water drainage;</li> <li>2.2. Hydraulic passages;</li> <li>2.3. Hydraulic passages mouths;</li> <li>2.4. Longitudinal drainage devices;</li> <li>2.5. Complementary drainage devices;</li> <li>2.6. Accessory work of drainage system;</li> <li>2.7. Other works</li> </ul>
3. Railway	<ul style="list-style-type: none"> <li>3.1. Railway infrastructure;                             <ul style="list-style-type: none"> <li>3.1.1. Capping layer;</li> <li>3.1.2. Subballast layer;</li> </ul> </li> <li>3.2. Railway superstructure;                             <ul style="list-style-type: none"> <li>3.2.1. Track ballast;</li> <li>3.2.2. Track settlement;</li> <li>3.2.3. Track equipment;</li> <li>3.2.4. Rail connection;</li> <li>3.2.5. Track tamping and levelling;</li> <li>3.2.6. Grinding;</li> <li>3.2.7. Track equipment installations</li> </ul> </li> </ul>
4. Fixed facilities for electric traction	<ul style="list-style-type: none"> <li>4.1. Catenary;</li> <li>4.2. Traction equipment</li> </ul>
5. Accessory works	<ul style="list-style-type: none"> <li>5.1. Landscape integration and minimizing impacts;</li> <li>5.2. Physical fences and parallel ways;</li> <li>5.3. Containment works;</li> <li>5.4. Installation/replacement of services;</li> <li>5.5. Other works</li> </ul>
6. Telecommunications	<ul style="list-style-type: none"> <li>6.1. Telecommunications</li> </ul>
7. Signaling and safety equipment's	<ul style="list-style-type: none"> <li>7.1. Road signaling equipment;</li> <li>7.2. Railway signaling equipment</li> </ul>
8. Integrated passages	<ul style="list-style-type: none"> <li>8.1. Top passages;</li> <li>8.2. Lower passages</li> </ul>
9. Special viaducts	<ul style="list-style-type: none"> <li>9.1. Viaducts</li> </ul>
10. Tunnels	<ul style="list-style-type: none"> <li>10.1. Tunnels</li> </ul>
11. Miscellaneous	<ul style="list-style-type: none"> <li>11.1. Construction site</li> </ul>



TABLE 2: Examples of articles for railway infrastructure.

ARTICLE DESCRIPTION	PARAMETERS (FILL OPTIONS)
Execution of the Technical Block next to small structures buried with a wedge-shape made up of a mixture of aggregate and \$1 of cement, a height of \$2 and a length of \$3, and a wedge-shape consisting of layers of well graded crushed aggregate of \$4 origin, with a \$5 in length, including supply and transport of materials, loading, unloading and placement at the work site and all the necessary work for its execution based on the design drawings, according to the specified conditions.	\$1 (cement percentage); \$2 (wedges height); \$3 (wedge length); \$4 (aggregate source); \$5 (length of aggregate wedge-shape)
Execution of the subballast layer of \$1 [m] thickness, in \$2 material and a capping layer with \$3 [m] thickness, in \$4 material, including supply and materials transport, loading, unloading, and placing at the application site and all the work necessary for its execution, according to the specified conditions.	\$1 (0.05, 0.12, 0.15, 0.18; 0.25); \$2 (granite, limestone, bituminous mixture); \$3 (0.05, 0.12, 0.15, 0.25); \$4 (granite, limestone, bituminous mixture)

TABLE 3: Topics filled in WES and MATS.

WORKS EXECUTION SHEETS (WES)	MATERIAL SHEETS (MATS)
1.Work definition	1.Material definition
2.Materials	2.Application field
3.Preparatory work	3.Composition
4.Process/Execution model	4.Features and properties
5.Control and acceptance	5.Application
6.Testing	6.Technical and regulatory references
7.Technical and regulatory references	7.Quality mark and certifications
8.Measurement criteria	8.Manufacturing process
9.Associated risks	9.Packaging, storage, and conservation
10.Other provisions	10.Risks and safety
11.Maintenance	11.Testing
	12.Restrictions and conditions of non-application
	13.Other provisions

The existing constructed track section is still kept in service for slow trains, electrified, thus increasing the exploration capacity of this section of the south line; iii) gain travel time of about 10 minutes in relation to the previous railway; iv) enable circulation at speeds between 190km/h and 220km/h over an extension of more than 100km; v) avoid impacts in terms of air and noise emissions, since the rolling stock is of electric traction; vi) execute works without interference with the existing railway in operation; and vii) reduce the maintenance costs during their life-cycle.

The present case study is chosen because it is based on the fact that is a recent work and encompasses the construction of several infrastructures, such as [28,29]: i) ballasted and electrified railway, with 60E1 rail, concrete monoblock sleepers multipurpose, spaced of 0.6m spacing, Vossloh type fixation and designed for a maximum axle load of 25ton; ii) Bridge consisting of three continuous sections, the metallic superstructure and the platform in reinforced concrete slab. The access viaducts are mixed, consisting of metal beams with a full core on which the reinforced concrete slab rests; iii) Pre-stressed reinforced concrete viaducts, where the superstructure is divided into several independent sections; iv) Uneven passages (upper and lower) in reinforced concrete and respective resettlement; v) Installation of signaling and communication systems; vi) Parallel path adjacent to the railway; and vii) Sealing the railway infrastructure to its full extent.



The study focuses on the part of the work related to the railway infrastructure, although a global analysis of the contract is carried out to organize its elements into construction models according to the perspective of the CU and DS [2,30,31].

## 6. DISCUSSION

In the present study, a new railway construction work was organized according to according to Construction Units (CU) and Design Specialties (DS). An analysis of the Bill of Quantities (BQ) of several railway infrastructure works was also carried out according to the work perspective to carry out a survey of which construction works are already in the ProNIC database. Then a WBS was created for the railway work, based on the chapters already existing in ProNIC. As for the remaining information elements, work descriptions and respective parameters, WES and MATS were developed. After the technical contents were created, they were implemented on the tool. Then it was possible to validate it using a case study. It is important to note that all the content developed was based on the rules and regulations in force at national and European level.

Briefly, the documents created in the present study were: i) WBS that is applicable to any type of railway work; ii) an article for the execution of type I technical blocks; iii) an article for the execution of technical blocks type II; iv) an article for the execution of the crowning layer; v) an article for the execution of the sub-ballast layer; vi) a WES to execute technical blocks type I; vii) a WES to execute the crowning layer; viii) WES to execute the sub-ballast layer; ix) a MATS for aggregates for railway works; x) a MATS for aggregates for sub-ballast; x) review of an MATS for cement; and xii) review of an MATS for water.

All the technical contents created were implemented on the PRoNIC tool. The BQ of the case study also was also included in ProNIC database.

It is expected that some of the gaps already existed in Portuguese AECO sector will be filled due to the fact that ProNIC has a transversal intervention in the entire process, covering the whole life cycle of constructed assets.

The study developed promotes the creation of standardized items that can be implemented in any case of railway works, based on Portuguese and European standards and legal frameworks in force. In this way, a national reference was created, for integration in an application, which is added to all types of public railway works.

It is worth highlighting the importance of providing the management and control of public works, with a view to creating greater accountability and skills for the stakeholders involved, and improve productivity and quality of the obtained results, allowing the monitorization and validation of the quality in the Portuguese AECO sector works, in particular railway infrastructures work.

## 7. CONCLUSION

Railway transport is used in Portugal not only for passengers' transport, but also for the transport of products around and seaports, contributing to the growth of the economy and exports.

The importance of the construction, maintenance and rehabilitation of railway infrastructures, the future investments foreseen in this subsector and the new requirements of the legal and regulatory framework, highlight the importance to use applications tools such as ProNIC.

The railway infrastructures were not yet included in the ProNIC tool. The use of ProNIC in railway works can lead to a standardized information between them, facilitating benchmarking, defining performance indicators and statistical values, and allowing the prediction of information for decision making processes and allowing improving management activities and project coherence, consequently providing optimization of time, resources, and costs.



## REFERENCES

- [1]. Moreira, A. Método de Dimensionamento de Vias-férreas, Mcs Thesis in Civil Engineering, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2014.
- [2]. Kanje, L. Aplicação da Metodologia ProNIC na Construção de Infraestruturas Ferroviárias. Mcs Thesis in Civil Engineering, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2016.
- [3]. Tribunal de Contas. Auditoria a empreendimentos de obras públicas por gestão direta. 2009, pp. 1–63.
- [4]. Åhrén, T.; Parida, A. Maintenance performance indicators (MPIs) for benchmarking the railway infrastructure: A case study. *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 16:2, pp. 247–258. 2009.
- [5]. ProNIC — Protocolo para a Normalização da Informação Técnica na Construção. <https://www.inesctec.pt/>
- [6]. Sadeghia, J.; Motieyan-Najara, M.; Zakeri, J.; Yousefi, B.; Mollazadeh, M. Improvement of railway ballast maintenance approach, incorporating ballast geometry and fouling conditions. *Journal of Applied Geophysics*. Vol.151, pp. 263–273. 2018.
- [7]. Zhai, W.; Wang, K.; Lin, J. Modelling, and experiment of railway ballast vibrations. *Journal of sound and vibration*, Vol. 270:4–5, pp. 673–683, 2004.
- [8]. Pires de Lima, A.; Monteiro, S. Plano Estratégico dos Transportes e Infraestruturas. Horizonte 2014–2020, 2014.
- [9]. Vale, C. Influência da qualidade dos sistemas ferroviários no comportamento dinâmico e no planeamento da manutenção preventiva de vias de alta velocidade. PhD thesis in Civil Engineering, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [10]. Oliveira, A. Via Balastrada versus Via Não Balastrada, D Mcs Thesis in Civil Engineering, ISEL, 2012.
- [11]. Fontul, S. Slides das aulas da disciplina infraestruturas ferroviárias e portuárias. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2015.
- [12]. Solla, M.; Pérez-Gracia, V.; Fontul, S. A Review of GPR Application on Transport Infrastructures: Troubleshooting and Best Practices. *Remote Sens.* 2021, 13, 672. <https://doi.org/10.3390/rs13040672>
- [13]. Indraratna, B.; Cholachat Rujikiatkamjorn, C; Vinod, J.; Hadi Khabbaz, H. A review of ballast characteristics, geosynthetics, confining pressures and native vegetation in rail track stabilization. University of Wollongong, Faculty of Engineering, and Information Sciences, 2009, pp. 25–35. <https://ro.uow.edu.au/engpapers/848>
- [14]. Fernandes, J. Modelação do Comportamento Mecânico de Vias-férreas, Mcs Thesis in Civil Engineering, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2011.
- [15]. Fortunato, E. Renovação de Plataformas Ferroviárias: estudos Relativos à Capacidade de Carga. PhD Thesis in Civil Engineering, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [16]. EN 13450 — Aggregates for railway ballast. European Committee for Standardization (CEN), 2015.
- [17]. REFER. Características técnicas do sub-balastro. Rede Ferroviária Nacional, EP. 2007.
- [18]. Alves, J. Avaliação de Dimensionamento da Subestrutura Ferroviária de Linhas de Alta Velocidade., Mcs Thesis in Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, 2010.
- [19]. UIC 719R — Earthworks and track bed for railway lines, No. February. 2008.
- [20]. Paixão, A., Fortunato, E., & Calçada, R. (2015). Design and construction of backfills for railway track transition zones. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(1), 58–70. doi:10.1177/0954409713499016
- [21]. Coelho, L. Blocos técnicos em infraestruturas ferroviárias — Comportamento e práticas nacionais e internacionais em engenharia civil. Instituto Superior Técnico, 2008.
- [22]. Paixão, A. Transition Zones in Railway Tracks. An Experimental and Numerical Study on the Structural Behaviour. PhD Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [23]. ProNIC. Memorando Pronic. pp. 1–11, 2015.



- [24]. Despacho n.º 578/2014, D.R. n.º 8 (Série II de 2014-01-13). Imprensa Nacional Casa da Moeda, Lisboa. vol. 2, pp. 2007–2008, 2014.
- [25]. ISO 12006-2: 2015. Building construction — Organization of information about construction works. Part 2: Framework for classification. International Organization for Standardization. 2015.
- [26]. Rodrigues, C. Aplicação da metodologia ProNIC a obras portuárias. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [27]. Campos, R. Aplicação da metodologia ProNIC a obras ferroviárias — Princípios gerais e viafêrrea. Msc Thesis in Civil Engineering, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [28]. Martins, F. Variante de Alcácer do Sal — Enquadramento, definição geral da obra e execução, Rede Ferroviária Nacional, EP. pp. 1–13, 2008.
- [29]. Kanje, L., Couto, P., Fontul, S., Falcão Silva, M.J. Aplicação da Metodologia ProNIC na Construção de Infraestruturas Ferroviárias. 2.º Encontro Nacional da Qualidade e Inovação na Construção (QIC2016), LNEC, 2016.
- [30]. Kanje, L., Couto, P., Fontul, S., Falcão Silva, M.J. Application of ProNIC methodology in railway infrastructures construction. 7<sup>th</sup> International Conference on Mechanics and Materials in Design (M2D), 2017.
- [31]. Portaria 701-H/2008. Aprova o conteúdo obrigatório do programa e do projeto de execução, os procedimentos e normas a adotar na elaboração e faseamento de projetos de obras públicas e a classificação de obras por categorias. Diário da República n.º 145/2008, 1º Suplemento, Série I, 5106-(37) a 5106-(80), 29 de julho de 2008.

#### DECLARAÇÃO ÉTICA

**CONFLITO DE INTERESSE:** Nada a declarar. **FINANCIAMENTO:** Nada a declarar. **REVISÃO POR PARES:** Dupla revisão anónima por pares.



Todo o conteúdo da **RAE — REVISTA DE ATIVOS DE ENGENHARIA** é licenciado sob [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.



# IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO NA FASE DE CRIAÇÃO DE ATIVOS CONSTRUÍDOS


## IDENTIFICATION OF CRITICAL SUCCESS FACTORS IN THE CREATION PHASE OF BUILT ASSETS


[10.29073/rae.v2i1.886](https://doi.org/10.29073/rae.v2i1.886)

**RECEÇÃO:** 14 de julho de 2023.

**APROVAÇÃO:** 3 de janeiro de 2024.

**PUBLICAÇÃO:** 6 de fevereiro de 2024.

**AUTOR/A 1:** Isabella Carvalho , Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás — Campus Jatai, Brasil, [isabellaborges81@gmail.com](mailto:isabellaborges81@gmail.com)

**AUTOR/A 2:** Francielle dos Santos , Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Brasil, [francielle.santos@ifg.edu.br](mailto:francielle.santos@ifg.edu.br)

### RESUMO

O presente trabalho visou identificar os fatores críticos de sucesso que envolvem a fase de criação de ativos construídos. Foi utilizado a revisão da literatura para verificar os principais Indicadores Chave de Desempenho para a formulação de um questionário. A análise estatística desde questionário foi feita com o auxílio do *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS), também foi calculado o valor do Índice de Importância Relativo (IRR) para determinar o grau de influência de cada fator. O questionário foi aplicado para grupos com cargos de ocupação diferentes e isso trouxe discrepâncias. ‘Desempenho técnico’, ‘Importância que as construtoras devem dar aos requisitos do usuário final e suas necessidades reais’ e ‘Empreendimento concluído no orçamento especificado’ foram identificados como críticos pelos entrevistados. O que reforça a necessidade de gerenciamento dos vários agentes envolvidos não só no processo de construção, mas em todas as fases de desenvolvimento do ativo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fatores Críticos; Indicadores de Desempenho; Processo de Construção.

### ABSTRACT

This study aimed to identify the critical success factors involved in the creation phase of built assets. It used a literature review to ascertain the main Key Performance Indicators and formulate a questionnaire. The statistical analysis from the questionnaire was done with the aid of the *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS), also the value of the Relative Importance Index (RII) was calculated to determine the degree of influence of each factor. The questionnaire was administered to groups with different occupation positions and this brought discrepancies. ‘Technical performance’, ‘Importance that construction companies should give to the end user’s requirements and their actual needs’ and ‘Completed project within the specified budget’ were identified as critical by the respondents. This reinforces the need for management of the various agents involved not only in the construction process, but in all phases of the development.

**KEYWORDS:** Construction Process; Critical Factors. Performance Indicators.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da indústria da construção civil, tem-se desde a década de 2010, emergiu uma competitividade que despertou a atenção das construtoras, que até então, não apresentavam uma concorrência significativa. Nesse cenário desafiador, as empresas que buscaram melhorias não apenas no planejamento e na gestão das obras, mas



também o desempenho dos ativos construídos, obtiveram um domínio melhor no controle da produção e na excelência da qualidade. Como resultado, essas empresas passaram a ser percebidas pelo mercado como participantes altamente competitivos (Santos & Santos, 2017).

O conceito de "gestão de ativos" no âmbito da engenharia civil engloba diversas definições, abrangendo desde a estrutura organizacional e administração de um conjunto de projetos até a análise de custo e benefício desses empreendimentos. Inclui ainda contratos integrados, como os modelos projetar-construir-manter-operar, nos quais partes privadas são designadas para gerenciar projetos ao longo de um período específico. Além disso, contempla os planos de manutenção, que se relacionam tanto ao valor financeiro quanto ao impacto econômico dos ativos construídos (Sebastian, 2013).

O empreendimento de construção é definido por diferentes partes que representam diferentes processos, a sua parte inicial é definida pelo pré-projeto que corresponde a todos os processos necessários para transformar as ideias e requisitos em um empreendimento bem definido antes do projeto. Ou seja, o empreendimento de construção é o todo representado pelas partes: concepção, desenho, planejamento, processo de construção e entrega (Haponava & Al-Jibouri, 2009).

Sabe-se que os empreendimentos de construção são únicos, complexos, dinâmicos, interativos e sofrem constantes mudanças. Eles podem apresentar baixo desempenho, e o resultado final do empreendimento pode ser ineficaz, não alcançando as metas finais estipuladas. Por esse motivo, a indústria da construção civil é criticada (Haponava & Al-Jibouri, 2010; Horstman & Witteveen, 2013).

O gerenciamento eficaz e o planejamento dos empreendimentos são de extrema importância para o sucesso dos mesmos. Nesse sentido, a escolha de seus gerentes é uma decisão considerável para o sucesso dos empreendimentos, pois estes devem ter experiência e compreensão da tecnologia exigida pelo projeto que gerenciam (Zavadskas et al., 2012). A definição do processo de construção também influencia no tempo de cada atividade que, pode exigir recursos extras ou mais eficientes, como, por exemplo, pagar horas extras aos funcionários para aumentar a produtividade ou reduzir o tempo de conclusão, e quando isso acontece a partilha de conhecimento entre as equipes é importante para o desempenho do empreendimento e de seu resultado (Zhang & Li, 2010).

O processo de construção, de acordo com Arditi & Gunaydin (1997), é responsabilidade do construtor. É ele o encarregado dos meios, métodos, técnicas, sequências e procedimentos da etapa de construção além dos programas e precauções de segurança. Enquanto o engenheiro e/ou projetista fornece o planejamento e as devidas especificações, o construtor utiliza dessas informações para conduzir o processo de construção, ou seja, diferentemente do empreendimento de construção que corresponde ao todo, o processo corresponde a uma fase, no caso deste trabalho à execução da obra.

Há uma necessidade de um modelo que faça, durante a construção, a medição e acompanhamento dos principais fatores que afetam o desempenho do processo, levando em consideração que um bom desempenho é um indicativo para o alcance das metas estipuladas ao final de qualquer empreendimento (Haponava & Al-Jibouri, 2010). Particularmente em ambientes competitivos, a eficácia de qualquer empreendimento é analisada com especial atenção. Nesse contexto, buscar um equilíbrio preciso entre as expectativas dos clientes em relação à qualidade dos produtos e serviços, aliadas à acessibilidade dos preços, bem como as demandas dos acionistas por retornos significativos sobre o capital investido (Schneider et al., 2006).

O aprimoramento do processo de construção é viável quando todas as partes envolvidas ao longo do ciclo de vida de um ativo podem acessar facilmente as informações necessárias e compartilhar conjuntos de dados, sejam eles novos ou existentes, de maneira direta e sem conflitos (Spagnolo, 2018). A capacidade de analisar as complexas interdependências entre as ações que envolve todo o processo de construção do ativo, bem como os custos e a



qualidade do serviço, é fundamental para tomar decisões acertadas. Esta capacidade não apenas contribui para a tomada de decisões informadas, mas também se alinha com a necessidade de avaliar diferentes cenários em todo o sistema ou em partes com a mesma estrutura ou tecnologia (Schneider et al., 2006).

A medição do desempenho surge como um elemento-chave nesse processo, que possibilita não apenas a redução ou eliminação de custos desnecessários, mas também impulsiona a produtividade e a lucratividade do empreendimento. Por exemplo, ao examinar o tamanho e a extensão de paradas e retrabalhos no processo de construção, a medição do desempenho torna-se uma ferramenta valiosa para otimizar operações. No entanto, o desafio central nesse contexto permanece em determinar o que medir e como conduzir a avaliação de desempenho de maneira eficaz (Olanrewaju & Abdul-Aziz, 2015). A capacidade de análise profunda das interações entre a gestão de ativos e a medição do desempenho, portanto, é crucial para um gerenciamento eficiente e sustentável.

Os empreendimentos de construção estão mais relevantes e complexos, devido ao surgimento de novas tecnologias, crescimento de orçamentos e dos processos e, portanto, o estudo de seu sucesso juntamente com o desenvolvimento dos indicadores chave de desempenho é uma forma de aperfeiçoar a capacidade do processo como um todo (Chan et al., 2004). O objetivo geral deste estudo é identificar os fatores críticos de sucesso relacionados à fase de criação do ativo construído, visando atingir as metas estabelecidas para o empreendimento. Além disso, busca-se avaliar o impacto desse empreendimento no desempenho global, contextualizado na realidade específica da cidade de Jataí-GO.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. MEDIÇÃO DE DESEMPENHO

No gerenciamento de projetos temos a medição do desempenho que possibilita uma diminuição e até a eliminação dos custos desnecessários e, além disso, aumenta produtividade e lucratividade do empreendimento e, para isso, deve-se mostrar o tamanho e a extensão das paradas e retrabalhos no processo de construção. O principal desafio da medição de desempenho, no entanto, é o que medir e como medir o desempenho (Olanrewaju & Abdul-Aziz, 2015).

De acordo com Neely et al. (1995), o termo medição de desempenho é definido como a aferição quantitativamente da eficiência e eficácia da ação. É ele que possibilita que o processo de gerenciamento de desempenho seja de tal forma a saber como as exigências do cliente são atendidas e o quanto os recursos da empresa são usados para alcançar um nível de satisfação do cliente (Bititci et al., 1997; Neely et al., 1995).

A medição do desempenho do empreendimento é praticada pelos indicadores convencionais de tempo, custo e qualidade durante o processo de execução (Lehtiranta et al., 2012; Toor & Ogunlana, 2010). A satisfação do proprietário, prazo, lucro, segurança, qualidade, preço e mudança na gestão são os indicadores chave de desempenho que, no decorrer da construção, contribuem para a análise quantitativamente do desempenho geral do empreendimento (Hanna, 2016).

### 2.2. INDICADORES-CHAVE DE DESEMPENHO

Os gestores de uma empresa apresentam um papel importante acerca da construção de um empreendimento, trata-se da criação de um sistema de indicadores que devem constituir a totalidade dos processos dentro de uma organização. Esse sistema indica fielmente informações proveitosas e certas mostrando o desempenho do negócio, além disso ele ajuda na quantificação dos processos estabelecendo os padrões do desempenho (Fernandes, 2004; Rodrigues & Canelada, 2015).

Os indicadores mostram para os gestores como e onde estão os processos apontando como suas tarefas estão sendo feitas e, por isso, a medição se torna uma necessidade para que seja possível verificar as melhorias dentro de uma



organização (Fernandes, 2004; Ribeiro Filho, 2017). Medir é desenvolver dados importantes utilizando os indicadores e sem estes seria difícil identificar o problema ocasionando assim um contratempo na intervenção devido à falta de informação (Fernandes, 2004; Rodrigues & Canelada, 2015).

A sigla *KPI* se refere a *Key Performance Indicator* que, segundo Rodrigues & Canelada (2015) é uma tática da área de gestão que significa, em português, Indicador-Chave de Desempenho.

Esses indicadores críticos devem ser medidos, examinados e ponderados em relação a seus desempenhos. Além disso, quem tem o papel de os escolher são os gerentes, pois estes sabem a real necessidade das deliberações estratégicas e táticas (Neves, 2012).

Os *KPIs* podem ser determinados por produtos quantitativos e qualitativos do processo de construção, são importantes para relacionar o desempenho real e aferido em termos de eficiência<sup>1</sup>, de eficácia<sup>2</sup> e de qualidade da mão de obra e do produto. Citam-se, como exemplo, os medidores: custo/unidade e o comportamento dos colaboradores da empresa no ambiente de trabalho, respectivamente (Cox & Issa, 2003).

Além disso, eles medem, controlam e administram o desempenho dos subprocessos, relacionando os empreendimentos entre si para descobrir se estão sendo feitas as melhorias e se os objetivos estabelecidos para o empreendimento foram alcançados (Haponava & Al-Jibouri, 2010). Por esse motivo, Segundo Neves (2012), a escolha dos indicadores de desempenho deve levar em consideração a natureza e o tamanho da organização, além de serem coerentes com suas estratégias e políticas.

Os *KPIs* não podem ser generalizados pois cada empreendimento tem particularidades e limitações que são únicas e são de extrema importância o entendimento dos diferentes *KPIs* nos diversos projetos, pois as lições aprendidas em cada um servem para compartilhar e expandir os vários indicadores para projetos futuros e, por isso, devem ser ajustados conforme o ambiente e as características de cada projeto (Lehtiranta et al., 2012; Toor & Ogunlana, 2010).

O gerenciamento de processos que envolvem a etapa de construção e o controle da qualidade do produto são duas entradas muito importantes, mas a primeira deve ter seu foco no controle do projeto. Esses processos são subprocessos que fazem parte do sucesso do empreendimento final como, por exemplo, o gerenciamento das partes envolvidas e o envolvimento que eles assumiram entre si (Haponava & Al-Jibouri, 2010).

Ao longo da vida de um projeto de construção, um empreendimento é executado e concluído através de muitas relações e decisões planejadas ou não em um meio de mudança, alguns fatores são mais críticos do que outros para o sucesso deste projeto (Salleh, 2009).

Segundo Salleh (2009) e Chan et al. (2004), o termo Fatores Críticos de Sucesso foi usado pela primeira vez por Rockart em 1982 e inserido no setor de gerenciamento de projetos. Este setor acrescenta no âmbito das habilidades dos profissionais de forma há tornar melhor o planejamento, a implantação e o gerenciamento das atividades, de acordo com os objetivos da empresa (Berssaneti et al., 2016).

De Wit (1988) apud Cooke-Davies (2002)<sup>3</sup> diferenciou os seguintes termos: critérios de sucesso e fatores de sucesso. Segundo ele as diferenças entre os critérios de sucesso e os fatores de sucesso são: o primeiro refere-se as medidas que um empreendimento será julgado por seu fracasso ou sucesso, já o segundo são os elementos, variáveis,

---

<sup>1</sup> Eficiência consiste em fazer algo utilizando a menor quantidade de recursos possível (DICIO, 2020). (In: DICIO, Dicionário Online de Português. Porto: 7Graus, 2020. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/eficiencia/>. Acesso em: 28/12/2020.)

<sup>2</sup> Eficácia está ligada a atingir os objetivos sem poupar recursos financeiros, pessoas, investimentos. (In: DICIO, Dicionário Online de Português. Porto: 7Graus, 2020. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/eficacia/>. Acesso em: 28/12/2020.)

<sup>3</sup> De Wit A. Measurement of project success. International Journal of Project Management 1988; 6.



entradas ou medidas que são tomadas e que levam um empreendimento ao sucesso, direta ou indiretamente, ou seja, os fatores levam os empreendimentos a serem bem-sucedidos. Para entender melhor, é necessário analisar sob o ponto de vista das partes interessadas, analisar os seus interesses e o que eles pretendem alcançar através do empreendimento (Cooke-Davies, 2002).

### 2.3. DEFINIÇÃO DAS METAS DO EMPREENDIMENTO

O significado de sucesso pode ser ambíguo devido a conhecimentos variados entre seus participantes que são, cliente/empresário, engenheiros, arquitetos, empreiteiros e outros. Estes participantes terão percepções diferentes sobre o que leva ao sucesso, por exemplo, o arquiteto pode considerar a boa estética como fator crítico de sucesso, já o empreiteiro pode identificar o fator da lucratividade, a questão é que tradicionalmente tempo, custo e qualidade sempre foram os fatores mais críticos de sucesso de um projeto, adicionado a eles, temos a satisfação do cliente. Porém, uma série de fatores devem ser levados em consideração para o sucesso do projeto (Chan et al., 2002).

Songer & Molenaar (1996) pesquisaram sobre os fatores críticos de sucesso em empreendimentos de construção em relação a atitude dos empresários. Os fatores identificados são aqueles relacionados ao tempo, custo e qualidade, são eles: dentro do orçamento e do cronograma e satisfação da expectativa do cliente.

O sucesso do empreendimento está relacionado diretamente às suas metas e expectativas e, se elas foram atendidas, os fatores são aqueles que levam ao sucesso, atingindo as metas estabelecidas, como tempo, custo e qualidade. Cada projeto é único e apresentam metas e objetivos singulares que servem para a medição de desempenho (Chan et al., 2002).

Lim & Mohamed (1999) dividiram o sucesso do empreendimento de construção em fatores macro e micro, no primeiro são elencados os critérios de conclusão e satisfação já no segundo são categorizados os critérios de conclusão que dependem de tempo, custo, qualidade, desempenho e segurança e nestes estão atrelados o desempenho técnico, financeiro e risco ambiental e humano. Para a conclusão temos o fator tempo que depende da economia, gerenciamento, supervisão, clima e outros, já para a satisfação do cliente temos os fatores de utilização e operação neste caso o proprietário deve aceitar o projeto e isso faz com que critérios como conveniência, localização, prestígio, estacionamento, custo e outros seja considerável (Lim & Mohamed, 1999).

## 3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada ocorreu por meio de um estudo de caso exploratório, e, através de uma pesquisa quantitativa, realizou-se um questionário online com estudantes e profissionais do setor da construção civil da cidade de Jataí-GO.

A pesquisa foi desenvolvida em cinco etapas: revisão da literatura para levantamento dos *KPIs*, elaboração e aplicação do questionário, avaliação do conteúdo e identificação dos fatores críticos de sucesso do projeto, como proposto na Figura 1.

Uma extensa revisão da literatura foi realizada. Essa etapa foi primordial para identificar os principais *KPIs* que determinam o desempenho do processo de construção, que resultou no grupo de fatores investigados apresentados na Tabela 1.

As entrevistas consistiram na aplicação do questionário aos estudantes e profissionais da construção civil da cidade de Jataí-Goiás. Os participantes da pesquisa foram selecionados a partir da lista de associados do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Goiás (CREA-GO) e através de grupos de redes sociais.

O questionário foi formulado por meio da plataforma do Google Forms, enviado e aplicado através de webmail e redes sociais. Na primeira parte os entrevistados responderam perguntas referentes às suas informações básicas,



tais como, cargo de ocupação, experiência no setor da construção civil e grau de escolaridade. Já na segunda parte os entrevistados avaliaram a influência do desempenho no processo de construção com o uso da escala de Likert.

Segundo Robson (2011), esse tipo de avaliação foi criado por Likert na década de 1930, ela é bastante utilizada além de ser relativamente fácil de ser desenvolvida. Para a facilitação da análise de resultados, a classificação desta escala consistiu em cinco expressões fixas de 1 a 5 (1 = importância muito baixa; 2 = importância baixa; 3 = importância média; 4 = importância alta; 5 = importância muito alta), além da alternativa de NA (não aplicável) (Freitag, 2015).

Os itens de classificação de uma escala de Likert são interessantes para os entrevistados e eles costumam apreciar o fato de responder com uma escala desse tipo, isso é importante porque além dos entrevistados estarem curiosos eles acabam por dar uma resposta consistente, pois a maioria das vezes não estão propensos em colaborar em algo que pareça sem relevância ou originalidade (Freitag, 2015).

Para a análise estatística foi realizada a análise de confiabilidade através do  $\alpha$ -Cronbach. Este alfa determina a consistência dos fatores e a confiabilidade das respostas coletadas, que segundo Landis & Koch (1977), se estiver entre 0 e 0,20 é uma confiabilidade pequena, 0,21 a 0,40 razoável, 0,41 a 0,60 moderada, 0,61 a 0,80 substancial e 0,81 a 1,00 é uma confiabilidade quase perfeita. Este método demonstrou a inter-relação dos elementos dentro da avaliação, sendo utilizado para fins de investigação para garantir a validade do teste, em que um baixo valor resultante pode ilustrar uma falta de inter-relação entre os itens ou poucas perguntas respondidas. A realização desta análise estatística foi efetuada com o software SPSS 26.0 versão para Windows.

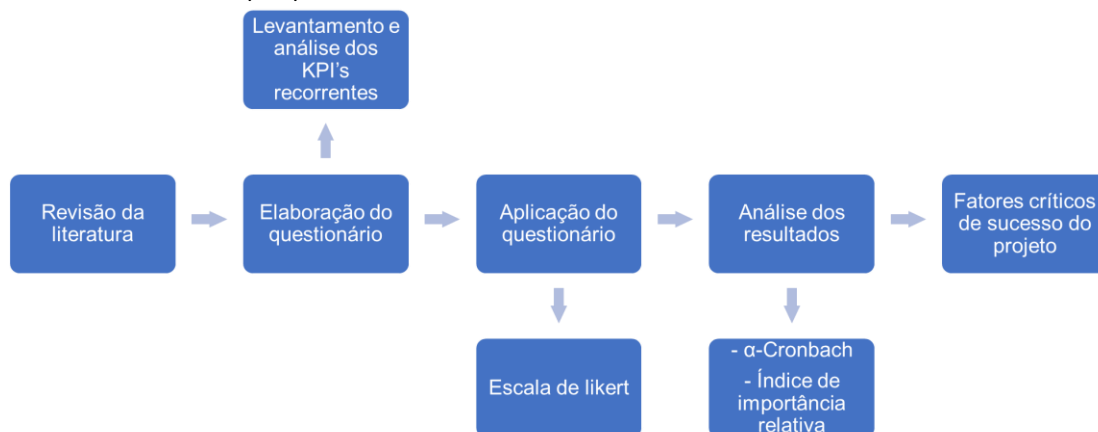
Para complementar a análise estatística foi utilizado o Índice de Importância Relativa (Relative Importance Indices — RII) que verificou a importância relativa dos *KPIs* para o sucesso do projeto (Ali et al., 2013). A escala de Likert pode ser transformada em índices (RII) para cada fator como mostra a Equação 1 (Aibinu & Odeyinka, 2006; Ali et al., 2013):

$$RII = \frac{(n \cdot 1) + (n \cdot 2) + (n \cdot 3) + (n \cdot 4) + (n \cdot 5)}{A \cdot N} \quad (1)$$

Onde “n” corresponde a frequência de cada resposta dada, levando em consideração que ela varia de 1 a 5, “A” o maior peso (neste caso, será 5) e “N” corresponde ao número de entrevistados (Ali et al., 2013). O maior valor final de RII encontrado é o fator crítico de sucesso que tem mais importância para o sucesso dos empreendimentos.

Para validar e selecionar os *KPIs* mais críticos como também os problemas a serem incluídos para a medição do desempenho, foi realizada uma análise estatística, com a utilização do Microsoft Excel®. E, por fim, com base no questionário foi possível traçar os fatores críticos de sucesso do empreendimento.

**FIGURA 1:** Delineamento da pesquisa





**TABELA 1:** Visão geral da pesquisa feita para estabelecer a relação entre vários fatores e o desempenho do projeto desejado.

KPIS	NÚMERO	GRUPOS DE FATORES INVESTIGADOS	AUTORES
Tempo	T01	Eficiência do Empreendimento: empreendimento concluído no prazo especificado/Andamento no Cronograma de Construção.	Shenhar et al. (1997); Chan et al. (2002); Lim & Mohamed (1999); Hanna (2016); Cox & Issa (2003)
	T02	Economia influencia no fator de conclusão.	Lim & Mohamed (1999)
	T03	Gestão e Supervisão.	Lim & Mohamed (1999)
	T04	Clima.	Lim & Mohamed (1999)
	T05	Retrabalho na construção: consertar o trabalho no local.	Hanna (2016); Cox & Issa (2003)
	T06	Comportamento e Absenteísmo dos colaboradores no ambiente de trabalho.	Cox & Issa (2003)
	T07	Mudança na Gestão: mudanças durante a construção, no mínimo, consomem tempo e esforço.	Hanna (2016)
	T08	Esforço de planejamento.	Ashley et al. (1987)
Custo	C01	Eficácia do Empreendimento: empreendimento concluído no orçamento especificado.	Shenhar et al. (1997); Cox & Issa (2003)
	C02	Gerenciamento de Recursos: monitorar o desperdício de material.	Cox & Issa (2003)
	C03	Rotatividade: custos associados aos trabalhadores que deixam a empresa e custos de novos treinamentos.	Cox & Issa (2003)
	C04	Lucratividade.	Chan et al. (2002); Hanna (2016)
	C05	Custo unitário de construção é definido como o custo final de construção dividido pela metragem quadrada da instalação.	Hanna (2016)
	C06	Crescimento do custo de construção é a diferença percentual entre o custo final de construção e o valor do empreendimento concedido.	Hanna (2016)
Qualidade	Q01	Desempenho Técnico.	Lim & Mohamed (1999); Chan et al. (2002)
	Q02	Estética.	Chan et al. (2002)
	Q03	Sistemas de Qualidade para o controle da qualidade.	Hanna (2016); Cox & Issa (2003)
	Q04	Deficiências e Lista de pendências.	Hanna (2016)
Satisfação do Cliente	SC01	Impacto no Cliente: importância que as construtoras devem dar aos requisitos do usuário final e suas necessidades reais.	Shenhar et al. (1997)
	SC02	Prestígio: grande influência da construtora no meio que está inserida.	Lim & Mohamed (1999)
	SC03	Lista de pendências: com o uso de relatórios uma lista ocorre no final de qualquer tarefa ou empreendimento específico.	Cox & Issa (2003)
	SC04	Ausência de Conflitos.	Chan et al. (2002)
	SC05	Reclamações.	Hanna (2016)
	SC06	Equipe de Projetos Satisfeita.	Hanna (2016)
Segurança	S01	Risco Humano: cumprimento da segurança dentro do empreendimento. /Eliminação das perdas devido as práticas de trabalho inadequado que afetam a saúde e força de trabalho.	Lim & Mohamed (1999); Cox & Issa (2003)
	S02	Período sem Incidentes.	Hanna (2016)
	S03	Taxa de Incidentes Graves.	Hanna (2016); Cox & Issa (2003)
	S04	Treinamento do trabalhador.	Cox & Issa (2003)
	S05	Número de Fatalidades.	Hanna (2016)



#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A quantidade de respostas obtidas do questionário proposto foram de 27, sendo 8 estudantes e 19 profissionais. A análise foi organizada da seguinte forma: primeiro foi calculado o valor de  $\alpha$ -Cronbach, através do SPSS 26.0, para descobrir a confiabilidade do questionário e logo após foi utilizada a Equação (3.1) para descobrir o RII e seu respectivo Rank dentro dos 29 fatores.

Na Tabela 2 estão apresentados os fatores, o  $\alpha$ -Cronbach para cada grupo de *KPI*, os valores de RII, suas respectivas médias e o ranking de cada RII dentro dos 29 fatores. Os fatores foram identificados pela inicial do grupo de *KPI* que se encontra incluso e enumerados conforme a sua ordem na tabela. Com a aplicação do questionário, a média dos resultados da análise  $\alpha$ -Cronbach para os 29 itens é 0,891, conforme apresentado na Tabela 2, indicando uma confiabilidade interna quase perfeita. Além disso, foi possível obter o grau de influência do desempenho do empreendimento com o uso da escala de Likert. Para isso foi utilizado o RII, como forma de selecionar os fatores mais críticos e quais os problemas a serem incluídos na medição do desempenho. Os valores de RII podem variar entre 0 e 1, para este trabalho eles ficaram entre 0,622 e 0,933 conforme Tabela 2. O fator 'Q01' foi classificado em primeiro pelos entrevistados (RII=0,933), 'SC01' (RII=0,911) em segundo e 'C01' (RII=0,889) em terceiro como apresentado na Tabela 2.

Como mostra na Figura 2, as maiores médias de RII indicam os grupos de *KPIs* que apresentam maior importância para o sucesso dos empreendimentos, ou seja, os *KPIs* 'Qualidade' e 'Segurança' foram classificados os mais importantes para o sucesso dos empreendimentos por apresentarem como média 0,828 e 0,843, respectivamente.

Conforme exposto em seu artigo, Enshassi et al. (2009) confirmam que o grupo de *KPI* nomeado de Qualidade é o mais importante, pois demonstra interesse nos fatores técnicos por quem está comandando o empreendimento. Da mesma forma, segundo esses autores, a aplicação do grupo Segurança em empreendimentos irá melhorar o desempenho geral de tais. Além disso, Cheung et al. (2004), citam que esse grupo afeta a segurança dos funcionários e por isso tem consequências fortes com o desempenho dos empreendimentos.

#### 5. DISCUSSÕES

Os fatores mais críticos para o sucesso do empreendimento, considerados pelos entrevistados, foram organizados em forma de fluxograma para cada grupo de *KPI* nas figuras a seguir.

A eficiência do projeto, segundo Shenhar et al. (1997), diz se um empreendimento foi concluído dentro do prazo e orçamento especificado, como mostra nas Figuras 3 e 4. Quando há ciclos de vida mais curtos do produto e com o aumento da concorrência pelo mesmo, o tempo, desde a parte inicial até a inserção do produto no mercado, torna-se um fator crítico de sucesso importante. E, para Lim & Mohamed (1999), o fator tempo é condição para a conclusão de um empreendimento e, fatores como gestão e supervisão são os fatores de sucesso que fazem com que o empreendimento seja finalizado dentro do tempo.

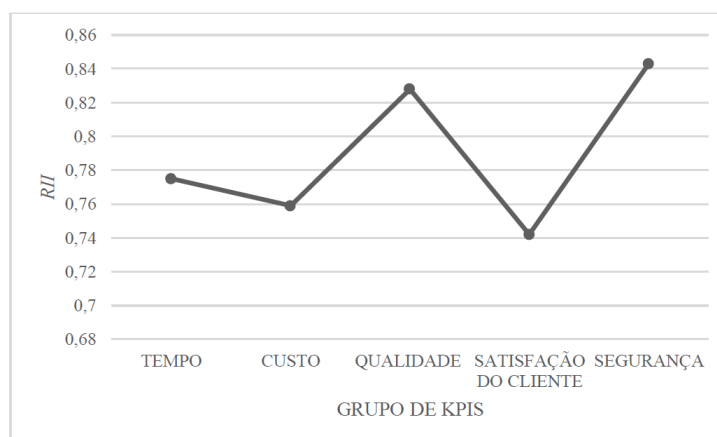
Os fatores elencados nas Figuras 5 e 6 vão ao encontro com as afirmações de Chan et al. (2002) e Olanrewaju & Abdul-Aziz (2015), quando há especificações objetivas, instruções claras e entendimento consistente um empreendimento apresenta uma alta qualidade e quando esses requisitos técnicos são estabelecidos o desempenho técnico torna-se importante. Como também, é necessário que se tenha conhecimento suficiente e adequado das necessidades e desejos reais de seus clientes. E ainda, segundo eles, a existência de qualquer empreendimento depende de quão satisfeitos os clientes estão.



**TABELA 2:** Coeficiente  $\alpha$ -Cronbach, Índice de Importância Relativa, média e ranking dos fatores críticos de sucesso do empreendimento.

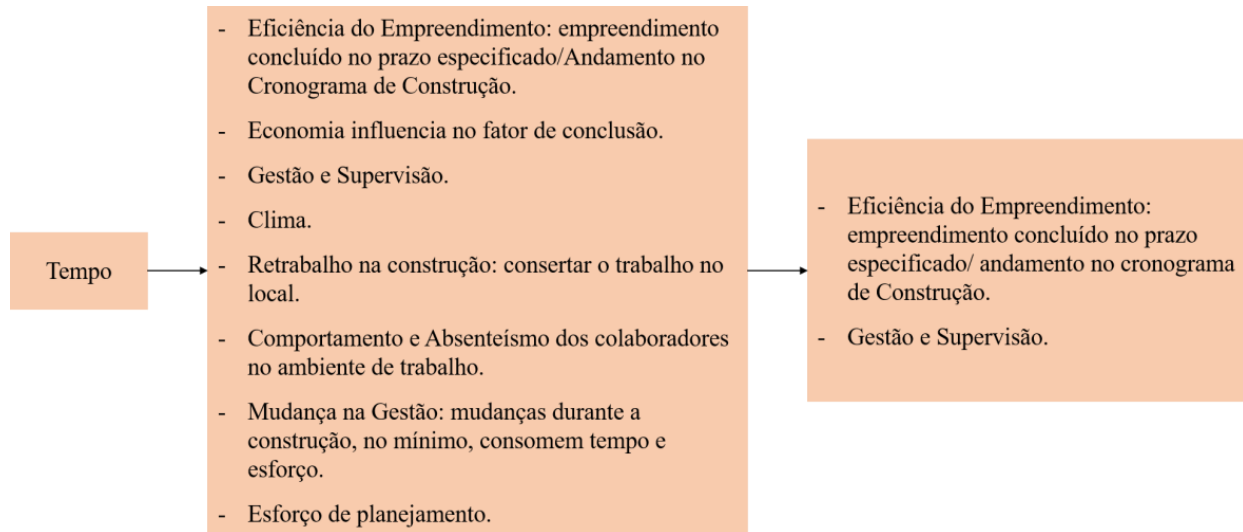
GRUPOS DE KPIs	NÚMERO	A-CRONBACH	RII	MÉDIA	RANK
Tempo	T01	0,723	0,881	0,775	4
	T02		0,741		15
	T03		0,837		8
	T04		0,644		19
	T05		0,800		10
	T06		0,763		13
	T07		0,733		16
	T08		0,800		10
Custo	C01	0,509	0,889	0,759	3
	C02		0,844		7
	C03		0,741		15
	C04		0,778		12
	C05		0,622		20
	C06		0,681		18
Qualidade	Q01	0,674	0,933	0,828	1
	Q02		0,778		12
	Q03		0,815		9
	Q04		0,785		11
Satisfação do Cliente	SC01	0,657	0,911	0,742	2
	SC02		0,704		17
	SC03		0,756		14
	SC04		0,778		12
	SC05		0,681		18
	SC06		0,622		20
Segurança	S01	0,799	0,881	0,843	4
	S02		0,874		5
	S03		0,859		6
	S04		0,859		6
	S05		0,741		15

**FIGURA 216:** Média dos valores de RII para cada grupo de KPI.

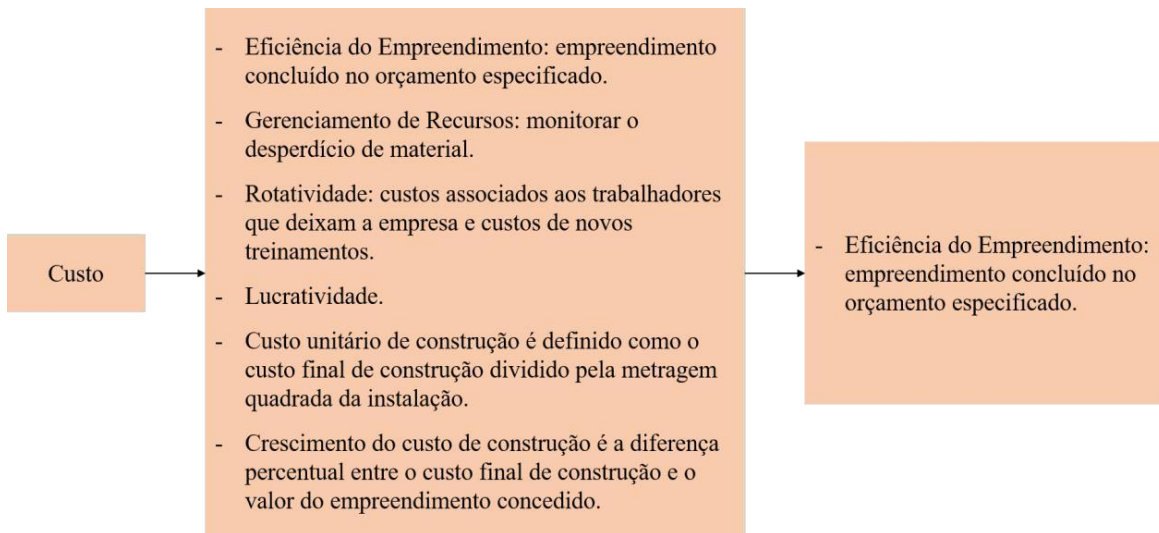




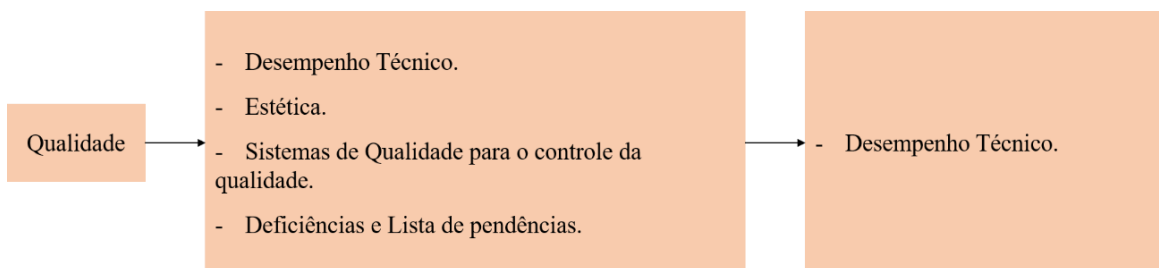
**FIGURA 3:** Fatores Críticos para o *KPI* Tempo.



**FIGURA 4:** Fatores Críticos para o *KPI* Custo.

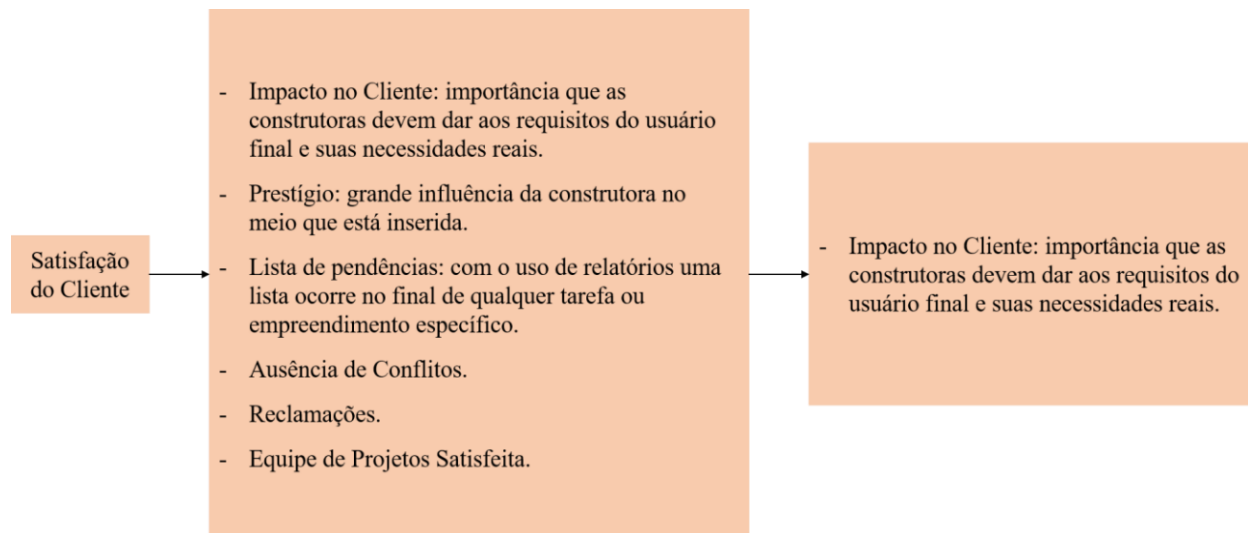


**FIGURA 5:** Fatores Críticos para o *KPI* Qualidade.



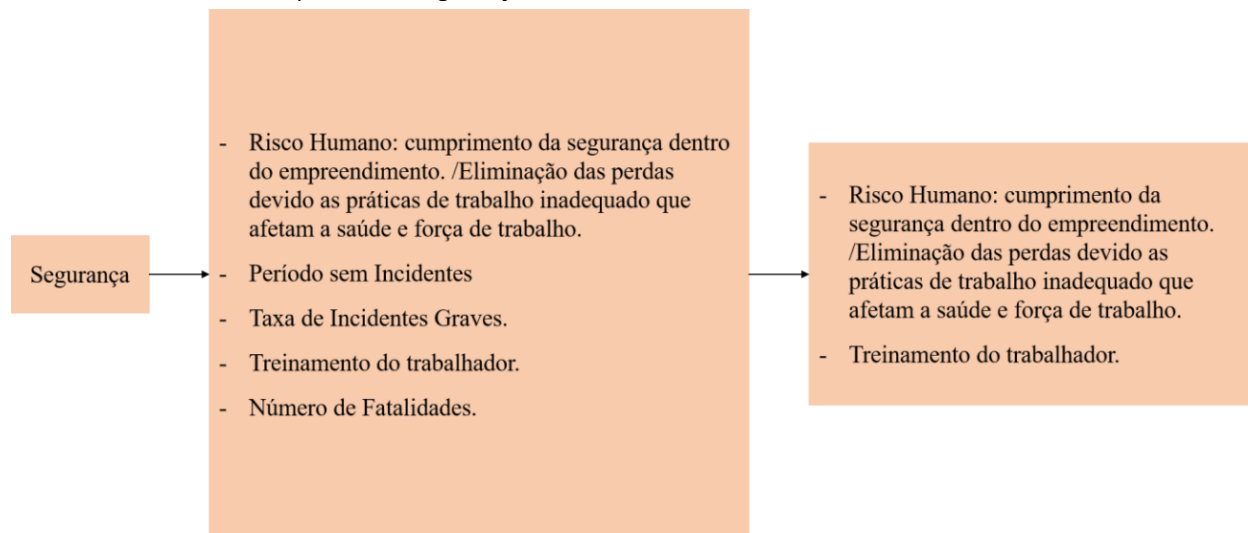


**FIGURA 6:** Fatores Críticos para o *KPI* Satisfação do Cliente.



Para o *KPI* de Segurança, segundo Cox & Issa (2003), a empresa pode ver benefícios através do treinamento do trabalhador quando a mesma mapear o desempenho do trabalho utilizando como suporte à segurança. Por ter um impacto prejudicial quando não executada, a segurança apresenta grande preocupação para todas as empresas de construção pelo fato de parar uma área de trabalho. Para eles, os fatores que têm como relação o *KPI* de segurança mostraram maior importância na pesquisa dentre outros. E, por isso, os fatores de segurança são considerados como importantes para o sucesso do empreendimento, conforme a Figura 7.

**FIGURA 7:** Fatores Críticos para o *KPI* Segurança.



## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho visou identificar os fatores críticos de sucesso relacionados à fase de criação do ativo construído, visando alcançar as metas estabelecidas para o empreendimento. Por meio da revisão da literatura foi possível levantar os principais grupos de *KPIs* para Tempo, Custo, Qualidade, Satisfação do Cliente e Segurança, que auxiliaram na determinação para o melhor desempenho do processo de construção. Tais *KPIs* serviram como base para a elaboração do questionário.

Após a aplicação do questionário foi realizado uma análise estatística, dentre os 27 respondentes essa pesquisa apresentou um  $\alpha$ -Cronbach de 0,878 indicando uma confiabilidade interna quase perfeita, o que possibilitou a



continuidade da análise. Para atingir o objetivo de determinar o grau de influência de cada fator no desempenho do processo de construção do ativo foi realizado a análise com o uso de RII que correspondeu ao ranqueamento de cada fator.

Os fatores ‘Desempenho técnico’ do *KPI* de Qualidade, ‘Importância que as construtoras devem dar aos requisitos do usuário final e suas necessidades reais’ do *KPI* de Satisfação do Cliente e ‘Empreendimento concluído no orçamento especificado’ do *KPI* de Custo foram identificados como críticos pelos 27 entrevistados. O que reforça a necessidade de gerenciamento dos vários agentes envolvidos não só no processo de construção, mas em todas as fases de desenvolvimento do empreendimento.

Participaram desta pesquisa dois grupos de entrevistados, estudantes e profissionais da área da construção civil, para cada um foram identificadas diferenças entre os fatores críticos. Para os estudantes os fatores foram ‘Treinamento do trabalhador’, ‘Cumprimento da segurança dentro do empreendimento com eliminação das perdas/’ ‘Empreendimento concluído no prazo especificado’ e ‘Empreendimento concluído orçamento especificado’. Para os profissionais os fatores foram ‘Desempenho técnico’, ‘Importância que as construtoras devem dar aos requisitos do usuário final e suas necessidades reais’ e ‘Empreendimento concluído orçamento especificado’. E essa diferença se deve as suas experiências e posições diferentes dentro do mercado de trabalho. Mas, ainda assim o fator relacionado ao custo foi comum a ambos os grupos.

#### REFERÊNCIAS

- Aibinu, A. A., & Odeyinka, H. A. (2006). Construction delays and their causative factors in Nigeria. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(7), 667–677.
- Ali, H. A. E. M., Al-Sulaihi, I. A., & Al-Gahtani, K. S. (2013). Indicators for measuring performance of building construction companies in Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of King Saud University — Engineering Sciences*, 25(2), 125–134.
- Arditi, D., & Gunaydin, H. M. (1997). Total quality management in the construction process. *International Journal of Project Management*, 15(4), 235–243.
- Ashley, D. B., Lurie, C. S., & Jaselskis, E. J. (1987). Determinants of construction project success. *Project Management Journal*, 18(2), 69–79.
- Berssaneti, F. T., Carvalho, M. M. de, & Muscat, A. R. N. (2016). O impacto de fatores críticos de sucesso e da maturidade em gerenciamento de projetos no desempenho: um levantamento com empresas brasileiras. *Production*, 26(4), 707–723.
- Bititci, U. S., Carrie, A. S., & McDevitt, L. (1997). Integrated performance measurement systems: A development guide. *International Journal of Operations & Production Management*, 17(5), 522–534.
- Chan, A. P. C., Scott, D., & Chan, A. P. L. (2004). Factors affecting the success of a construction project. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(1), 153–155.
- Chan, A. P. C., Scott, D., & Lam, E. W. M. (2002). Framework of success criteria for design/build projects. *Journal of Management in Engineering*, 18(3), 120–128.
- Cheung, S. O., Suen, H. C. H., & Cheung, K. K. W. (2004). PPMS: A Web-based construction Project Performance Monitoring System. *Automation in Construction*, 13(3), 361–376.
- Cooke-Davies, T. (2002). The “real” success factors on projects. *International Journal of Project Management*, 20(3), 185–190.



- Cox, R. F., & Issa, R. R. A. (2003). Management's perception of key performance indicators for construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(2), 142–151.
- Enshassi, A., Mohamed, S. & Abushaban, S. (2009). Factors affecting the performance of Construction projects in the Gaza Strip. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(3), 269–280.
- Fernandes, D. R. (2004). Uma contribuição sobre a construção de indicadores e sua importância para a gestão empresarial. *Revista da FAE*, 7(1), 1–18.
- Freitag, A. E. B. (2015). *Fatores críticos de sucesso para adoção da gestão "enxuta" pela indústria da construção civil do Estado do Rio de Janeiro* [Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense]. [https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.isf?pop\\_up=true&id\\_trabalho=3265301](https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.isf?pop_up=true&id_trabalho=3265301)
- Hanna, A. S. (2016). Benchmark performance metrics for integrated project delivery. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(9), 1–9.
- Haponava, T., & Al-Jibouri, S. (2009). Identifying key performance indicators for use in control of pre-project stage process in construction. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 58(2), 160–173.
- Haponava, T., & Al-Jibouri, S. (2010). Influence of process performance during the construction stage on achieving end-project goals. *Construction Management and Economics*, 28(8), 853–869.
- Horstman, A., & Witteveen, W. (2013). Performance Indicators in the Best Value Approach. *Journal for the Advancement of Performance Information and Value*, 5(2), 59–78.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159–174.
- Lehtiranta, L., et al. (2012). The role of multi-firm satisfaction in construction project success. *Construction Management and Economics*, 30(6), 463–475.
- Lim, C. S., & Mohamed, M. Z. (1999). Criteria of project success: an exploratory re-examination. *International Journal of Project Management*, 17(4), 243–248.
- Neely, A., Gregory, M., & Platts, K. (1995). Performance measurement system design: A literature review and research agenda. *International Journal of Operations & Production Management*, 15(4), 80–116.
- Neves, A. (2012). *O uso de indicadores chave de desempenho para avaliar a eficiência dos sistemas de gestão*. [Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Educação e Ciências]. [https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/8978/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Mestrado Andreia%20Neves%20KPI.pdf](https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/8978/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Mestrado%20Andreia%20Neves%20KPI.pdf)
- Olanrewaju, A. L., & Abdul-Aziz, A. R. (2015). *Building Maintenance Processes, Principles, Procedures, Practices and Strategies*. In: *Building Maintenance Processes and Practices*. Springer.
- Ribeiro Filho, J. (2017). *Definição e implantação de KPIs para auxiliar a gestão de uma empresa de softwares*. [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia]. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19307>
- Robson, C. (2011). *Real World Research: a resource for users of social research methods in applied settings*. 3<sup>rd</sup> Ed. John Wiley & Sons, Ltd.



- Rodrigues, A. C., & Canelada, M. (2015). *Utilização de KPI — indicadores de desempenho na cadeia de suprimentos. Um estudo de caso em indústria metalúrgica no setor da construção civil* [Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário Eurípides de Marília]. <https://aberto.univem.edu.br/handle/11077/1418>
- Salleh, R. (2009). *Critical Success Factors of Project Management for Brunei Construction Projects: Improving Project Performance* [Doctoral thesis, Queensland University of Technology]. [https://eprints.qut.edu.au/38883/1/Rohaniyati\\_Salleh\\_Thesis.pdf](https://eprints.qut.edu.au/38883/1/Rohaniyati_Salleh_Thesis.pdf)
- Santos, P. R. R., & Santos, D. G. (2017). Investigação de perdas devido ao trabalho inacabado e o seu impacto no tempo de ciclo dos processos construtivos. *Ambiente Construído*, 17(2), 39–52.
- Schneider, J., et al. (2006). Asset management techniques. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 28(9), 643–654.
- Sebastian, R. (2013). Asset management business model for design, realization, and maintenance of fibre reinforced polymer bridges. *Advances in Civil Engineering*, 868791.
- Shenhar, A. J., Levy, O., & Dvir, D. (1997). Mapping the Dimensions of Project Success. *Project Management Journal*, 28(2), 5–13.
- Songer, A. D., & Molenaar, K. R. (1996). Selecting design-build: public and private sector owner attitudes. *Journal of Management in Engineering*, 12(6), 47–53.
- Spagnolo, S. L. (2018). Information integration for asset and maintenance management. In A. Sanchez, X., K. D. Hampson, & G. London (Eds.), *Integrating information in built environments: from concept to practice*, 133–1491. Ed. Abingdon.
- Toor, S. ur-R., Ogunlana, S. O. (2010). Beyond the “iron triangle”: Stakeholder perception of key performance indicators (KPIs) for large-scale public sector development projects. *International Journal of Project Management*, 28(3), 228–236.
- Zavadskas, E. K., et al. (2012). Multiple criteria decision support system for assessment of projects managers in construction. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 11(2), 501–520.
- Zhang, H., & Li, H. (2010). Multi-objective particle swarm optimization for construction time-cost tradeoff problems. *Construction Management and Economics*, 28(1), 75–88.

### DECLARAÇÃO ÉTICA

**CONFLITO DE INTERESSE:** Nada a declarar. **FINANCIAMENTO:** Nada a declarar. **REVISÃO POR PARES:** Dupla revisão anónima por pares.



Todo o conteúdo da **RAE — REVISTA DE ATIVOS DE ENGENHARIA** é licenciado sob [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.



## THE SIMULATION OF THE RELIABILITY OF ASSETS USING THE MONTE CARLO METHOD. THE SPECIFIC-CASE OF COMPLEX AND COHERENT SYSTEMS K-OUT-OF-N, WITH CENSORED DATA

### *A SIMULAÇÃO DA FIABILIDADE DE ATIVOS UTILIZANDO O MÉTODO MONTE CARLO. O CASO ESPECÍFICO DE SISTEMAS COMPLEXOS E COERENTES K-OUT-OF-N, COM DADOS CENSURADOS*

[10.29073/rae.v2i1.887](https://doi.org/10.29073/rae.v2i1.887)

**RECEÇÃO:** 14 de julho de 2023.

**APROVAÇÃO:** 3 de janeiro de 2024.

**PUBLICAÇÃO:** 6 de fevereiro de 2024.

**AUTOR/A 1:** Daniel Gaspar , IPV-ESTGV, Portugal, [danigaspar@estgv.ipv.pt](mailto:danigaspar@estgv.ipv.pt)

**AUTOR/A 2:** Luís Ferreira , FEUP/UP, Portugal, [iferreira@fe.up.pt](mailto:iferreira@fe.up.pt)

#### ABSTRACT

Management of the life cycle of physical assets is based on the estimated life of the equipment, whether during the project, installation and start-up or throughout its useful life. In many situations, engineering needs to calculate or simulate equipment's estimated useful life using accurate data, which is often censored or incomplete. In many cases, equipment, regarding failures, can be structurally represented as block diagram systems. For this article, complex and coherent systems (from a reliability point of view) were studied. Censored data usually results in the loss of important information but must be included in the reliability analysis models of these complex systems. The article develops the complex and coherent systems theory and the respective reliability models. With a new and original approach, simulation algorithms were developed to generate random and censored data (right-censored and type I data). Two case studies of complex systems were designed to validate the algorithms. For each case, a set of simulations was developed with the variation of the reliability models' different parameters to compare better, tune and optimize the simulation of these complex systems.

One of the relevant results shows that the more censored data in the sample, the greater the bias and error about the true value. The variation of the parameter  $\beta$  (shape factor) from  $\beta = 0.5$  to  $\beta = 1.5$  proportionally increases the bias.

This article aims to validate the use of the Monte Carlo simulation tool and the Weibull statistical distribution and contribute to improving, with more precision and speed, algorithms for simulating the reliability of complex and coherent systems in the presence of censored data.

**KEYWORDS:** Censored Data; Complex System and Coherent *k-out-of-n*; Monte Carlo Simulation; Reliability.

#### RESUMO

A gestão do ciclo de vidas dos ativos físicos, é feita com base estimativa de vida dos equipamentos, seja no projecto, na instalação e arranque ou ao longo da sua vida útil. Em muitas situações, a engenharia depara-se com necessidade de calcular ou simular o tempo estimado de vida útil dos equipamentos, usando dados reais, que muitas vezes são dados censurados ou incompletos. Em muitos casos os equipamentos, relativamente às falhas, podem ser estruturalmente representados como sistemas de diagramas de blocos. Para este artigo foram estudados os sistemas complexos e coerentes (do ponto de vista da fiabilidade). Os dados censurados, normalmente resultam em perda de



informação importante, mas devem ser incluídos nos modelos de análise de fiabilidade destes sistemas complexos. O artigo desenvolve a teoria de sistemas complexos e coerentes e os respectivos modelos de fiabilidade. Com uma abordagem nova e original foram desenvolvidos os algoritmos de simulação com geração de dados aleatórios e censurados (dados censurados à direita e tipo I) Para validação dos algoritmos, foram desenvolvidos dois casos de estudos de sistemas complexos. Para cada um dos casos foi desenvolvido um conjunto de simulações com a variação dos diferentes parâmetros dos modelos de fiabilidade de forma a se comparar, afinar e otimizar melhor a simulação destes sistemas complexos.

Um dos resultados relevantes mostra que quanto mais dados censurados na amostra existem, maior é o enviesamento e o erro relativamente ao valor verdadeiro. A variação do parâmetro  $\beta$  (factor de forma) de  $\beta = 0.5$  para  $\beta = 1.5$  é o que proporcionalmente aumenta o enviesamento.

Este artigo pretende validar o uso da ferramenta de simulação monte Carlo e da distribuição estatística de weibull e dar um contributo para melhorar, com mais precisão e rapidez, os algoritmos para a simulação da fiabilidade de sistemas complexos e coerentes na presença de dados censurados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dados Censurados; Fiabilidade; Simulação Monte Carlo; Sistemas Complexos e Coerentes *k-ou-of-n*.

---

## 1. INTRODUCTION

Asset management, some authors state (Maletič et al., 2020), (Trindade et al., 2019) and (J. E. Amadi-Echendu, 2004), has the main goal of realizing the value of an organization's assets and has a significant impact on the performance of organizations. Its practice and implementation have several stages and activities, including the study, evaluation and management of the life cycle of equipment based on reliability.

The current era of 4.0 industry and digital transformation is characterized by the use of advanced technologies that allow means for monitoring and predicting the performance of assets and processes (Crespo Marquez et al., 2020), which enables the review of the maintenance programs and contributes to the reduced asset management costs, ease of maintenance, more safety and business risk mitigation.

The subject of reliability and simulation of systems and the structural relationship between a system and its components is very important in the field of reliability. A comprehensive discussion of reliability theory can be found in (Barlow & Proschan, 1975) and in (Kaufmann et al., 1977). Reliability Block Diagrams — RBD can be defined as a network of blocks describing the system's function with logical connections of components needed to produce a specified system function. Barlow (1981) presents an exhaustive description of the theory of RBD and, more recently, Rausand (2004). If the system has more than one function, each function must be considered individually, and different diagrams need to be made for each system function. The system is fixed in one moment of time; the present state of the system is assumed to depend only on the current states of the components. The connection through a block, in RBD, means that the component is functioning.

A Reliability Block Diagram is developed in terms of functions. Usually not have an account for safety and auxiliary functions and components used to protect equipment, people or the environment. Reliability Block Diagrams can be used for repairable and non-repairable systems or components. In the survival analysis and reliability field, there are several situations in which equipment, components, and units are lost or taken from the study while they are still working. The data censored may occur in control situations, as in life-testing and preassigned time or actual operations, and to make a predictive analysis of failures on time, with systems with vast numbers of sensors and monitoring lots of parameters; in this case, using reliability models containing censored data is fundamental. Genschel & Meeker (2010) refers to the fact that, in practice, life test data are almost always time-censored or type



I because the study defines the time at which the test will end. Balakrishnan et al. (2000) have more details about when the progressive censoring schemes take place. Several methods and techniques have been proposed over the past decades for analyzing different types of reliable data. Most of them refer to complete data. However, evaluating highly censored reliability data has not been widely studied. Nelson (1985) presented an excellent work on this topic. In the beginning, few of the studies used simulation tools, but over time, simulation in the reliability field increased, most of them to estimation parameters.

Olteanu & Freeman (2010) conducted a simulation study that compared the performance of maximum likelihood (ML) and median-rank regression (MRR) methods in estimating Weibull parameters for highly censored reliability data. In addition to the well-known large-sample optimal properties associated with ML estimators, experience, including many simulation studies, has shown that ML estimators are generally hard to beat consistently, even in small samples (Genschel & Meeker, 2010), (Somboonsavatdee et al., 2007). Recently, the estimation of parameters from different lifetime distributions based on progressive type-II censored samples has been studied by several authors, including (Balakrishnan & Kannan, 2001), (Mousa & Jaheen, 2002), (Childs & Balakrishnan, 2000) and (Soliman, 2005).

This article is concerned with analyzing the simulation of censored reliability data. Indeed, the loss of information resulting from the unavailable exact failure times will negatively impact the efficiency of reliability analysis. Many articles use the percentage of data censored (% C) to compare and analyze the model and study simulations, like in (Balakrishnan & Mitra, 2012), (Birolini, 2017) and (Ross, 2012). The use and application of data censored in the field of reliability can be seen in (Wang & Coit, 2005), (Horst, 2009). The type of distribution used in this study is typically used in the reliability field. Understanding and developing a systematic method to build an accurate simulation model in the presence of censored data is essential, giving more accuracy and precision to the simulation process in the reliability field (Gaspar, 2019) and (Nelson, 1985).

## 2. STATE OF ART: SYSTEMS, RELIABILITY AND CENSORED DATA

### A. SYSTEM OF COMPONENTS

A system composed of  $n$  components will be classified as a system of order  $n$ . The component are to be numbered consecutively from 1 to  $n$ . Let  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  be the set of all components, where  $c_i$  is the  $i^{\text{th}}$  component, and  $n$  is the number of components in the system. Let  $x_i$  be the state of component  $c_i$  the system can be in one and only one of two states, that are either functioning or failed. To indicate the state of the  $i^{\text{th}}$  component a binary indicator variable  $x_i$  to component  $i$  is assigned:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{if component } i \text{ is functioning,} \\ 0, & \text{if component } i \text{ is failed.} \end{cases}$$

for  $i=1, \dots, n$ , where  $n$  is the number of the components in the system.

The number of components  $n$  in the system is called the order of the system.

The joint performance of all components in the system can be indicated by vector  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  called a state vector. Similarly, the binary variable  $\phi$  indicates the state of the system:

Similarly, the binary variable  $\phi$  indicates the state of the system:

$$\phi_i = \begin{cases} 1, & \text{if system } i \text{ is functioning,} \\ 0, & \text{if system } i \text{ is failed.} \end{cases}$$

The term binary variable will refer to a variable taking on the values 0 or 1.

The state of system is determined completely by the states of the components, so that may write:



$$\phi = \phi(x), \text{ where } x = (x_1, \dots, x_n).$$

The function  $\phi(x)$ , is called the structure-function of the system. A knowledge of the structure-function is equivalent to an understanding of the structure of the system.

### B. THE DEFINITION *K-OUT-OF-N* STRUCTURE

A system function, if and only if at least  $k$  of the  $n$  components is working, is called a *k-out-of-n* structure-function.

The structure function *k-out-of-n* structure can be written:

$$\phi_i = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{i=1}^n x_i \geq k, \\ 0, & \text{if } \sum_{i=1}^n x_i \leq k. \end{cases}$$

or equivalently,

$$\phi(x) = \prod_{i=1}^n x_i \text{ for } k = n,$$

While,

$$\begin{aligned} \phi &= (x_1 \dots x_k)(x_1 \dots x_{k-1} x_{k+1}) \dots (x_{n-k+1} \dots x_n) \\ &\equiv \max\{(x_1 \dots x_k)(x_1 \dots x_{k-1} x_{k+1}) \dots (x_{n-k+1} \dots x_n)\} \end{aligned}$$

for  $1 \leq k \leq n$ , every choice of  $k$  out of the  $n$   $x$ 's appears exactly. A parallel structure is a *1-out-of-n* structure and a series structure is an *n-out-of-n* structure.

### C. COHERENT STRUCTURES

The system with a monotone structure function is called semi-coherent. A semi-coherent system having relevant components is then called a coherent system. A system of components is coherent if all its components are relevant and the structure function is non-decreasing.

There are only two semi-coherent structures that are not coherent:

- $\phi(x) = 0$ , which fails for every state of its components,
- $\phi(x) = 1$ , which performs for every state of its components.

A physical system would be poorly designed if improving the performance of a component (that is, replacing a failed component with a functioning component) caused the system to deteriorate.

Assume that the system will not run worse than before if we replace a component in a failed state with one functioning. This is the same as requiring that the structure-function be non-decreasing in each argument.

### D. STRUCTURES REPRESENTED BY PATHS AND CUTS

A structure of order  $n$  consists of  $n$  components numbered from  $1$  to  $n$ . The set of components is denoted by:

$$c = \{1, 2, \dots, n\}$$



A path set  $P$  is a set of components in  $C$  that, by functioning, ensures that the system is working. A path set is said to be minimal if it cannot be reduced without losing its status as a path set.

A critical path vector for components  $i$  is a state vector  $(1_i; x)$  such that:

$$\phi(1_i, x) = 1 \quad \text{while} \quad \phi(0_i, x) = 0$$

This is equivalent to requiring that:

$$\phi(1_i, x) - \phi(0_i, x) = 1$$

In other words, given the states of the other components  $(1_i; x)$ , the system is functioning if and only if component  $i$  is working. It is, therefore, natural to call  $(1_i; x)$  a critical path vector for component  $i$ .

A critical path set  $C(1_i; x)$  corresponding to the critical path vector  $(1_i; x)$  for component  $i$  is defined by:

$$C(1_i, x) = \{i\} \cup \{j; x_j = 1, j \neq i\}$$

The total number of critical path sets (path vectors) for component  $i$  is:

$$\eta_\phi(i) = \sum_{(i;x)} [\phi(1_i, x) - \phi(0_i, x)]$$

Since the  $x_j$ 's are binary variables and thus can take only two possible values, 0 and 1, the total number of state vectors  $(i, x) = (x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$  is  $2^{n-1}$ .

A cut set  $K$  is a set of components in  $C$  which, by failing, causes the system to fail. A cut set is said to be minimal if it cannot be reduced without losing its status as a cut set. The association of a binary function with the arguments  $x_i$  and  $i \in P_j$  with the  $j^{\text{th}}$  minimal path set  $P_j$  of a coherent structure  $\phi$  is represented by:

$$\rho_j(x) = \prod_{i \in P_j} x_i \quad (1)$$

If all components in the  $j^{\text{th}}$  minimal path set function take the value 1, and 0 otherwise.

The structure  $\rho_j$  is the  $j^{\text{th}}$  minimal path series structure,  $(j=1, \dots, p)$  where  $p$  is the number of minimal path sets of  $\phi$  and  $\rho_j$  is the structure function of a series arrangement of the components of the  $j^{\text{th}}$  path set.

The structure are working if and only if at least one of the minimal path structures is work, follow identity is true representing the structure as a parallel arrangement of the minimal path series structures:

$$\phi(x) \equiv \prod_{j=1}^p \rho_j(x) \equiv \prod_{j=1}^p [1 - \rho_j(x)], \quad (2)$$

The structure may be interpreted as a parallel structure of the minimal path series structures. Combining equation 2 with equation 1, result is:

$$\phi(x) = \prod_{j=1}^p \prod_{i \in P_j} x_i \quad (3)$$

The association of a binary function with arguments  $x_i, i \in K_j$  with the  $j^{\text{th}}$  minimal cut set  $K_j$  of a coherent structure  $\phi$  is represented by:



$$\kappa_j(x) = \prod_{i \in K_j} x_i, \quad (4)$$

if all the components in the  $j^{th}$  minimal cut set fail, which takes the value 0 and 1 otherwise. The structure  $\kappa_j$  is the  $j^{th}$  minimal parallel cut structure ( $J=1, \dots, K$ ) where  $K$  is the number of minimal cut sets of  $\phi$  and  $\kappa_j$  is the structure function of a parallel arrangement of the components of the  $j^{th}$  cut set.

The structure fails if and only if at least one of the minimal cut structures fails; the following identity is true:

$$\phi(x) = \prod_{j=1}^K \kappa_j(x) \quad (5)$$

representing the structure as a series arrangement of the minimal cut parallel structures.

The structure may be interpreted as a series structure of the minimal cut parallel structure. By combining eq. 4 and 5, yield:

$$\phi(x) = \prod_{j=1}^K \prod_{i \in K_j} x_i \quad (6)$$

### E. RELIABILITY FUNCTION IN COHERENT STRUCTURES

In this section, the discussion will extend to include a probabilistic aspect of coherent structure. It is concerned about the reliability of a system based on the reliability components

Let the component state  $X_i$  be a Bernoulli random variable ( $P(X_i = 1) = p_i$  and  $P(X_i = 0) = q_i$ , where  $q_i = 1 - p_i$ ). Then  $P(X_i = 1) = p_i$  is called the reliability of component  $c_i$  and  $i = 1; 2; \dots; n$ . The corresponding system reliability is given by

$$R_\phi(\mathbf{P}) = P\{\phi(X) = 1 | \mathbf{p}\} = E[\phi(X) | \mathbf{p}], \quad \mathbf{p} = p_1, p_2, \dots, p_n \quad (7)$$

$R_\phi$  is called the reliability based on the structure function  $\phi$ . Using the assumption of component independence, the reliability  $R_\phi$  is wholly determined by component reliabilities ( $p_1; p_2; \dots; p_n$ ).

$R_\phi$  can be written as  $R_\phi(\mathbf{P})$ , and in the case of ( $p_1 = p_2 = \dots = p_n = p$ ), the reliability function can be written as  $R_\phi(p)$  from a common component reliability  $p$ .

When component  $c_i$  is functioning, the reliability function of a system is:

$$R_\phi(\mathbf{1}_i, \mathbf{p}) = P\{\phi(\mathbf{1}_i, X) = 1 | \mathbf{p}\}; \quad (8)$$

and the reliability function of a system given component  $c_i$  fails is:

$$R_\phi(\mathbf{0}_i, \mathbf{p}) = P\{\phi(\mathbf{0}_i, X) = 1 | \mathbf{p}\}; \quad (9)$$

where  $\mathbf{p} = (p_1; \dots; p_{i-1}, p_{i+1}, \dots; p_n)$ .

Exact system reliability can be computed using the structure function  $\phi(X)$ .

$$= E\left(\prod_{i=1}^t \prod_{\{j: z_{ij}=0\}} X_j\right) = E\left(\prod_{i=1}^r \prod_{\{j: w_{ij}=0\}} X_j\right), \quad (10)$$



where  $z_{ij}$  is the  $j$ th element of minimal-path vector  $z_i$ , and where  $w_{ij}$  is the  $j$ th element of minimal-cut vector  $w_i$  and assume independent components.

## F. RELIABILITY FUNCTION WITH LIFE DISTRIBUTION

A comprehensive discussion of reliability theory can be found in (Barlow and Proschan 1975) and (Kaufmann, Grouchko, and Cruon 1977). Let us consider the expression of reliability function when a system and its components have life distribution.

Let  $F_i(t)$  be a life distribution of component  $c_i$  and let:

$$X_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } c_i \text{ is functioning until time } t, \\ 0, & \text{if } c_i \text{ is failed before time } t. \end{cases}$$

Then, the reliability of component  $c_i$  at time  $t$  is:

$$P[X_i(t) = 1] = E[X_i(t)] = S_i(t) = 1 - F_i(t), \quad (11)$$

and the system reliability at time  $t$  is:

$$R_\phi[S(t) = 1] = P\{\phi[X(t)] = 1\} = E_\phi[X_i(t)]. \quad (12)$$

## 3. THE RIGHT DATA CENSORED

The data is considered complete when the exact time of each system failure is known. In many cases, the data contain uncertainties, i.e., when the failure occurred is unknown. The data containing such uncertainty as when the event occurred are regarded as incomplete or partial. Incomplete data can be classified as censored or truncated (Gijbels, 2010).

From the theoretical point of view, censoring may not be the most efficient way to conduct an experience, but due to time, cost, or practical things, it's so frequent that researchers have had to find ways to deal with it.

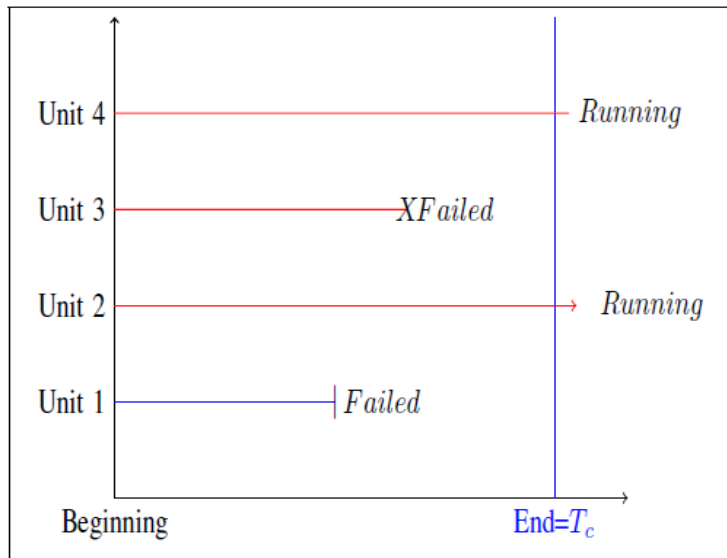
Characterizing the censoring mechanisms is essential to analyze the data and the phenomena in the study. Such a report can be based on several elements: the status of the entity observed, the study's span, the system's dynamic in the study, and the times of start and finish of the observations. Censoring mechanisms can also be characterized based on when and how the time to finish the study is defined. One of the most common types of censored data that may arise in real cases is type-I right censored data.

In type-I right censored data, all units of a system are observed up to the date of completion of the study. For this censorship scheme, the time each unit is under observation is fixed, while the number of units that fail (uncensored observations) is random. In this type of censoring, the stopping time ( $t_c$ ) is defined or pre-established, and the number of failures observed during the analysis period is random. It ends the experiment and stops monitoring all the entities at some pre-specified time  $t_c$ , independent of the event of interest. The Weibull distribution is the most popular statistical distribution in reliability engineering (Murthy et al., 2004). It can be used to fit many life distributions, and it has a significant advantage in the reliability field by changing the parameters to adjust perfectly to the reliability data.

Type I censoring occurs when the experiments are run only for a fixed duration  $t_c$ ; the lifetimes are known for those whose lifetimes are  $t_i \leq t_c$ , as it's possible to see in Fig. 1.



FIGURE 1: Fixed type I right censored.



The difference between type I and type II is that in type I censoring, the number of observed lifetimes is a random variable, and in type II, the number of observed events is fixed.

#### 4. SIMULATION FOR COHERENT SYSTEMS: K-OUT-OF-ON

To make a simulation Monte Carlo of complex systems k-out-of-n, using Weibull distribution, the following algorithm have been developed:

- Step 1** — Define the function of the structure of the *k-out-of-n* system;
- Step 2** — Calculate the time to censoring -  $t_c$  with the parameters of Weibull distribution;
- Step 3** — Generate  $t_i$  from random distribution function;
- Step 4** — Compare the time  $t_i$  with  $T_c$  to each component and give  $x_i = 0$  if are above or  $x_i = 1$  below the  $t_c$ ;
- Step 5** — With  $x_i$  and structure function, calculate if the system is working or not;
- Step 6** — Repeat for  $M$  times (the dimension of the cycle simulation);
- Step 7** — Calculate the reliability: the number of times the system works for the number of samples  $M$ .

The program was written in R software, and at the beginning, it defined the function structure and the rest of the parameters (number of simulations, etc.). After that, the loop “for” is applied to make the cycle where reliability is calculated in the Monte Carlo simulation core. The difference between 2-out-of-3 and the bridge example 2-out-of-5 is the structure-function of the system. This is defined in the program by a function with the name “*str fun*”.



LISTINGS 1: Simulation for *k-out-of-n* function *str fun*.

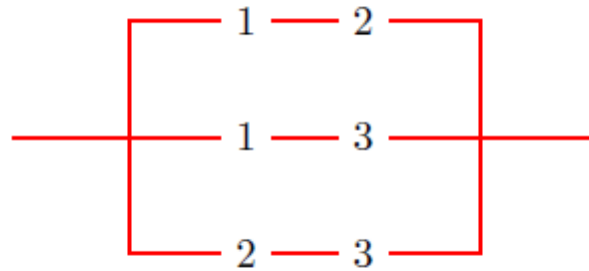
```
str_fun<-function(x1,x2,x3,x4,x5){
  res=x1*x4+x2*x5+x1*x3*x5+x2*x3*x4
  -x1*x3*x4*x5-x1*x2*x3*x5-x1*x2*x3
  *x4-x2*x3*x4*x5-x1*x2*x4*x5+2*x1
  *x2*x3*x4*x5
return(res)
}
simul_fun<-function(m){
  cr=0
  ...
}
```

5. SIMULATION OF COHERENT SYSTEMS

A. SIMULATION OF COHERENT SYSTEM: 2-OUT-OF-3

To illustrate the algorithm, the particular case of the 2-out-of-3 structure is considered, with structure-function given by

FIGURE 2: Coherent system 2-out-of-3.



Note that replicating each component is only for analyses; physically, each component appears only once. Some equipment is operational if and only if at least two of its three components are working like the engines of an airplane.

Consider the 2-out-of-3-structure in figure (2). The minimal path sets are:

$$P_1 = \{1,2\}, P_2 = \{1,3\}, P_3 = \{2,3\}$$

The minimal cut sets are:

$$K_1 = \{1,2\}, K_2 = \{1,3\}, K_3 = \{2,3\}$$

The 2-out-of-3 structure may therefore be represented as a series structure of its minimal cut parallel structures as illustrated in Figure 2.

In this particular example the number of minimal cut sets coincide with the number of minimal path sets. This will usually not be the case.

$$\phi = x_1x_2x_1x_3x_2x_3 \tag{13}$$

$$\equiv x_1x_2x_3 + x_1x_2(1 - x_3) + x_1(1 - x_2)x_3 + (1 - x_1)x_2x_3.$$



It uses the same Weibull parameters for all components: the shape parameter  $\beta$  has 0,5, 1, 1,5 and 2; the scale parameter is  $\eta=10$  for all components and simulations. The simulation is made for different numbers of samples to verify the impact of the number of samples for each simulation. Another important characteristic is to simulate reliability with other censored data; in this case, 5%,10%, 20% and 30% are used.

**TABLE 1:** Simulation 2-out-of-3, Weibull ( $\beta$ ;%C; n),  $\eta = 10$ .

Sample	C <sub>5%</sub>				C <sub>10%</sub>				C <sub>20%</sub>				C <sub>30%</sub>			
	$\beta_{0.5}$	$\beta_1$	$\beta_{1.5}$	$\beta_2$	$\beta_{0.5}$	$\beta_1$	$\beta_{1.5}$	$\beta_2$	$\beta_{0.5}$	$\beta_1$	$\beta_{1.5}$	$\beta_2$	$\beta_{0.5}$	$\beta_1$	$\beta_{1.5}$	$\beta_2$
10	1	0.7	0.8	0.6	1	1	0.7	0.8	1	1	1	0.7	1	1	0.9	0.7
100	0.94	0.94	0.82	0.69	0.99	0.99	0.93	0.76	1	1	0.96	0.81	1	1	0.99	0.88
500	0.91	0.88	0.82	0.73	1	0.98	0.93	0.76	1	0.99	0.95	0.86	1	1	0.98	0.9
1000	0.93	0.88	0.81	0.74	0.99	0.97	0.89	0.78	1	1	0.96	0.82	1	1	0.98	0.86
2000	0.94	0.89	0.8	0.75	0.99	0.98	0.9	0.78	1	1	0.95	0.82	1	1	0.99	0.86

The results are explicit in Table 1. From the table analysis, it's possible to see that with the increase in the sample number, the reliability value stabilized at a specific value. With the increase of the shape factor, the value of reliability decreases; however, the most unexpected evolution data,  $\beta$ , is the growth of reliability with the increase of censored data, when it was expected to decrease. One possible explanation is that with the rise of censorship, the system ends up better, vanishing the faults and giving globally less damage.

Testing with other parameters and comparative tests with different parameters for each component will be recommended.

**B. SIMULATION FOR 2-OUT-OF-5 BRIDGE STRUCTURE**

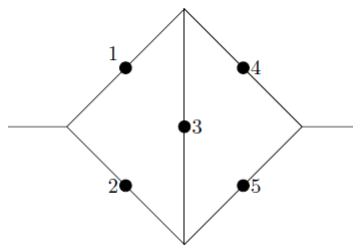
Consider a bridge structure such as that given by the physical network in Figure 3. The minimal path sets are:

$$P_1 = \{1,4\}, P_2 = \{2,5\}, P_3 = \{1,3,5\}, P_4 = \{2,3,4\}$$

The minimal cut sets are:

$$K_1 = \{1,2\}, K_2 = \{4,5\}, K_3 = \{1,3,5\}, K_4 = \{2,3,4\}$$

**FIGURE 3:** Bridge Structure Diagram.



Using the equation 2 and the minimal path sets, the bridge structure may be represent as a parallel-series diagram.

$$\begin{aligned} \rho_1 &= x_1 \cdot x_3 \cdot x_5 \\ \rho_2 &= x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \\ \rho_3 &= x_1 \cdot x_4 \\ \rho_4 &= x_2 \cdot x_5 \end{aligned} \quad (14)$$

accordingly, the structure function may be written:



$$\begin{aligned} \phi(x) &= \prod_{j=1}^4 \rho_j(x) = 1 - \prod_{j=1}^4 (1 - \rho_j(x)) \\ &= 1 - (1 - \rho_1(x))(1 - \rho_2(x))(1 - \rho_3(x))(1 - \rho_4(x)) \\ &= x_1x_4 + x_2x_5 + x_1x_3x_5 + x_2x_3x_4 - x_1x_3x_4x_5 \\ &= x_1x_4 + x_2x_5 + x_1x_3x_5 + x_2x_3x_4 - x_1x_3x_4x_5 \\ &\quad - x_1x_2x_3x_5 - x_1x_2x_3x_4 - x_2x_3x_4x_5 - x_1x_2x_4x_5 \\ &\quad + 2x_1x_2x_3x_4x_5 \end{aligned}$$

Similarly, using equation 5 and the minimal cut sets, we may represent the bridge as a series-parallel structure:

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= 1 - (1 - x_1)(1 - x_2) \\ \kappa_2 &= 1 - (1 - x_4)(1 - x_5) \\ \kappa_3 &= 1 - (1 - x_1)(1 - x_3)(1 - x_5) \\ \kappa_4 &= 1 - (1 - x_2)(1 - x_3)(1 - x_4) \end{aligned}$$

It used the same Weibull parameters to all components and is similar *with 2-out-of-3*: the shape parameter  $\beta$  has the values 0,5; 1, 1,5 and 2, and the scale parameter is  $\eta=10$ . The simulation is made for different numbers of samples on various percentages of censored data to verify the impact of the number of samples for each simulation.

**TABLE 2:** Simulation *2-out-of-5*, Weibull ( $\beta$ ;%C; n),  $\eta = 10$ .

Sample	C <sub>5%</sub>				C <sub>10%</sub>				C <sub>20%</sub>				C <sub>30%</sub>			
	$\beta_{0.5}$	$\beta_1$	$\beta_{1.5}$	$\beta_2$	$\beta_{0.5}$	$\beta_1$	$\beta_{1.5}$	$\beta_2$	$\beta_{0.5}$	$\beta_1$	$\beta_{1.5}$	$\beta_2$	$\beta_{0.5}$	$\beta_1$	$\beta_{1.5}$	$\beta_2$
10	0.9	0.9	0.7	0.7	1	1	0.8	0.6	1	1	1	0.8	1	1	1	0.9
100	0.92	0.89	0.79	0.71	1	0.95	0.88	0.81	1	0.99	0.97	0.88	1	1	1	0.83
500	0.94	0.9	0.82	0.74	0.99	0.98	0.91	0.82	1	1	0.96	0.85	1	1	0.98	0.89
1000	0.93	0.9	0.83	0.77	0.99	0.97	0.91	0.8	1	1	0.95	0.86	1	1	0.99	0.91
2000	0.93	0.9	0.83	0.76	1	0.98	0.91	0.8	1	1	0.97	0.84	1	1	0.99	0.88

The results are explicit in Table 2 compared with the simulation of reliability *2-out-of-3* system; the evolution and the pattern are the same. The absolute values of reliability for each simulation are very close. However, this structure is more complex and has almost the same redundancy as the simple *2-out-of-3* system.

## 6. CONCLUSIONS AND OUTLOOK

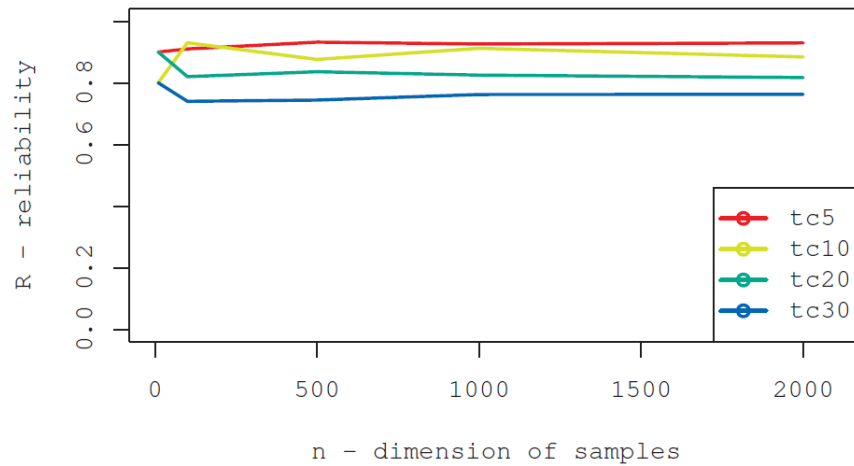
The subject of reliability and simulation of systems and the structural relationship between a system and its components is very important in the field of reliability. Reliability Block Diagrams — RBD can be defined as a network of blocks describing the system’s function with logical connections of components needed to produce a specified system function.

Survival testing and reliability studies are usually focused on estimating an unknown cumulative distribution function (CDF). In simulation studies, it’s normal to use computational power to test particular hypotheses and assess the validity and accuracy of various statistical methods or procedures concerning a known truth. These procedures and algorithms provide an empirical estimation of the sampling distribution of the parameters of interest.

The complex and coherent systems’ theory and the reliability functions are derived, and algorithms and simulations with censored data are carried out with a new and original approach.



FIGURE 4: Reliability, Weibull ( $\beta$ ;C=10% and n=50).



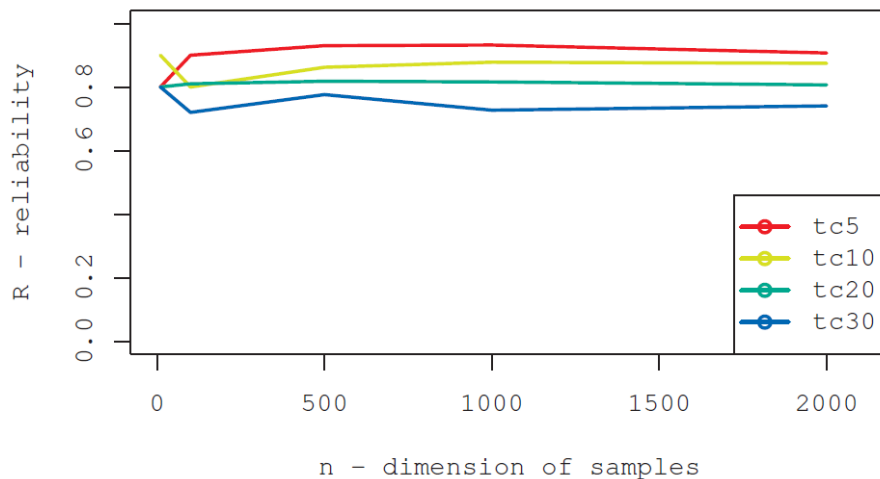
In Figures 4 and 5, which summarize in a condensed and graphic form the results of Tables 1 and 2, it can be seen that there is not an equal pattern for all shape factors but rather a tendency to approach the value as the percentage of censored data increases. That is, the more censored data there is in the sample, the more bias and more error, relative to the true value, the sample has. The behaviour of factors  $\beta = 0,5$  and  $\beta = 1,5$  are similar but with different scales.

This paper intends to help develop the best procedures to simulate the reliability field in a complex and coherent system by generating a sample of data with a particular characteristic (right censored and type I).

In conclusion, the work intends to generate more discussion and attention to the algorithms that simulate data censored with complex and coherent systems and give some tools and results to make the simulations and the studies more accurate and optimized.

The next step for this work would be to continue the study with the same algorithm for the other statistical distributions, namely the exponential, gamma, log-normal, and normal distributions. Another important step would be to verify whether the chosen algorithm was well adapted to other types of censored data, as would be the case with type II censored data. Finally, as this work was developed in a specific software language, the R software, it would also be interesting to verify the performance of algorithms in other languages, such as Python or C++.

FIGURE 5: Reliability, Weibull ( $\beta$ ;C=10% and n=50).





## REFERENCES

- Balakrishnan, N., & Aggarwala, R. (2000). *Progressive censoring: Theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media.
- Balakrishnan, N., & Kannan, N. (2001). Ch. 14. Point and interval estimation for parameters of the logistic distribution based on progressively type-II censored samples. In *Handbook of statistics* (Vol. 20, pp. 431–456). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0169-7161\(01\)20016-9](https://doi.org/10.1016/S0169-7161(01)20016-9)
- Balakrishnan, N., & Mitra, D. (2012). Left truncated and right censored Weibull data and likelihood inference with an illustration. *Computational Statistics & Data Analysis*, 56(12), 4011–4025.
- Barlow, R. E., & Proschan, F. (1975). *Statistical Theory of Reliability and Life Testing: Probability Models*. Holt, Rinehart and Winston.
- Biolini, A. (2017). *Reliability Engineering: Theory and Practice*. Springer Berlin Heidelberg.
- Childs, A., & Balakrishnan, N. (2000). Conditional inference procedures for the Laplace distribution when the observed samples are progressively censored. *Metrika*, 52(3), 253–265.
- Crespo Marquez, A., et al. (2020). Maintenance Management through Intelligent Asset Management Platforms (IAMP). Emerging Factors, Key Impact Areas and Data Models. *Energies*, 13(15), 3762. <https://doi.org/10.3390/en13153762>
- Gaspar, D. (2019). *The advanced reliability and maintainability analysis using simulation tools*. [Ph.D. Thesis]. FEUP, UP.
- Genschel, U., & Meeker, W. Q. (2010). A comparison of maximum likelihood and median-rank regression for Weibull estimation. *Quality Engineering*, 22(4), 236–255.
- Gijbels, I. (2010). Censored data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(2), 178–188.
- Horst, R. (2009). *The Weibull Distribution A Handbook*. Taylor and Francis Group.
- J. E. Amadi-Echendu. (2004). Managing physical assets is a paradigm shift from maintenance. *2004 IEEE International Engineering Management Conference* (IEEE Cat. No.04CH37574), 3, 1156–1160 Vol. 3. <https://doi.org/10.1109/IEMC.2004.1408874>
- Kaufmann, A., Grouchko, D., & Cruon, R. (1977). *Mathematical Models for the Study of the Reliability of Systems*. Academic Press.
- Maletič, D., et al. (2020). An Analysis of Physical Asset Management Core Practices and Their Influence on Operational Performance. *Sustainability*, 12(21), 9097. <https://doi.org/10.3390/su12219097>
- Mousa, M. A., & Jaheen, Z. (2002). Statistical inference for the Burr model based on progressively censored data. *Computers & Mathematics with Applications*, 43(10–11), 1441–1449.
- Murthy, D. P., Xie, M., & Jiang, R. (2004). *Weibull models* (Vol. 505). John Wiley & Sons.
- Nelson, W. (1985). Weibull analysis of reliability data with few or no failures. *Journal of Quality Technology*, 17(3), 140–146.
- Olteanu, D., & Freeman, L. (2010). The evaluation of median-rank regression and maximum likelihood estimation techniques for a two-parameter Weibull distribution. *Quality Engineering*, 22(4), 256–272.



Ross, S. M. (2012). *Simulation*. Elsevier Science.

Soliman, A. A. (2005). Estimation of parameters of life from progressively censored data using Burr-XII model. *IEEE Transactions on Reliability*, 54(1), 34–42.

Somboonsawatdee, A., Nair, V. N., & Sen, A. (2007). Graphical estimators from probability plots with right-censored data. *Technometrics*, 49(4), 420–429.

Trindade, M., Almeida, N., Finger, M., & Ferreira, D. (2019). Design and Development of a Value-Based Decision Making Process for Asset Intensive Organizations. In J. Mathew, C. W. Lim, L. Ma, D. Sands, M. E. Cholette, & P. Borghesani (Eds.), *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies* (pp. 605–623). Springer International Publishing.

Wang, P., & Coit, D. W. (2005). Repairable systems reliability trend tests and evaluation. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 416–421.

### DECLARAÇÃO ÉTICA

**CONFLITO DE INTERESSE:** Nada a declarar. **FINANCIAMENTO:** Nada a declarar. **REVISÃO POR PARES:** Dupla revisão anônima por pares.



Todo o conteúdo da **RAE — REVISTA DE ATIVOS DE ENGENHARIA** é licenciado sob [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.



# Revista de Ativos de Engenharia